

# Tartalom

<b>ŰRKUTATÁS: A TECHNOLÓGIAI FEJLESZTÉS MOTORJA</b>	1
<b>Both Előd</b> A nemzetközi és hazai űrtevékenység fő területei	3
<b>Rontó Györgyi, Bérces Attila</b> Űrkutatás és asztrobiológia	10
<b>Ferencz Csaba, Lichtenberger János, E. Ferencz Orsolya, Hamar Dániel, Bodnár László, Steinbach Péter, Valery Korepanov, Galina Mikhajlova, Yuri Mikhajlov, Vladimir D. Kuznetsov</b> A SAS2: ULF-VLF elektromágneses hullám elemző műszer a Kompas-2 műhold fedélzetén	15
<b>Sulyán János, Szalai Lajos, Lipusz Csaba, Szalai Sándor</b> A BepiColombo űrszonda adatgyűjtő és vezérlő rendszere	24
<b>Dudás Beáta, Szabó Julianna, Pálfalvi József</b> Passzív űrdozimetria magyar részvétellel	30
<b>Balajthy Kálmán, Lipusz Csaba, Sódor Bálint, Szalai Sándor</b> A földi ellenőrző berendezésekben alkalmazott programozási technikák	35
<b>Farkasvölgyi Andrea, Farkas Lóránt, Nagy Lajos</b> Műhold és beltéri környezet közötti rádiócsatorna szimulációs vizsgálata	41
<b>Bükkfejes András, Csurgai-Horváth László, Kovács Zoltán György, Kökényesi Tamás, Marosy Gábor Elemér, Szabó István, Vancsik János, Varga Lajos</b> Fedélzeti adatgyűjtő rendszer fejlesztése az SSETI ESMO programjához	47
<b>Kocsis Gábor, Szimler András</b> Kisműholdak megbízhatóság és hatások szerint optimalizált energiaellátó rendszere	52

Címlap: A Nemzetközi Űrállomás (ISS)

---

## Védnökök

SALLAI GYULA a HTE elnöke és DETREKŐI ÁKOS az NHIT elnöke

---

## Főszerkesztő

SZABÓ CSABA ATTILA

## Szerkesztőbizottság

Elnök: ZOMBORY LÁSZLÓ

BARTOLITS ISTVÁN  
BÁRSONY ISTVÁN  
BUTTYÁN LEVENTE  
GYŐRI ERZSÉBET

IMRE SÁNDOR  
KÁNTOR CSABA  
LOIS LÁSZLÓ  
NÉMETH GÉZA  
PAKSY GÉZA

PRAZSÁK GERGŐ  
TÉTÉNYI ISTVÁN  
VESZELY GYULA  
VONDERVISZT LAJOS

# Űrkutatás: a technológiai fejlesztés motorja

dr.kantor.csaba@t-online.hu

**H**armadik alkalommal jelentkezik a Híradástechnika űrkutatással foglalkozó tematikus számmal, így elmondhatjuk, hogy a kétévenkénti megjelenéssel hagyományt teremtettünk. Különös aktualitást ad ennek a számnak az, hogy az elmúlt hónapokban ünnepeltük az űrkorszak 50. évfordulóját. Ez jó alkalom egy kis visszatekintésre is, de az olvasóközönség érdeklődését figyelembe véve a jelenlegi szám szerkesztésénél is azt tűztük ki célul, hogy cikkeink a hazai űrkutatás legújabb eredményeiről adjanak áttekintést.

Az űrkutatás, vagy pontosabban űrtevékenység feletőbb szerteágazó szakterület. Annak érdekében, hogy olvasóink ezeket a munkákat el tudják helyezni az űrtevékenység egészén belül, az első cikk – *Both Előd, a Magyar Űrkutatási Iroda igazgatója, az ENSZ Világűr-bizottság alelnöke tollából* – a teljességre való törekvés nélkül átfogó képet ad a világ és Magyarország űrtevékenységéről. A kutatások izgalmas területe a Föld határain túlnyúló világ megismerése, ez azonban azzal a következménnyel jár, hogy nem lehet kizárni élő rendszerek átjutását egyik bolygóról a másikra. A téma kiemelkedő szakértői ezt a kérdést járják körbe.

Az *ELTE űrkutatási csoportjának* új hullámterjedési számításairól már a korábbi számokban szó esett, most lehetőségük nyílt, hogy az elméletet a 2006-ban startolt Kompass-2 műhold fedélzetén sikeresen működő, továbbfejlesztett SAS2 elektromágneses hullámelemző műszer mérési eredményeivel igazolják.

A magyar űrkutatók nemzetközi programokban való részvételének jó példája a *BepiColombo* űrszondában való magyar részvétel. A BepiColombo az Európai Űrügynökség (ESA) első űrprogramja a Merkúr kutatására, melyet Giuseppe (Bepi) Colombo olasz asztrofizikusról neveztek el. A cikk röviden ismerteti a Merkúrhoz induló űrszonda programját, ahol alkalmazásra került az általuk kifejlesztett új adatgyűjtő és vezérlő buszrendszer: a SpaceWire.

Az MTA KFKI Atomenergia Kutatóintézetben a 70-es évek végén űrkutatási céllal kifejlesztettek egy kisméretű, *hordozható dózismérő rendszert*. A műszer nemzetközi karrierje azóta tovább folytatódott, jelenleg is több nemzetközi projektben hasznosítják. Most két űrkutatással foglalkozó projekt kerül ismertetésre, melyek évek

óta nemzetközi összefogással, köztük magyar részvétellel folynak az Európai Űrkutatási Ügynökség (ESA) irányításával. Az egyik egy emberszerű fantom felhasználásával a kozmikus sugárzás okozta dózisterhelés eloszlásának meghatározását tűzte ki célul, a másik kísérletsorozatban pedig űrbiológiai folyamatokat vizsgálnak.

A tudományos űrkutatási programok jellemzően nemzetközi együttműködésben készülnek, a misszió során használatos különböző tudományos műszerek, illetve vezérlő és adatgyűjtő egységek fejlesztése párhuzamosan folyik, különböző országok kutatóhelyein. Természetesen a fejlesztés során a különböző fejlesztő részlegeknek nem állnak rendelkezésükre a máshol készülő, szintén még fejlesztési stádiumban lévő komponensek, noha a fejlesztés során erre, kiváltképpen a vezérlő és adatgyűjtő egységre nagy szükség van. Ennek a problémának a feloldása az úgynevezett elektronikus földi ellenőrző berendezések (Electrical Ground Support Equipment – EGSE) segítségével történik. Az EGSE-rendszerek biztosítják a műszerek űrszondára szerelt tesztkörnyezetét, a különböző komponensek interfészeinek szimulációját a fejlesztés és minősítés során. A Részecske és Magfizikai Kutatóintézet (KFKI RMKI) az SGF Kft.-vel együtt már hosszú évek óta részt vesz űrkutatással kapcsolatos fejlesztésekben; fedélzeti egységek és földi ellenőrző berendezések fejlesztésében vállalnak szerepet. Cikkük az *EGSE rendszerek fejlesztése* kapcsán az elmúlt években felhalmozott tapasztalatokat és az alkalmazott technológiákat mutatja be röviden.

Míg az eddig bemutatott cikkek a széles űrkutatási témakörökből válogattak, a továbbiakban a Híradástechnika olvasóközönségéhez közelebb álló távközlési alkalmazások kerülnek terítékre.

A mobil műholdas rendszereket már jelenleg is alkalmazzák és előreláthatóan széles körben fognak tovább terjedni. A közvetlen beltéri alkalmazás a vezeték nélküli kommunikáció egyik kulcsproblémája, mely nélkül a műholdas rendszerek csak jelentős korlátozásokkal használhatóak a kommunikációs hálózatokban. Szükséges egy jól kidolgozott módszer az épületen belüli területre történő behatolás becslésére és a hullámok polarizációs állapotának jellemzésére. Szerzőink a *beltéri csatorna analízisére alkalmas szimulációs eljárást* és annak eredményeit mutatják be.

Az űrkitatást nem lehet elég korán elkezdni, a korai tanulmányokhoz kiváló lehetőség az ESMO (European Student Moon Orbiter) diákműhold létrehozásában való aktív részvétel. A hazai hagyományoknak megfelelően fiatal kutatóink ebben is jelentős szerepet vállalnak. Cikkünkben az *ESMO fedélzeti adatgyűjtő rendszerének* fejlesztését mutatják be. Ez a műhold az ESA által támogatott fejlesztés keretein belül készül egyetemi hallgatók önálló munkájaként. Az OBDH (Onboard Data Handling Computer) tervezését a BME diákjaiból álló fejlesztői csoport végzi az űrkitató csoport támogatásával.

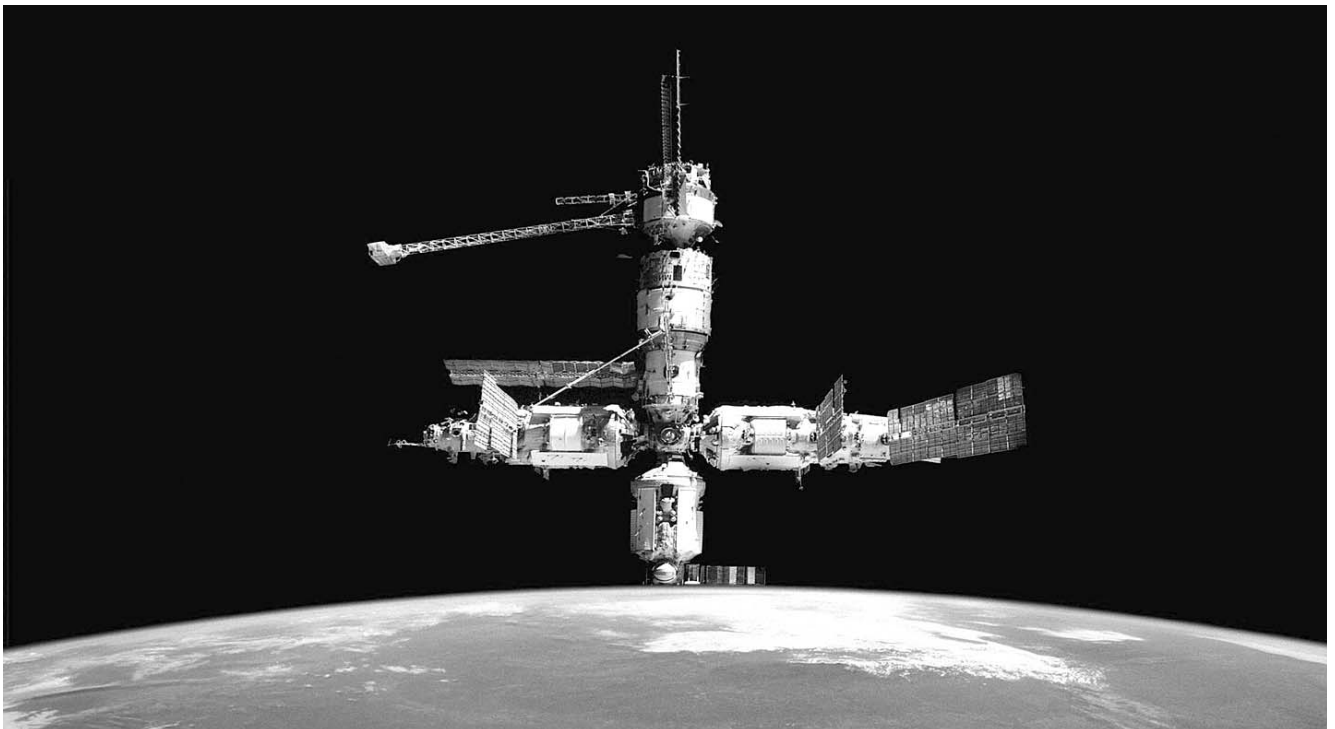
A nagyméretű műholdak fedélzetén a költséghatékonyság, illetve a tervezés és kivitelezés egyszerűsítése céljából alkalmazott (és sokszor szabványként kezelt) rendszertechnikai, áramköri és technológiai megoldások gyakran nem adoptálhatók a kisműholdas missziókba. Ennek oka főként az erősen korlátozott rendelkezésre álló teljesítmény és a szigorú méretkorlát. Ezért a kisméretű űreszközök esetén elengedhetetlen a kül-

detésorientált tervezési szemlélet. Különös tekintettel igaz ez az alaprendszerekre, melyek meghibásodása esetén az egész misszió veszélybe kerül, illetve kudarcba fulladhat. Minden űreszköz egyik legkritikusabb alrendszer az energiaellátó rendszer. Utolsó cikkünk két konkrét példán keresztül tárgyalja a *kisműholdak tápellátó rendszereinek fő tervezési szempontjait*, valamint ismerteti a két különböző specifikációnak megfelelő rendszer tervezése során felmerült optimalizálási szempontokat.

50 éve indult az űrkorszak, visszatekintve láthatjuk az űrkitatás fontosságát és a használt technológiák térhódítását, amely folyamatosan jelen van a mindennapi tudományban, sőt még mindennapi életünkben is. Az itt csokorba gyűjtött cikkek ismét bizonyítják, hogy szakembereink ezen a területen is megállják helyüket a nemzetközi együttműködésekben.

*Kántor Csaba*  
vendégszerkesztő

*Szabó Csaba Attila*  
főszerkesztő



# A nemzetközi és hazai űrtevékenység fő területei

BOTH ELŐD

Magyar Űrkutatási Iroda  
both@hso.hu

**Kulcsszavak:** űrkutatás, űrtevékenység, Európai Űrügynökség, műholdak, Hubble-űrtávcső

*Az űrkutatás, vagy pontosabban űrtevékenység felettébb szerteágazó szakterület. A Híradástechnika mostani tematikus száma a hazai eredmények közül mutat be néhányat. Annak érdekében, hogy olvasóink ezeket a munkákat el tudják helyezni az űrtevékenység egészén belül, ez a cikk megpróbál valamivel átfogóbb képet adni a világ és Magyarország űrtevékenységéről. Teljességre azonban hiába is törekednénk, ez egyetlen cikken belül még Magyarországra szorítkozva is lehetetlen, nem is beszélve a szerte a világon ezen a területen folyó fejlesztésekről és alkalmazásokról.*

## 1. Technikai háttér

Az aktív űrkutatáshoz mindenekelőtt hordozórakétákra van szükség. Ezek kezdetben a katonai rakéták nagyobb teljesítményű változatai voltak. Az alapelv fél évszázad alatt mit sem változott, kémiai hajtóanyaggal működő rakéták biztosítják, hogy a hasznos teher elérje legalább az első kozmikus sebességet. Minőségi ugrást jelentett a többször felhasználható űrrepülőgépek kifejlesztése, azonban a Space Shuttle rendszer nem tudta a várakozásoknak megfelelő arányban csökkenteni a fajlagos költségeket, ezért néhány éven belül – csaknem három évtizedes sikeres működés után – kivonják őket a forgalomból. Történtek másfajta próbálkozások is a hagyományos rakéták kiváltására – repülőgépről indított rakéták, ionhajtóművek – ezek azonban eddig technikai korlátaik miatt nem tudtak elterjedni.

A sikeres űrtevékenységhez jelentős földi infrastruktúrára van szükség. Mindenek előtt a rakéták indítását lehetővé tevő űrközpontokra. A legjelentősebbek – Bajkonur, Pleszeck, Kennedy vagy Kourou – mellett egyre többet hallunk Tanegashimáról vagy Sriharikotáról, ám ma már tengeralattjáróról vagy átalakított, úszó tengeri fúrótoronyról is lehet rakétát indítani a világűrbe. A földi szegmens további fontos része az irányítóközpont, valamint az adatok vételét biztosító vevőállomás.

Az űrtevékenységhez számtalan különféle eszközt, műholdakat, űrhajókat, űrállomásokat, űrszondákat kellett kifejleszteni. Nem célunk ezek fogalmának pontos definiálása, inkább néhány olyan kihívást szeretnénk érzékeltetni, amelyekkel egyes speciális területeken a fejlesztőknek szembe kellett nézniük. Ritka kivételektől eltekintve a meghibásodott műholdakat nem lehet megjavítani, ezért maximális üzembiztonságra kell törekedni, ami különleges mérnöki megoldásokat igényel. Gondoskodni kell az űreszköz energiaellátásáról. A Szputnyik-1 még akkumulátorokat vitt magával. Ma a mesteres égitestek döntő többségét napelemekkel szerelik fel. Az űrcélokra kifejlesztett, hatékony napelemek számos földi alkalmazásra találtak, ha energiagondjaink

megoldását nem is ezektől várhatjuk, azért a villamos hálózattól távoli közösségek vagy berendezések gazdaságos áramellátásában egyre jelentősebb szerepet játszanak. A Naprendszer távoli vidékeire induló űrszondákat viszont radioaktív izotópok bomlási hőjét árammá alakító generátorokkal szerelik fel.

A nagy mennyiségű mérési adat, főként a képek hatékony Földre továbbítása új adattömörítési eljárások kidolgozására sarkallt. Mivel a világűrben a rendelkezésre álló energia mennyisége korlátozott, az űreszközök pályára állításának költsége pedig tömegükkel arányosan nő, ezek a feltételek ösztönzőleg hatottak az eszközök miniatürizálására. Különleges kihívást jelent a mérnökök számára az űrhajók, űrállomások fedélzetén az űrhajósok számára a megfelelő életfeltételek folyamatos biztosítása.

## 2. Tudományos kutatás

Sokan úgy hiszik, hogy az űrtevékenység fő haszonélvezője a tudományos kutatás, innen is ered sok nyelvben a kissé félrevezető „űrkutatás” kifejezés. A valóság az, hogy a meghatározó űrhatalmak csak költségvetésük kisebb hányadát fordítják tudományos kutatásra. Az Európai Űrügynökség esetében például ez az arány 11,6% (2006-os adat). Ha tárgyilagosak akarunk lenni, akkor ehhez hozzá kell számolni egyéb költségeket is, például a rakétafejlesztésekből a tudományos űrszondák feljuttatására eső hányadot, a költség aránya azonban így sem válik meghatározóvá. Tény viszont, hogy az Európai Űrügynökségen belül a tudományos programok bizonyos mértékig privilegizáltak, ugyanis az úgynevezett kötelező programok közé tartoznak, amelyek végrehajtásából egyetlen tagállam sem vonhatja ki magát (ellentétben az önkéntes programokkal, például a hordozórakéták fejlesztésével).

Mindamellet a tudományos kutatás rengeteget profitált az űrtevékenységből. Egyrészt a világűrbeli fizikai környezet sajátosságai miatt a Földön nem elérhető ku-

tatási feltételeket teremt, az alap- és alkalmazott kutatások egy része tehát magát a világűrt használja laboratóriummként. Ritkán a világűrt, mint vákuumot, gyakrabban magát az űreszköz fedélzetén uralkodó súlytalanságot, vagy néha a világűr sajátos sugárzási viszonyait.

Az ilyen jellegű kutatások roppant szerteágazóak, ezért meg sem kísérelünk áttekintést adni róluk. Csupán két fő területüket említjük meg, a fizikai és a humán mikrogravitációs kutatásokat (ahol a mikrogravitáció a tehetetlenségi pályán mozgó űreszközben uralkodó súlytalanság fontoskodva félrevezető, ám megváltoztathatatlanul elterjedt megnevezése). A fizikai kutatások az égés vizsgálatától az anyagtudományokig sokfélék, míg legalább ennyi alterületre oszlik a súlytalanság és a sugárzási környezet emberre, állatokra, növényekre, mikrobákra gyakorolt hatásának a vizsgálata.

A másik nagy terület magának a világűrnek, pontosabban az ott található objektumoknak a kutatása. Legkézenfekvőbb magának a Földnek, illetve bolygónk kozmikus környezetének a tanulmányozása. Talán nem meglepő, hogy az űrkutatás első jelentős tudományos eredményeinek egyike éppen a Földet körülvevő sugárzási övek, az úgynevezett van Allen-övek felfedezése volt. A kutatási eredmények a semleges felső légkörtől az ionoszféráig és a magnetoszféráig ugyancsak sokfélék.

Még fontosabb eredmények születtek a Naprendszer többi bolygójának vizsgálatában. Az űrtevékenység kezdetén ezek az égitestek jószerével apró fénypontok voltak az égen, amelyekről mozgásuk mechanikai jellemzőinél aligha lehetett sokkal többet tudni. Már a 60-as években elindultak az első űrszondák a bolygók felé. Munkájuknak köszönhetően új világok tárultak fel a maguk fizikai valóságában, olyannyira, hogy megszületett egy új tudományág, a geológia kozmikus léptékű kiterjesztésének tekinthető planetológia.

Több tucat űrszonda teljesített számtalan sikeres küldetést a Naprendszerben. A legtöbb szonda a Vénuszt és a Marsot kereste fel, ezután viszont meglepő módon a Naprendszer apró égitestjei, a különböző kisbolygók és üstökösök következnek. Mindamellet elmondható, hogy ma már nincs a Naprendszernek olyan bolygója, amely felé ne indult volna űrszonda (mindez akkor is igaz, ha egy szerencsétlen döntés folytán a bolygók száma időközben nyolcra csökkent). Űrszondáink leszálltak a Holdon kívül két bolygóra (a Vénuszra és a Marsra), sőt, a Szaturnusz egyik holdjára és egy kisbolygóra is. Több égitest körül keringenek már űrszondáink, a Mars felszínén pedig kerekeken gördülő robotlaboratóriumok végeznek évek óta méréseket.

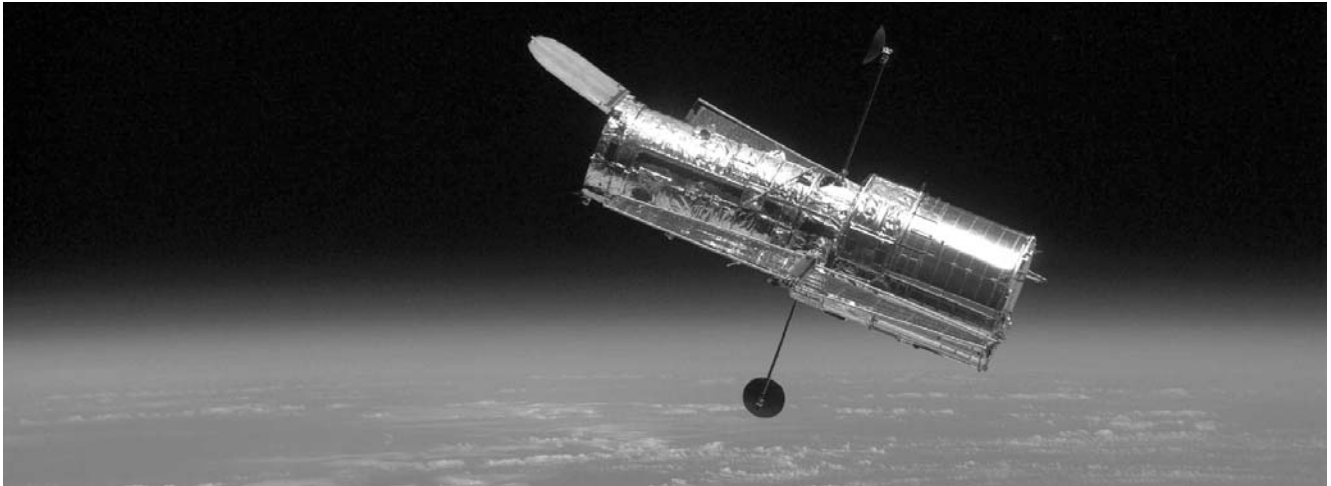
Mindaz, amit ma a Naprendszer égitestjeinek fizikai viszonyairól tudunk, az űreszközöknek köszönhető. A szilárd felszínnel rendelkező bolygókról és néhány holdról részletes térképeink vannak. A Mars egész felszínén néhány méteres részleteket tudunk megkülönböztetni, a leszállóhelyek környékén viszont milliméteres alakzatokat is megörökítettek a kamerák. A bolygón becsapódásos krátereket, ősi vízfolyások nyomait és óriási, kihunyt vulkánokat találtunk. A Jupiter egyik holdján

viszont ma is működnek a tűzhányók. Teljes részletességében tárult fel a Szaturnusz gyűrűrendszere, és az ismert holdak számának csak az szab határt, hogy milyen méret fölött tekintünk egy bolygó körül keringő kődarabot holdnak. A legemlékezetesebb küldetések közé tartozik a Marsra leszálló két Viking szonda a 70-es években, a következő évtizedben a Halley-üstököst megközelítő űrszondák, a 90-es években a Jupiter körül keringő Galileo szonda, végül évtizedünkben a Szaturnusz körül keringő Cassini űrszonda, és a Marsot vizsgáló több keringő és leszálló egység.

Fontos eredmények születtek a klasszikus értelemben vett csillagászatban is, elsősorban annak köszönhetően, hogy a csillagokat az űreszközök segítségével a teljes elektromágneses színekben lehet tanulmányozni. A röntgenégbolt a nagy energiájú jelenségek világát tárta fel, kiemelkedően fontosak a fekete lyukakkal kapcsolatos eredmények. Az infravörös tartományban a csillagok keletkezésére vonatkozóan születtek jelentős eredmények. A rejtélyes gammavillanásokat még a 60-as években katonai műholdak fedezték fel, magyarázatukra évtizedeket kellett várni. Fontos új eredmények születtek azonban az optikai csillagászatban is.

Az űreszközöknek köszönhetően megújult és a közeljövőben tovább fejlődik a csillagászat talán legklasszikusabb ága, az ókor óta művelt asztrometria, vagyis pozíciós csillagászat. Hipparkhosz csillagkatalógusa mintegy ezer csillagot tartalmazott. Az Európai Űrügynökség (ESA) 2011-re tervezett, öt éven át tartó Gaia programja keretében a Tejútrendszer egymilliárdnál több csillagát tartalmazó katalógus fog készülni, amely természetesen nem csak a csillagok pozícióját, hanem a hőmérsékletükre, korukra és kémiai összetételükre vonatkozó adatokat is magában foglalja majd. Az égi pozíciókat 7 és 300 milliomod ívmásodperc közötti pontossággal mérik. A csillagok katalogizálásának melléktermékeként várhatóan 10 millió galaxis, 500 ezer kvazár, 50 ezer barna törpe, 1 millió kisbolygó és üstökös, valamint 30 ezer Naprendszeren kívüli bolygó (úgynevezett exobolygó – ilyenekből ma mintegy 200-at ismerünk!) adatait is rögzítik.

Ugyancsak az optikai tartományban dolgozik a csillagászati kutatásokat forradalmasító *Hubble-űrtávcső* (HST). Ezúttal, csupán példaként, megpróbálom izelítőt adni a HST legfontosabb tudományos eredményeiből. A HST minden korábbinál jóval messzebbre lát a Világegyetemben. Sikerült 12 milliárd fényévnél távolabbra nézni, vagyis a galaxisok kialakulásának nagyon korai szakasza vált láthatóvá. Így nem egészen egymilliárd évvel az ősrobbanás utáni állapotba tudunk bepillantani. Sikerült a korábbi messze felülmúló pontossággal megmérni a Világegyetem tágulását jellemző paramétert, a Hubble-állandót és ezen keresztül kiszámítani a Világegyetem korát, amely mai ismereteink szerint 13,6 milliárd év. Ezt a mérést az tette lehetővé, hogy a HST-vel távolabbi galaxisokban lehetett a pontos extragalaktikus távolságmérésben nélkülözhetetlen cefeida változócsillagokat felfedezni.



Minden kétséget kizáróan bebizonyosodott a csillagászok korábbi gyanúja, mely szerint a galaxisok közép-pontjában óriási fekete lyukak rejtőznek. A HST adatai alapján összefüggés látszik kirajzolódni a fekete lyukak tömege és az őket körülvevő galaxisok tulajdonságai között, ami támpontot adhat ezen fekete lyukak kialakulásának felderítéséhez. Legújabbban a Hubble-űrtávcső mérései alapján meghökkentő felfedezés született. Kiderült, hogy a várakozásokkal ellentétben a Világegyetem tágulása nem lassul – holott a gravitáció működése miatt ez látszana logikusnak, ezért eddig a csillagászok mindig csak arra voltak kíváncsiak, milyen ütemű a tágulás lassulása –, hanem gyorsul. Ehhez viszont valamilyen taszító hatás működésére van szükség. Ezt a közönséges anyagtól és energiától minőségileg különböző, úgynevezett sötét energiának tulajdonítják.

Az úgynevezett protoplanetáris korongok formájában sikerült születőfélben lévő bolygórendszereket megfigyelni. Látványos felvételek készültek csillagközi gázködökről, amelyekben ma is intenzíven folyik csillagok, egyesek körül pedig bolygók kialakulása. Sikerült továbbá a galaxisok közötti térben hosszú, egymástól távoli galaxisokat összekötő anyaghidakat megfigyelni és fontos felfedezés volt, amikor sikerült egyes gamma-kitöréseket optikai forrásokkal azonosítani. Ezzel bebizonyították, hogy a régóta a legrajtélyesebbek közé sorolt csillagászati jelenségek valóban kozmológiai távolságban játszódnak le, tehát valóban a Világegyetem legfényesebb felvillanásainak lehetünk szemtanúi.

Számos látványos felvétel került át a köztudatba, melyek hatással voltak a világról alkotott felfogásunkra. A Shoemaker-Levy-9 üstökös Jupiterbe csapódásáról készült részletes képek szemléletesen érzékeltették, hogy a hasonló kozmikus katasztrófák bennünket is utolérhetnek. A haldokló csillagok körül kialakult szebbnél szebb planetáris ködöket ábrázoló, lenyűgöző képek a Nap majdani sorsát vetítik elénk. Rendszeresen készültek a helyszínre küldött űrszondákét megközelítő minőségű képek a Naprendszer különböző bolygóiról. Végül, de nem utolsósorban szinte a HST jelképévé vált az egyik csillagközi gázködben található, „Teremtés oszlopainak” nevezett csillagkeletkezési helyről készült felvételsorozat.

### 3. Ember a világűrben

Az űrtevékenység másik látványos területe az emberes űrrepülés. Jelentőségéről, tudományos eredményeiről és azok elérésének hatékonyságáról, valamint a más területekhez képest aránytalanul nagy ráfordításokról és azok lehetséges megtérüléséről hosszan lehet vitázni. Ehelyütt azonban nem tesszük, inkább megállapítjuk, hogy az emberes űrrepülés eseményei azok, amelyek még ma is a sajtóban és a közvélemény figyelmében a legnagyobb teret kapják, aminek következtében az űrtevékenységet sokan tévesen az űrrepülés-sel, űrhajózással azonosítják.

Az emberes űrrepülések története csaknem egyidős az űrtevékenységével, hiszen három és fél évvel az első műhold indítása után már az első ember is feljutott a világűrbe. Azóta is Jurij Gagarin mondhatja magának minden idők legrövidebb űrrepülését, hiszen történelmi jelentőségű útja során mindössze egyszer kerülte meg a Földet.

Azóta mintegy 30 nemzet több mint 450 űrhajósa járt hosszabb-rövidebb ideig a világűrben (furcsa, hogy még az országok számát is nehéz pontosan megadni, de gondoljunk csak államok utóbbi fél évszázad alatt bekövetkezett jelentős átrendeződéséről, nem is beszélve a születési hely, állampolgárság, felbocsátó állam és haza fogalmainak bonyolult útvesztőjéről). Kétharmaduk amerikai, negyedük szovjet/orosz és csak a megmaradó kis részen osztozik az összes többi ország. Tény továbbá, hogy az űrhajósok sorában két hazánkfia is szerepel, bár a történelem és a technikai lehetőségek változásának következtében alapvetően eltérő konstrukcióban jutottak fel a világűrbe.

Az űrhajósok jó része többször is járt a világűrben, ami ésszerű lépés, hiszen így optimalizálható az űrhajósok kiképzésére fordított nem csekély összeg. Ketten hétszer, hatan pedig hatszor repültek, utóbbiak egyike az abszolút időtartamrekorder, aki hat repülése során több mint 800 napot, azaz bő két évet töltött súlytalanságban. Fontos megemlíteni, hogy mindeddig csak három államnak sikerült „önerőből” saját űrhajósát a világűrbe juttatnia, a Szovjetunióknak/Oroszországnak, az Egyesült Államoknak és Kínának. Az összes többi nem-

zet űrhajósa valamilyen nemzetközi program keretében hajtotta végre űrrepülését.

Az emberes űrrepülés csúcspontját vitathatatlanul a Hold meghódítása jelentette. Az Apollo-programban résztvevő űrhajósok ezerszer messzebbre távolodtak el a Földtől, mint a bolygónk körül, néhány száz kilométer magasban keringő űreszközök fedélzetén dolgozó társaik. Hat repülés során tizenketten a Holdra léphettek, a küldetések résztvevői csaknem 400 kg kőzetmintát hoztak a Földre, amelynek tudományos feldolgozása azóta is folyik. Bár az Apollo-program nem mondható tudományos indíttatásúnak, sokkal inkább a hidegháború és az akkori nagyhatalmak közötti kíméletlen verseny motiválta, mégis tudományos eredményei hozzájárultak a Hold belső szerkezetének és múltjának, ezen keresztül pedig az egész Naprendszer történetének alaposabb megismeréséhez. Mindez az emberes űrrepülések első évtizedében történt, azóta az emberekkel végrehajtott űrprogramok ismét a Föld körüli pályára szorítottak.



Itt a programok legjelentősebb vonása az űrállomások megjelenése. Évtizedünk meghatározó programja a Nemzetközi Űrállomás (ISS) építése. Bár a program a tervezetthez képest jelentős késésben van, érdemes hangsúlyozni valóban nemzetközi jellegét. Ez egyúttal napjaink űrkutatásának fő jellemzője is, a korábbi verseny helyére a rivalizálástól természetesen nem mentes együttműködés lépett, ami az ISS programot jelképes értékűvé teszi.

#### 4. Barátaink, a műholdak

Mint korábban említettük, a világ űrtevékenységében – cikkünkkel ellentétben – csak kisebb súllyal szerepel a tudományos kutatás. Melyek hát azok a területek, amelyek a mindennapi életben a legtöbbet adták és adják az emberiségnek? Nos, kétségtelenül az űrtevékenység roppant szerteágazó gyakorlati alkalmazásai. Cikkünk

terjedelme nem teszi lehetővé még a legfontosabb területek bemutatását sem, ezért csak néhány példát említnék.

Messze a legelterjedtebbek a távközlési műholdak. Ma már több száz dolgozik folyamatosan a Föld körül, praktikus okokból szinte kivétel nélkül a geoszinkron pályán (a 36 ezer km magasan az Egyenlítő fölött keringő műhold éppen együtt mozog a Földdel, így adásukat fix helyzetű antennával vehető). Egy részük az interkontinentális távközlési forgalmat bonyolítja le, de külön műholdcsalád gondoskodik a tengerhajózás távközlési igényeinek kielégítéséről. Mindamelllett, az átlagember azonban inkább a közvetlen műsorszóró műholdak adásával találkozik. Ha működnek, tudomást sem veszünk róluk, ám valamelyik kiesése azonnal tévénezők millióinak tűnne fel.

A távközléssel némileg rokon terület a műholdas navigáció. A rendszer néhány tucat műholdból áll, hogy a Föld bármely pontjáról nézve bármely pillanatban legalább három a látóhatár fölött tartózkodjék (az amerikai GPS már csaknem három évtizede működik, az Európai Unió most dolgozik saját műholdas navigációs rendszerre kiépítésén). A megfelelő vevőberendezés a műholdak adásait fogja, és azokból azonnal kiszámítja a vevő pontos földrajzi helyét. Teszi ezt néhányszor tíz méteres pontossággal, de (műholdas vagy földi) kiegészítő rendszerek alkalmazásával a pontosság néhány centiméterre növelhető. Ma már egyre több személyautónak is tartozéka az úti cél elérését nagyban megkönnyítő „GPS-vevő”. Az Európai Unió derűlátó becslése szerint 2020-ra a műholdas navigációs rendszereknek nem kevesebb, mint 3 milliárd felhasználója lesz, elsősorban annak köszönhetően, hogy addigra várhatóan a mobiltelefonokba beépül a navigációs vevő, aminek például a segélyhívások esetén óriási a jelentősége.

A műholdas navigáció évtizedek óta működő alkalmazása a Koszpasz-Sarsat rendszer. Jeladója nemcsak hajókra, repülőgépekre szerelhető fel, hanem túrázók is magukkal vihetik. Szerencsétlenség esetén elég bekapcsolni a jeladót, és a fölttte elrepülő, a rendszerhez tartozó műholdak azonosítják a segélykérő helyét és riasztják a mentőegységeket. A rendszer működésének kezdete, 1982 óta több, mint 5000 riasztás történt, melyek során a műholdas mentőrendszer mintegy 20 ezer ember életének a megmentéséhez nyújtott hatékony segítséget.

A mindennapjainkhoz legközelebb álló másik terület a meteorológia. Az időjárás műholdak felvételei jelentős mértékben hozzájárulnak az előrejelzések pontosabbá tételéhez. Az Európai Űrügynökség 1978 óta 9 Meteosat műholdat fejlesztett ki, amelyek geoszinkron pályáról félóránként készítenek felvételeket a Föld felőlük forduló féltekéjéről. Nemcsak a látható fény tartományában, hanem az infravörösben és a vízgőz hullámhosszain is. Emellett a közelmúltban állt pályára az első európai, alacsony pályán keringő időjárás műhold is, a MetOp-A.

Nemcsak meteorológiai céllal fényképezik azonban a műholdak a Földet. A részletesebb felvételek a térké-

pészettől a mezőgazdaságon át a várostervezésig számtalan területen hasznosíthatóak. A klasszikus távérzékelő műholdak képein a 70-es években 70, illetve 30 méteres részletek voltak megkülönböztethetők. Akkoriban az ennél részletgazdagabb képek szigorú katonai titoknak számítottak. Ma már kereskedelmi forgalomban kaphatóak az 1 méternél kisebb felbontású képek, sőt, ezek egy része az interneten bárki számára hozzáférhető. Olyannyira, hogy egyes országok már kifejezetten aggályosnak találják, hogy számukra stratégiai fontosságú területeik részletes képét bárki megnézheti a világhálón. A felbontás növekedésének azonban a légkör zavaró hatása gátat szab.

Nagy segítséget jelentenek az űrfelvételek természeti katasztrófák esetén, Bizonyos típusú katasztrófák (például hurrikánok) esetén megkönnyítik az előrejelzést és a mentést, míg más típusú katasztrófáknál a kárfelmérést könnyítik meg. Ennek tudható be, hogy az ENSZ III. Világűrkonferenciája (1999, Bécs) ajánlására létrejött egy nemzetközi egyezmény – a Disasters Charter –, amelyhez a távérzékelő műholdakkal rendelkező országok, szervezetek csatlakoztak. Vállalták, hogy természeti katasztrófák esetén térítésmentesen előfeldolgozott űrfelvételeket juttatnak a bajba jutott ország hatóságai részére.

Minden idők legkomplexebb környezetvédelmi műholdja, az ESA Envisatja immár öt éve működik. Naponta 280 GB adatot továbbít a Földre, amelyek jelenleg 1200 projekthez szolgáltatnak nyersanyagot. Az Envisatnak és az ESA radarműholdjainak köszönhetően megállapították, hogy a globális felmelegedés következtében 1992 óta évente 3 mm-rel emelkedik a tengerek vízszintje és 0,1 fokkal a felszíni hőmérsékletük. Folyamatosan és az egész bolygóra kiterjedően nyomon követik a légszennyezettség alakulását, azonosítják a legsúlyosabban szennyező gócokat. Naponta követik a sarkvidéki jégablák és jéghegyek mozgását, valamint az Antarktisz borító jég fogyását. Megfigyelik a sarkvidékek fölötti ózonlyuk kiterjedését, továbbá rendszeresen megállapítják az óceánokban a klorofill mennyiségét.

Az Európai Űrügynökség programjai között is jelentős szerepet kapnak az alkalmazások. Az ESA költségvetésének 14,3-át fordítja a Föld megfigyelésére, 19,0%-át pedig távközlési és navigációs programokra. Az Európai Unió űrprogramjának két fő pillére az önálló műholdas navigációs rendszer kifejlesztése (Galileo), illetve a műholdas távérzékelés környezeti és biztonsági alkalmazása (GMES).

Ugyanakkor az alkalmazások rendkívül fontosak a fejlődő országok számára. Közülük a legjelentősebb, világviszonylatban is tekintélyes űrprogramot India mondhatja magáénak, akik saját hordozórakétáikkal csaknem évente állítanak újabb műholdakat Föld körüli pályára. Ezek szinte kivétel nélkül az alkalmazásokat szolgálják, főként távérzékelő és távközlési műholdakról van szó. A kisebb fejlődő országok közül több bocsátott már fel saját műholdat, vagy tervez ilyent. Jónéhány fejlődő ország vezetői ismerték már fel, hogy az űrtevé-

kenység nem a kutatók öncélú kedvtelése, hanem az ország felzárkózását lehetővé tevő fontos ágazat. Nem véletlen, hogy az ENSZ Világűrbizottságának munkájában 69 nemzet vesz részt, közöttük sok fejlődő ország is.

## 5. Magyarország űrtevékenysége

A világ űrköltségvetése mintegy évi 50-60 milliárd dollárra becsülhető. Ennek harmadát az USA civil űrköltségvetése (lényegében a NASA tevékenysége) teszi ki, másik harmada az amerikai katonai űrköltségvetés, miközben a harmadik harmadot adja a világ összes többi országa együttevve. Az Európai Űrügynökség évente közel 3 milliárd eurót fordít űrtevékenységre. Emellett az ESA tagországai jelentős összeget fordítanak nemzeti – az ESA-tól független – űrprogramjaira.

De valóban jelentősek ezek az összegek? Mennyire megterhelő az európai adófizetők pénztárcájára az Ariane rakéták kifejlesztésétől az Envisat üzemeltetésén át a Mars Expressig vagy a Titánra leszálló Huygens szondáig ívelő, nagyszabású űrprogram? Az európai viszonylatban űrnagy hatalomnak számító Franciaország nemzeti jövedelmének alig több mint 1 ezrelékét fordítja űrkutatásra, ami a francia polgárnak évente körülbelül 40-50 euró kiadást jelent. Egy közepes színházjegy vagy egy szebb könyv ára. A németeknél az utóbbi szám 10 euró alatt marad, Ausztriában pedig 5 euró körül lehet. Három villamosjegy vagy három gombóc fagyalt ára Bécsben. És nálunk? A magyar űrköltségvetés 2-2,5 millió eurónak felel meg, ami fejenként és évente 20-25 centet jelent. Erőnket megfontoltan koncentrálna azonban mégis sikerül néhány területen ott lennünk a világ élvonalában.

A hazai témapályázatokra fordítható keret az elmúlt tíz évben 200 millió Ft nagyságrendjébe esett. Maximumát 2004-2005-ben érte el (220 millió Ft), azóta nominálisan 27%-kal csökkent, jelenleg 160 millió Ft évente. Ebből általában 20-25 kutatóhely 35-45 pályázatát tudjuk támogatni.

Az ESA programokba (lásd később) befizetett magyar hozzájárulás döntő része (jellemzően 93%) a megkötött szerződések alapján visszajön a magyar kutatóhelyekhez, cégekhez. A PRODEX programhoz 1998-2003 között összesen mintegy 3,5 millió euró volt a magyar hozzájárulás, a PECS programba 2003 és 2007 között összesen 5,5 millió eurót fizettünk be. 2008-ban sikerült évi 1,0-1,15 milliós hozzájárulásunkat közel 2 millió euróra növelni.

Jelentős többletforrást biztosíthat a magyar űrkutatás számára az EU K+F Keretprogramjában való részvétel, ezen a területen azonban még nem sikerült a lehetőségeket maradéktalanul kihasználni. 2007-ben az FP7 első fordulójában 4 magyar intézet 4 pályázatával összesen 0,5 millió eurót szerzett (a pályázatok több éves lefutásúak). Magyarország 2009. január 1-jével csatlakozik az EUMETSAT európai műhold-meteorológiai szervezethez, ami újabb lehetőségeket teremthet a magyar űrpar számára.



A szakmai munka hagyományosan körülbelül 25-30 kutatóhelyen folyik, mintegy 200-250 szakember részvételével. A kutatóhelyek egy része MTA Intézetekhez, más része egyetemi tanszékekhez, illetve egyéb intézményekhez tartozik. Az 1990-es évek óta fokozatosan erősödik az űripar, 9-10 cég közvetlenül vesz részt a munkákban (PECS és hazai pályázatok), további 20-50 céget potenciális résztvevőnek tekinthetünk. 2007-ben megalakult az űripari cégeket tömörítő Magyar Űripari Klaszter. Kutatóink és mérnökeink sikerrel kapcsolódnak be az ESA programjaiba, noha még nem vagyunk az Európai Űrügynökség tagja, csak együttműködő állama – Csehország, Románia és Lengyelország társaságában. A teljes jogú tagság eléréséhez űrköltségvetésünk közel megtízszerezésére lenne szükség, vagyis legalább meg kellene közelítenünk a legkisebb nyugat-európai országok szintjét.

Nemzetközi kapcsolatainkat tekintve a magyar űrkutatás legfontosabb nemzetközi partnere az Európai Űrügynökség (ESA, European Space Agency). Az ESA 1991. áprilisban írt alá Magyarországgal általános együttműködési egyezményt. 1998 januárjában csatlakoztunk az ESA PRODEX programjához, amelynek keretében 5 év alatt 13 szerződés keretében 8 ESA programban vett részt mintegy 170 magyar szakember. 2003-ban csatlakoztunk az újonnan létrehozott PECS programhoz, amelynek keretében 5 év alatt 37 szerződést kötöttünk, elsősorban űrfizika, mikrogravitáció és földmegfigyelés témákban. Jelenleg folyik a PECS Egyezmény újabb 5 évre történő meghosszabbítása.

Célunk az ESA tagság, erre vonatkozóan először 1999-ben, majd 2007-ben kezdődtek hivatalos tárgyalások, egyelőre eredmény nélkül. Az eddigi magyar szakmai eredmények alapján az ESA készen áll Magyarország befogadására. Megfigyelőként részt vehetünk az ESA Miniszteri Tanács ülésein, valamint az ESA Nemzetközi Kapcsolatok Bizottsága munkájában. 2007-ben alakult meg az ESA PECS Bizottsága, amely a MŰI igazgatóját választotta első elnökévé. ESA kapcsolatait tekintve Magyarország úttörő szerepet játszott a térség országai között, elsőként kötöttünk általános együttműködési egyezményt, elsőként csatlakoztunk a PRODEX és a PECS programokhoz. A teljes jogú tagságot azonban nem Magyarország éri el elsőként, mivel Csehország várhatóan 2009. január 1-jével csatlakozik.

Hazánk az ENSZ Világűr-bizottsága (UN COPUOS) alapító tagja. A Bizottságban és két Albizottságában (Tudományos-Technikai és Jogi) a MŰI látja el a képviselői szerepét. 2006-2008 között a MŰI igazgatója a Világűr-bizottság első alelnöke.

## 6. Szakmai eredmények

A hazai szakmai munka fő területei a Föld a világűrből, az űrfizika, az űrélettan és a műholdas technika, technológia. Kiemelt jelentőségű az űrkutatási eredmények gyakorlati hasznosítása és a fedélzeti kísérletek építése.

Az EU űrtevékenységének három fő területe van, az űrpolitika, a GMES (műholdas távérzékelés a környezet és a biztonság szolgálatában) és a Galileo műholdas navigációs program. Kisebb részben űrfizikai kutatásokat is támogat az EU. A 2007-ben kezdődött FP7 K+F keretprogram első űrkutatási pályázatán különösen az űrfizikai területen szerepeltek jól a magyarok.

Az ESA tevékenységébe a következő területeken kapcsolódunk be: űrtudományok (18 PECS pályázat, 5 éves átlagban 48%-os részesedés a finanszírozásból), mikrogravitációs kutatások (14 pályázat, 37%), földmegfigyelés (2 pályázat, 7%) és űrtechnológia (3 pályázat, 8%). Nem veszünk részt az emberes űrrepülés és a hordozórakéta-fejlesztés programokban.

A 90-es évek közepéig mintegy 50 magyar berendezés és kisebb eszköz jutott a világűrbe különböző országok űreszközei fedélzetén. Az 1990-es évek közepe óta a sorozat folytatódott.

Több mint egy évtizedig azonban a Pille dózismérő volt az egyetlen, az űrben repülő magyar eszköz. 1995-96-ban az EuroMir kísérletben fél évig, 1997-ben a NASA Mir kísérletben 5 hónapig használták az orosz Mir űrállomáson. A NASA 2001-ben vitt fel egy Pillét a Nemzetközi Űrállomásra, amellyel 4 hónapig tudományos kísérleteket folytattak. Az oroszok 2003 nyarán a Zvezda modulba telepítettek egy Pillét, amelyik a szolgálati rendszer része, az űrhajósok folyamatosan ellenőrzik sugárterhelésüket, 2003 óta a műszerrel több mint 10 ezer mérést végeztek. Ezzel mért űrrepülése során Simonyi Károly is.

A KFKI AEKI orosz és ESA együttműködésben egyéb dozimetriai fedélzeti programokban is részt vett, így a Biopan-5 és -6 bioszputnyikokra sugármérő detektorokat készítettek, a Matriszka és a Bradoz-6 kísérletben az űrállomáson az űrhajóst érő sugárterhelést vizsgálták.

A KFKI RMKI, a KFKI AEKI és a BME SZHT részt vett az ESA Rosetta üstökös-kutató űrszonda elkészítésében (leszállóegység tápegysége, fedélzeti számítógépe és három tudományos műszer). A szonda 2005-ben indult, az üstökösöt 2014-ben éri el.

Az ELTE GT és a BL Electronics Kft. által készített SAS-2 műszer orosz-ukrán-magyar együttműködésben 2006-07-ben a Kompas-2 orosz tudományos műhold fedélzetén dolgozott. Ugyanez a két csoport, valamint a KFKI RMKI bekapcsolódott az ESA BepiColombo, a Merkúr kutató, 2010 után induló űrszondája egyik műszerének építésébe. A két kutatóhely (ELTE GT és KFKI RMKI) két céggel együtt (BL Electronics Kft. és SGF Kft.) plazma-hullám kísérletet készít a Nemzetközi Űrállomás fedélzetére (Obszhanovka).

A KFKI RMKI földi ellenőrző berendezéseket és kalibráló rendszereket épített a NASA 1997-ben indított Cassini űrszondája két tudományos műszeréhez. A szonda 2004 óta vizsgálja a Szaturnuszt. A KFKI RMKI kutatói bekapcsolódtak az ESA Venus Express (2005-2009) és a NASA Stereo (2006-2008) küldetéseibe.

A hazai űrtevékenység másik súlyponti területe – a fedélzeti berendezések építése mellett – az űrtechnika

eredményeinek gyakorlati alkalmazása, hasznosítása. Ez a távközlés és a meteorológia területén mindennapos gyakorlat, ezért a hazai űrtevékenységben egyes meteorológiai K+F munkák támogatásán kívül nem jelentkezik.

Az 1990-es években a Földmérési és Távérzékelési Intézet (FÖMI) OMFB-FVM-MŰI támogatással végrehajtotta a nagyszabású termésbecslési és növénymonitoring programját. Ennek eredményeképpen 1996-2003 között operatív termés-előrejelző szolgáltatást nyújtottak az FVM-nek. A program „mellékterméke” az árvízi helyzet felmérése űrfelvételek alapján, amelyet több tiszai árvíz esetén bocsátottak az illetékes hatóságok rendelkezésére.

A 90-es években a FÖMI elvégezte az EU CORINE felszínborítási programjának részeként Magyarország teljes területére a felszínborítottság felmérését. Részt vettek a módszerek korszerűsítésében és 2003 óta a FÖMI TK irányítja az egész EU-ban a CORINE felújítási programot.

Az elmúlt évtizedben a műholdas technika alkalmazásának világviszonylatban legdinamikusabban fejlődő területe a műholdas navigáció volt. Hazánkban 1996-tól lépésenként kiépült a műholdas navigáció pontosságát fokozó permanens GPS állomások hálózata. 2002-től regionális együttműködésben elkezdett kiépülni az egységes követelmények szerint dolgozó EUPOS hálózat. Kívánatos lett volna a teljes hazai rendszer egy lépésben történő kiépítése, ami az IHM és MŰI támogatás ellenére sem sikerült. A FÖMI önerőből, kis lépésekkel folytatja a rendszer kiépítését, de az még nem teljesíti az egész országra az EUPOS normákat.

Jelentős sikert értünk el az EU 6. Keretprogramból finanszírozott SURE programban, amelynek célja, hogy a nem-ESA-tag, de EU-tag államok is lehetőséget kapjanak a Nemzetközi Űrállomáshoz kapcsolt európai Columbus űrmodulban történő kísérletek végrehajtására. Az ESA-hoz benyújtott 32 pályázat közül 9 érkezett Magyarországról. Az ESA a 11 legjobban szereplő pályázatban leírt kísérlet megvalósítását kívánja az EU 6. Keretprogramja terhére támogatni. A 11 nyertes pályázatból 4 magyar, s ezzel a magyarok szerepeltek a legjobban. A legjobb KKV és az űrfizika területén a legjobb minősítést szerzett pályázó egyaránt magyar: az Admatis Kft. Mindez számokkal ki nem fejezhető presztízs-növekedéshez vezethet a hazai űrkutatás nemzetközi, elsősorban ESA kapcsolatait tekintve.

A Miskolci Egyetemen világviszonylatban is jelentős, sokzónás kristályosító űrkemencét fejlesztettek ki a 90-es években. Eredetileg fedélzeti berendezésnek készült, a NASA több kísérletsorozatban is űrbeli használatra alkalmasnak nyilvánította, végül azonban egyoldalúan elállt ettől a szándékától. Földi alkalmazásokra azonban vásárolt a berendezésből. Az eszközt földi laboratóriumokban azóta is sikeresen használják.

Az ELTE-n 2001 óta korszerű műholdvevő üzemel, amely tudományos kutatási, oktatási és ismeretterjesztési célokat egyaránt sikerrel szolgál. Létesítését és működtetését a MŰI és az IHM anyagilag is támogatta.

Magyar egyetemisták két tudományos műszer és a műhold tápegységének elkészítésével részt vesznek az ESA irányításával épülő SSETI ESEO európai diák-műhold programban. Az ESEO indítása a tervek szerint legkésőbb 2011-ben várható.

Végül, de nem utolsósorban, a Magyar Űrkutatási Iroda igyekszik mindent megtenni a hazai űrtevékenység ismertségének és társadalmi elismertségének növelése érdekében. A hazai témapályázatok projektvezetőinek teljesítési feltételként előírtuk, hogy évente legalább két alkalommal népszerűsítő cikkben vagy sajtónyilatkozatban számoljanak be kutatásaikról. 1992 óta minden évben megrendezzük az Űrnapot, amely a hazai űrkutató szakma számára teremt beszámolási lehetőséget a szakma, a nagyközönség és különösen az egyetemisták számára. Fialat kutatók és egyetemisták számára 2000 óta évente Ifjúsági Fórumot rendezünk.

1992-től évente megjelent a Magyar Űrtevékenység évkönyv, két évente pedig a Space Activities in Hungary beszámoló kiadvány. A sorozat 2005-ben a MŰI beszüntült személyi kapacitása és korlátozott anyagi lehetőségei miatt megszakadt. 2003 óta üzemeltetjük a MŰI honlapját, amelyen folyamatos tájékoztatást adunk a hazai űrkutatás eseményeiről, eredményeiről.

2001-ben a MŰI anyagi támogatásával és szakmai irányításával jelent meg a Természet Világa Űrkutatás különszáma. Egy hasonló kiadvány előkészítése jelenleg is folyik. Nemzetközi együttműködésben 2006-ban megjelentettük az Iskolai Űratlasz magyar nyelvű változatát, 2007-ben pedig a Magyarországot bemutató kiemelt kötetét. Az Atlaszt földrajztanároknak adtuk ki véleményezésre.

A hazai űrtevékenység további eredményeire, eseményeire vonatkozóan ezúton ajánljuk az olvasó szíves figyelmébe a Magyar Űrkutatási Iroda honlapját ([www.hso.hu](http://www.hso.hu)), illetve „Űrtevékenység Magyarországon” című évkönyvét.

## A szerzőről

**Both Előd** fizikus, csillagász, 1997 óta a Magyar Űrkutatási Iroda igazgatója. Irányítja és koordinálja a hazai űrkutatási munkát, a magyar űrkutatás nemzetközi képviselését, valamint az Európai Űrügynökséggel fennálló kapcsolatokat. Jelenleg az ENSZ Világűrbizottságának (COPUOS) első alelnöke és az Európai Űrügynökség Európai Együttműködő Államok (PECS) Bizottságának elnöke. A Nemzetközi Asztronautikai Akadémia rendes tagja, a Természet Világa szerkesztőbizottságának tagja, a Magyar Asztronautikai Társaság alelnöke. Több mint 40 csillagászati, űrkutatási, földtudományi, fizikai, tudományelméleti, tudományfilozófiai könyvet fordított magyarra. Kiterjedt szóbeli és írásos ismeretterjesztő tevékenységet folytat, számtalan cikket írt és fordított különböző ismeretterjesztő folyóiratok számára.

# Űrkutatás és asztrobiológia

RONTÓ GYÖRGYI, BÉRCES ATTILA

MTA-SE Biofizikai Kutatólaboratórium  
berces@puskin.sote.hu

Lektorált

**Kulcsszavak:** szimulációs kamrák, UV-sugárzás, napspektrum, nukleinsav UV sérülése, ISS

A szerzők az asztrobiológia tudományát az űrkutatás egyik újonnan kifejlődött ágaként mutatják be, amely a földi élet keletkezésének feltételeit, lehetőségét és a biológiai rendszereknek az Univerzum más részében való fellelhetőségét igyekszik felderíteni. A kísérletes vizsgálatok többféle megközelítést alkalmaznak: földi modelleket, illetve szimulációs kamrákat, valamint a világűr bizonyos részein *in situ* vizsgálatokat végeznek. A közleményben a szerzők bemutatják a T7 bakteriofágot és az uracil molekulát, mint egyszerű biológiai rendszereket, amik vizsgálataik objektumai. Az objektumokon egy földi szimulációs kísérletsorozat eredményeiről számolnak be a marsi UV sugárzásnak az uracil molekulára kifejtett hatásáról, továbbá azoknak a kísérleteknek az előkészületeiről, amiket a közeljövőben a Nemzetközi Űrállomáson (ISS) kívánnak elvégezni.

## 1. Bevezetés

Az 1946. év eleje nagy fordulatot jelentett a második világháború nehézségeit alig-alig kiheverő emberiség történetében: de Witt USA-beli és Bay Zoltán, magyar kutató bejelentette, hogy radarhullámok segítségével sikerült kapcsolatot teremteniük a Holddal. De Witt január 10-én, Bay Zoltán pedig tőle függetlenül február 6-án tette meg a bejelentést. Ez az esemény az emberiség számára azt bizonyította, hogy a megismerés experimentális lehetőségei túlnyúlnak a Föld határain [1].

És a kutatás itt nem állt meg, a 20. század technikai fejlődése ugyanis lehetővé tette, hogy az ember elhagyhassa a földgolyót és részben Föld körüli pályán tegyen utazást, részben pedig – ha csak rövid időre is – másik égitestre tegye a lábát, miközben közelebbi és távolabbi környezetünket űrteleszkóp, műholdak, telespektroszkópia, vagy a Naprendszer kiválasztott bolygóra küldött robotok segítségével vizsgálja. A 21. század kezdetére az ismert világ egyre tágult és egyre növekvő tudásunk birtokában egyre sürgetőbbé válik több, válaszra váró kérdés: egyedül vagyunk-e az Univerzumban? A Naprendszerben, vagy azon kívül is találhatóunk-e életet? Hogyan keletkezett az élet a Földön és áttelepülhet-e az élővilág egyik bolygóról a másikra?

Az űrkutatással kapcsolatos ismereteink alapján ma még nem tudunk pontos választ adni arra a kérdésre [2], hogy vajon az élet egy kitüntetett helyen, közvetlenül (és kizárólagosan) a Földön jött-e létre, vagy pedig az univerzumban egy (vagy esetleg több) másik égitesten is keletkezett, esetleg éppen most van kialakulóban? Elképzelhető az is, hogy a Földön most található élő rendszerek elődei a világűrön keresztül, hosszú utazás után érkeztek a Földre. Az „élet” ebben az esetben általában igen egyszerű biológiai rendszereket, többnyire mikroorganizmusokat (például baktériumokat, spórákat, algákat) jelent, és csak kevésbé kell bonyolultabb élőlényekre gondolnunk.

A legegyszerűbb biológiai rendszerek kialakulásához, létezéséhez is több feltételnek kell teljesülnie: elengedhetetlennek látszik a víz (elsősorban folyékony halmazállapotban), valamint bizonyos, a biológiai rendszert felépítő anyagok (szén, nitrogén, oxigén, hidrogén, kén stb.) jelenléte a környezetben, ezen felül szükséges még az élethez megfelelő hőmérséklet és elegendő energia is, amely különböző forrásokból származhat. Ugyancsak fontos az élő rendszert körülvevő stabil külső környezet, ami védelmet biztosít a kozmikus eredetű részecske-, valamint elektromágneses sugárzások ellen. Az űrkutatás által életre hívott asztrobiológia tudománya tűzi ki azt a célt maga elé, hogy feltárja a különféle bolygókon uralkodó viszonyokat, vizsgálja az élet feltételeit és igyekszik a bolygókon felderíteni az élet esetleg rejtett jeleit.

Az élet kialakulását, illetve létezését, az életfeltételek határait kétféle rendszerben, nevezetesen *földi modelleken*, és *in situ* körülmények között tanulmányozzák. A földi modellek rendszerint extrém környezeti adottságokkal rendelkező természetes földrajzi helyek, mint például az Északi-, vagy a Déli-sark jéghegyei, szikláik, sóbányák mélye, vagy pedig mesterséges, úgynevezett *szimulációs kamrák*. Az előbbi kutatások a zord éghajlati, illetve környezeti viszonyok helyszínén élő mikroorganizmusokat célozzák meg, míg a szimulációs kamrákban alkalmasan kiválasztott kísérleti mintákon (ismét többnyire mikroorganizmusokon) egy vagy több (kombinált) környezeti paraméternek az élőrendszerekre gyakorolt tartós, jól definiált hatását vizsgálják. A vizsgálódás arra irányul, hogy a külső (esetleg zord) feltételek milyen mértékben befolyásolhatják az élet lehetőségeit.

Az *in situ* kutatások a naprendszeren belüli és azon kívüli kiválasztott égitesteken, illetve a világűr bizonyos részein zajlanak. A kiválasztást a bolygók tulajdonságaira vonatkozó elméleti megfontolások, valamint korábbi megfigyelések eredményeire alapozzák. A kísérleti kutatások az élet környezeti feltételeinek feltárását,

valamint az élet jelenlegi, vagy múltbeli jelenlétére utaló jeleinek kimutatását célozzák. Egy-egy ilyen expedíció (in situ kísérlet) megszervezése, eszköztárának optimális kialakítása komoly stratégiai feladat, nem is szólva az óriási költségekről, valamint arról, hogy váratlan nehézségek miatt a kísérlet meghiúsulhat.

Az asztrobiológia iránti kiemelt érdeklődést mutatja, hogy a legutóbbi időkben számos kutatás indult el, illetve indul el a Mars (pl. Mars Rover, Mars Express), a Venus (Venus Express), a Titan (Huygens), mint az élet lehetséges színhelyeinek tanulmányozására, és már elkészült az ESA következő 10 éves, a 2015-2025 évekre szóló kutatási koncepciója (Cosmic Vision). E hosszú távú kutatási program keretében a Naprendszeren kívüli bolygókra is figyelmet kívánnak fordítani, és pedig azoknak a bolygóknak a feltárását tekintik az egyik kulcskérdésnek, amiken az elvi számítások alapján az életfeltételek adottak lehetnek [3].

A következő szakaszokban áttekintést nyújtunk saját kutatásainkról, nevezetesen egy szimulációs és egy jelenleg előkészítés alatt álló in situ kutatásról.

## 2. Földi szimuláció

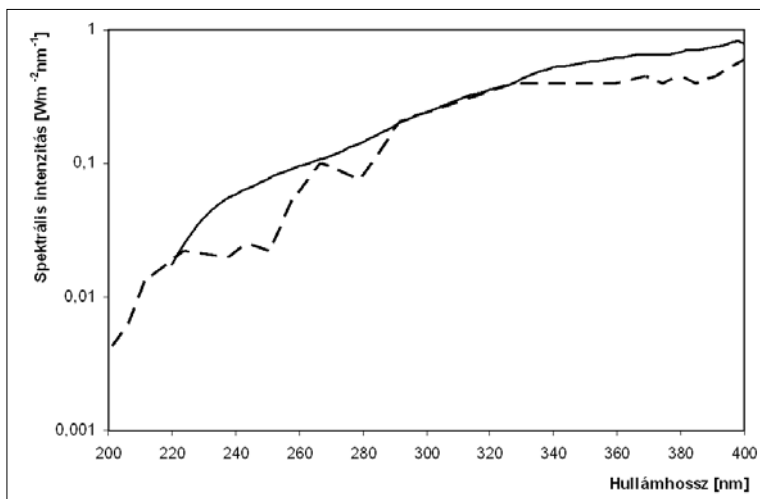
Először a szimulációs kutatássorozatot mutatjuk be. Általánosan ismert, hogy az ultraibolya (UV) sugárzás a kémiai, biokémiai folyamatok stimulálásában, valamint az élővilág evolúciójában is döntő szerepet játszott, illetve játszik. Az ultraibolya sugárzás a 400 nm-nél rövidebb hullámhosszúságú elektromágneses sugárakat jelenti, amely naprendszerünkben a Nap sugárzásából származik. Az UV sugárzást a hullámhosszak szerint több tartományra osztjuk, ezt mutatjuk be az 1. ábrán.

Az UV sugárzás különböző tartományairól közismert, hogy az élet szempontjából fontos biológiai makromolekulákra (nukleinsavak, fe-

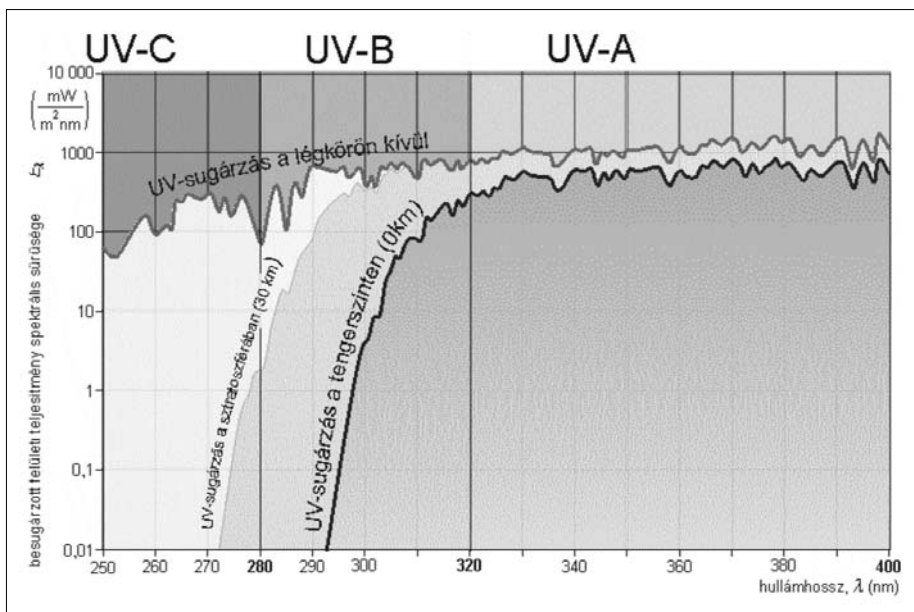
hérjék, membránok) nézve elsősorban nem csak stimuláló, hanem károsító hatást is kifejthetnek [4].

Földi körülmények között a légkör oxigén-, valamint ózontartalma, sőt további légköri komponensek, mint a kéndioxid, aeroszok jelentős mértékben védik az élő világot a káros sugaraktól. Az UV tartománynak a 280-290 nm-nél rövidebb hullámhosszúságú sugarairól van szó. Tehát a földi légkörön kívül található élő rendszerek esetében ezeknek az UV komponenseknek a biológiai hatásával is számolni kell. Ez a helyzet a világűrön keresztül, egyik bolygóról a másikra megvalósuló élőanyag-transzport, valamint például a Marson esetleg előforduló, jelenlegi élő, vagy valamikori élő rendszerek esetében. A kérdés tehát úgy merül fel, hogy egy adott élő rendszer milyen esélyekkel éli túl a sugárzás hatását egy olyan UV sugárforrás mellett, amely 280 nm-nél rövidebb hullámhosszúságú sugárzást is kisugároz. A kérdés megközelítésére a Mars felszínén uralkodó sugárzási viszonyoknak megfelelő, speciális fényforrást konstruáltunk, és azt használtuk fel kísérleteinkhez [5].

A lámpa emissziós spektrumát a 2. ábra mutatja, amiből kitűnik, hogy a sugárzási térben a legrövidebb hullámhosszúságú sugárzás 200 nm. Ez a spektrum meg-



2. ábra  
A marsi UV spektrum szimulációja  
szaggatott vonal =  
elméleti számítások,  
folytonos vonal =  
lámpa mérése szerinti spektruma



1. ábra  
A napsugárzás UV spektruma:  
UV-A: 320-400 nm,  
UV-B: 280-320 nm,  
UV-C: 280 nm alatt  
(a három görbe az UV sugárzást  
a tengerszinten, a sztratoszférában  
és a légkörön kívül ábrázolja)

felel a Marson uralkodó sugárzási viszonyoknak, ahol az egyedüli fényforrás a napból származik. A napsugárzás a világűrön keresztül a Mars légkörén át (amelynek döntő fontosságú alkotórésze a 7 mbar nyomású széndioxid) lép a bolygó felszínére, de az igen vékony gázrétegen keresztül a sugárzás összetétele kevésbé változik.

A szimulációs kísérlet azt jelenti, hogy az adott összetételű UV sugárzás, mint egy kiválasztott környezeti paraméter (adott esetben az UV fény) hatásának biológiai következményeit tanulmányozzuk.

### 3. Kísérleti minták

Kísérleti biológiai rendszerként – ahogyan azt említettük, – asztrobiológiai célokra gyakran használunk egyszerű biológiai objektumokat. Kutatásainkban két igen egyszerű mintát használtunk: T7 bakteriofágot és egy speciális nukleinsav-bázist, uracilt. A T7 fág egy igen jól ismert baktérium-vírus, amely egyetlen nukleinsav- és néhány fehérjemolekulából áll, az uracil molekula a nukleinsav egyik jellemző alkotórésze, a genetikai kód egy eleme. Ugyanezek az alkotóelemek fordulnak elő az élő sejtekben is, tehát a kísérleti minták relevanciája egyértelmű.

A 3. ábrán az említett két minta sematikus képét mutatjuk be. Kiemeljük a bemutatott objektumok mérete közti különbséget: egy T7 fág részecske – amely tulajdonképpen egy nukleoproteid óriásmolekula – átmérője a milliméter 6 milliomod része (60 nm), míg egy uracil molekula ennél jóval kisebb, a milliméternek körülbelül százmilliomod része.

A mintákat a kísérletekhez részben oldatok (kvarc küvettában), részben 16 mm átmérőjű kerek kvarclemzre rávitt vékonyrétegek formájában alkalmaztuk. A T7 fág rétegeket oldatukból centrifugálással ülepítettük a lemezre, az uracil rétegeket pedig vákuum-párolgatásos módszerrel állítottuk elő. A besugárzáshoz hasz-

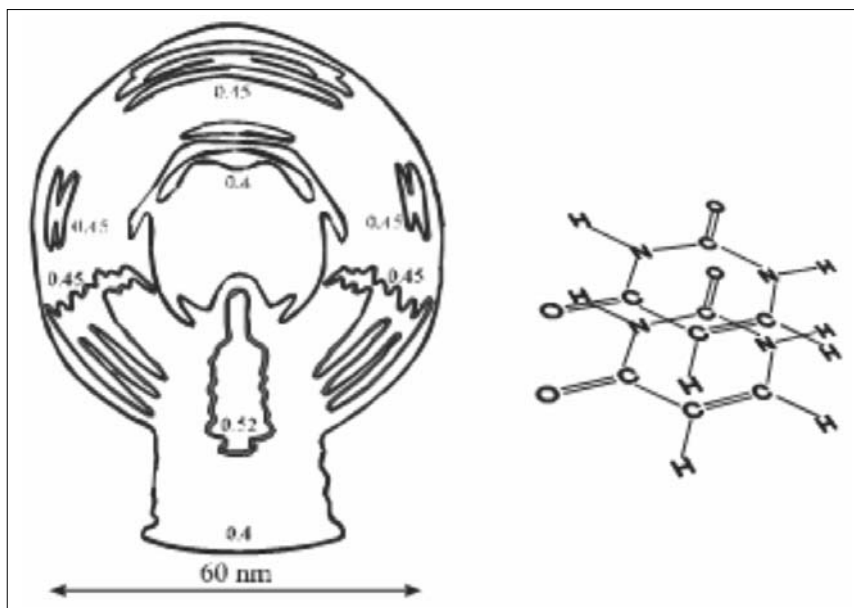
nált UV fényt (marsai UV szimulációs lámpa) – a szivárványhoz hasonlóan – felbontottuk 10 nm szélességű sávokra. A Marson uralkodó UV sugártérben a biológiai rendszerekre nézve különösen érdekes a 210 nm és a 340 nm közötti tartomány, mivel ezek a hullámhosszak földi körülmények között nincsenek jelen. A tartományt kilenc részre, sávokra osztottuk fel és minden egyes sávval a mintákat egyre növekvő mértékben sugároztuk be.

A besugárzás által okozott károsodást spektrofotométerrel, az uracil réteg jellemző elnyelésének változásával (csökkenésével) mutattuk ki (mértük). A tapasztalat szerint a változás mértéke az alkalmazott besugárzás nagyságával növekszik, azaz a jellegzetes elnyelés mértéke függ a rétegre beeső fény dózisától (energiatartalmától): a mért változás a beeső fény dózisának függvénye, ez az úgynevezett dózis-hatás függvény.

A nyert függvények (tehát összesen kilenc különböző függvény) analíziséből hullámhossz-tartományonként meghatároztuk az uracil molekula sérülési sebességét. A függvények analízise alapján kimutattuk, hogy a sérült uracil molekula a 210-260 nm-es hullámhossz-tartomány hatására vissza is alakul ép uracillá, tehát ha 210-260 nm közötti hullámhosszúságú UV sugarak is részt vesznek az uracilt tartalmazó rendszerek besugárzásában, akkor mind a sérülés létrejötte, mind pedig a visszaalakulása egyaránt bekövetkezhet és végülis az ép és sérült molekulák keletkezése és visszaalakulása között egyensúlyi állapot alakul ki.

### 4. Az EXPOSE/ROSE kísérlet

Előkészítés alatt álló in situ kutatásunk a nemzetközi összefogással működő EXPOSE-R berendezésben, a Nemzetközi Űrállomás (International Space Station; ISS) külső részén, a napokban telepített Columbus modulon kap majd helyet. A kiválasztott biológiai rendszerek elektromágneses (ultraibolya; UV) és kozmikus/ré-



3. ábra  
Kísérleti objektumaink:  
a T7 bakteriofág  
és a nukleinsav alkotórész uracil  
szerkezete sémásan

szecske sugárzásra adott válaszát, illetve a sugárzásokból elszenvedett dózist kívánjuk tanulmányozni. A Biofizikai Kutatólaboratórium a ROSE (Response of Organisms to the Space Environment) kutatási konzorcium tagjaként vesz részt a kísérletekben.

A kísérlet jelenleg abban a fázisban van, amikor az összes szükséges előzetes vizsgálat (Experiment Verification Test; EVT 1-4, valamint az Experiment Sequence Test; EST) már sikerrel megtörtént és megvan a minták elrendezésének, a besugárzó berendezésen való akkomodációjának a terve is. A következő lépés a minták előkészítése lesz a Nemzetközi Űrállomásra történő szállításra. A minták expozíciója a Nemzetközi Űrállomáson már in situ kísérlet lesz, azonban az előkészületekben a DLR (Köln) földi szimulációs kamrájában vizsgáltuk meg azt, hogy a mintáink (T7 fág és uracil) milyen körülmények között használhatók fel a Föld körüli pályán, amihez a szimulációs kamrában a lehetséges kedvező környezeti feltételeket teremtettük meg.

Az 1. táblázat foglalja össze azokat a paramétereket, amik a Föld „közelében”, a világűrben uralkodó körülményeket jellemzik.

A Nemzetközi Űrállomás közel 300 km távolságban kering a Föld körül, azaz az űrállomás külső felületén elhelyezendő EXPOSE besugárzó berendezésre nézve a „Föld körüli pálya” adatai közelítőleg érvényesek. A táblázat adataiból kitűnik, hogy a környezeti feltételek bizony zordak, például a vákuum már itt is jelentős, különösen akkor, ha tekintetbe vesszük, hogy a légkört már csupán néhány száz tízmillió oxigén és néhány millió hélium atom képezi; összehasonlításképpen: a földi légkörben egyetlen köbcéntiméter levegőben néhány száz 10<sup>19</sup> molekula található. A külső sugárzásnak kiteendő mintákat tehát meg kell óvni a vákuum szívó hatásától. A probléma megoldására úgynevezett szendvicsmintát konstruáltunk, és laboratóriumunkban el is készítettük.

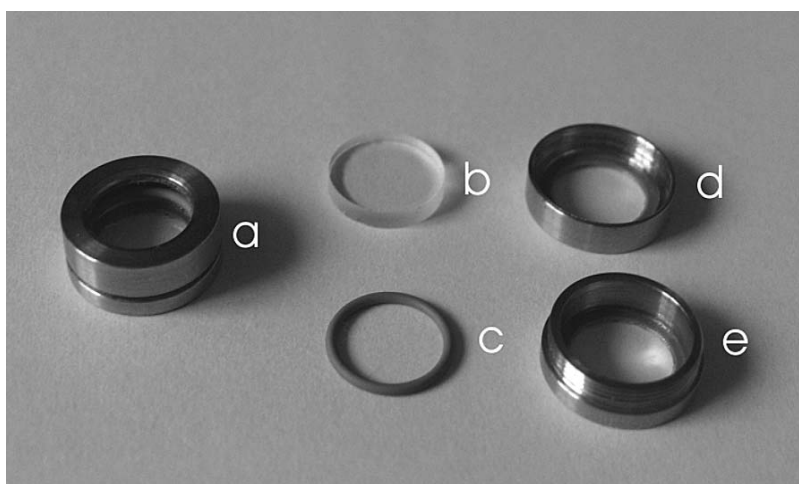
A mintatartó vázlatát a 4. ábra mutatja. A mintatartó lapos, korong alakú, 16 mm átmérőjű szelence, az alján

Paraméter	Föld körüli pálya, < 500 km
<b>Vákuum</b>	
Nyomás (Pa)	10 <sup>-6</sup> – 10 <sup>-4</sup>
Gázrészecskék/cm <sup>3</sup>	10 <sup>5</sup> H, 2x10 <sup>6</sup> He, 10 <sup>5</sup> N, 3x10 <sup>7</sup> O
<b>Nap elektromágneses sugárzása</b>	
Teljesítménysűrűség (W/m <sup>2</sup> )	1360
Spektrumtartomány (m)	kontinuus, 2x10 <sup>-12</sup> – 10 <sup>2</sup>
<b>Kozmikus sugárzás</b>	
Dózis (Gy/év)	0,1 – 3000
Hőmérséklet (K)	100 – 400

1. táblázat

kvarc, a tetején pedig kalciumfluorid lemezzel záródik. A kvarclemezen van a fág-, vagy uracil vékonyréteg, a kalciumfluorid fedőlemez pedig alkalmas arra, hogy az extraterresztriális napsugarak számára átjárható legyen. A zárás vákuumbiztos, és így lehetőség van arra, hogy a szelence belsejét bármilyen, például semleges (nem oxidáló) gázzal töltsük meg.

A DLR űrszimulációs kamrájában a ROSE konzorcium kísérletei részben azt vizsgálják, hogy a biológiai rendszerek milyen feltételek mellett maradnak életképesek, részben pedig a sugárzás és egyéb tényezők által létrehozott genetikai, biokémiai, fotokémiai változásokat tanulmányozzák. A konzorciumban a magyar rész a PUR (Phage and Uracil Response). Ennek keretében vizsgáljuk a különböző mértékben (százszorosán, tízezerszeresen, milliószorosán) gyengített extraterresztriális UV sugárzás hatására a T7 bakteriofágok életképességének a csökkenését, a T7 fág DNS-ében keletkező fotosérülések mennyiségét és minőségét, mind pedig kitüntetetten az uracil molekula fotosérülését. Az eddig nyert dózis-hatás függvények analízise alapján azt reméljük, hogy az extraterresztriális térben, a föld körüli pályán is kimutatható lesz a rövid hullámhosszúságú UV sugarak károsodást visszafordító hatása.



4. ábra  
A mintatartó és alkatrészeinek fotója

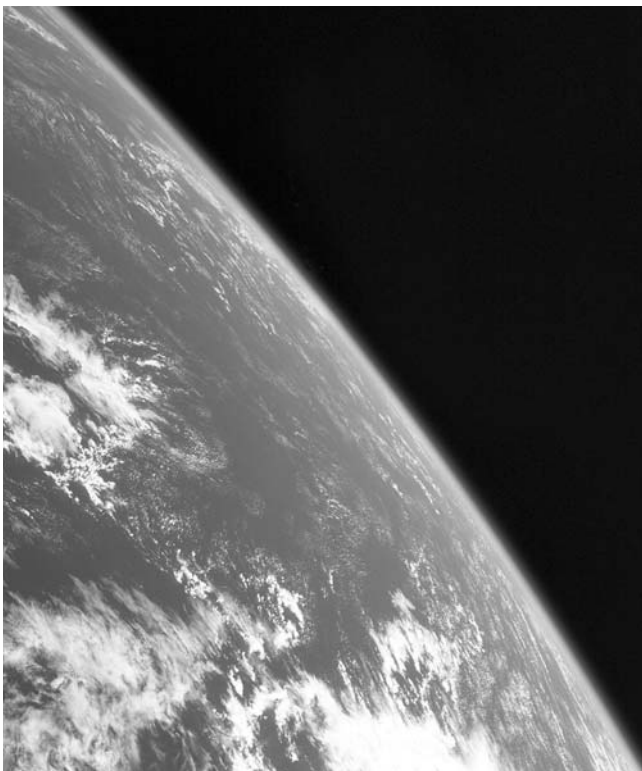
- a: Alkalmazásra kész mintatartó,  
b: kvarc, vagy fluorid ablak  
(kísérlettől függően),  
c: viton gyűrű,  
d, e: a mintatartó felső és alsó része,  
mindkettő rozsdamentes acélból

## 5. Összefoglalás

A bevezetőben felvetett kérdésekre ugyan nem várható az asztrobiológiától azonnali és teljes válasz, de az eddigi szimulációs eredmények alapján sem lehet kizárni az élő rendszerek átjutását a világűrön keresztül egyik bolygóról (egyik űreszközzel) a másikra. Valamely bolygó felszínéről elindult, és egy másik bolygó felé (esetleg meteoritban) tartó élő rendszert azonban számos környezeti tényező károsító hatása fenyegethet. E hatásokat Nicholson, Horneck és munkatársai [6] részletesen elemezték.

A szerzők elvi megfontolásai, valamint modelljeik alapján fennáll bizonyos valószínűsége annak, hogy – megfelelő körülmények között – a zord űrbeli feltételek ellenére is életképes biológiai rendszerek kerüljenek egyik bolygóról a másikra. Földi eredetű mikroorganizmusok egy része túlélheti az űrbeli tartózkodást, amihez az extraterresztriális napsugárzás rövid hullámhosszúságú komponenseinek károsítást visszafordító hatása is hozzájárulhat. Fennáll tehát annak a veszélye, hogy a Földről elindított űreszközök átvihetik a mikroorganizmusokat egy másik bolygóra, azaz fennáll annak a veszélye, hogy naprendszerünk, illetve az univerzum bármelyik étellel betelepíthető bolygóján idegen élővilág telepszik meg: a bolygó „fertőződik”. Ez a felismerés felhívja a figyelmet a bolygók védelme érdekében az űreszközök indítás előtti gondos sterilizálására.

Az előzőkből következik, hogy a világűrből esetlegesen bejutó idegen élő rendszerekkel szemben Földünk bioszférája is védelemre szorul, azaz a világűrből visszatérő eszközök, minták gondos kezelése legalább olyan fontos, mint a Földről indított eszközöké.



## A szerzőkről

**Rontó Györgyi** a Budapesti Orvostudományi Egyetemen szerzett általános orvosdoktori oklevelet. A biológiai tudomány doktora, Professor Emeritus. Korábbi munkahelyei a Semmelweis Orvostudományi Egyetem Biofizikai és Sugárbiológiai Intézete, az MTA TTKL Biofizikai Kutatólaboratóriuma és az MTA Biofizikai Kutatócsoportja voltak. Jelenleg a Semmelweis Egyetem Biofizikai és Sugárbiológiai Intézetében dolgozik. Kutatási témája a molekuláris és globális UV dozimetria kiterjesztése. Számos tudományos pályadíjat, kitüntetést nyert el, többek között a „SOTE Kiváló Kutató” címet, a Magyar Biofizikai Társaság díját, Apáczai Csere János Díjat.

**Bérces Attila** tanulmányait a Babes-Bolyai Tudományegyetem Fizika karán és az Eötvös Lóránd Tudományegyetem Fizika karán végezte. A Semmelweis Egyetemen szerzett Ph. D. fokozatot. Munkahelyei az MTA TTKL Biofizikai Kutató Laboratórium, az MTA-SE Biofizikai Kutatócsoportja. Jelenleg egyetemi adjunktus a Semmelweis Egyetem, Biofizikai és Sugárbiológiai Intézetében. Részt vesz az MTA Társult Biofizikai Kutatócsoport munkájában. Kutatási témája: a molekuláris és globális UV dozimetria kiterjesztése.

## Irodalom

- [1] Bay Z.,  
A világűr kísérletek jövője,  
Fizikai Szemle, (57) 1990, pp.361–365.
- [2] Ehrenfreund P., Menten K.M.,  
From Molecular Clouds to the Origin of Life,  
in: Astrobiology (ed. G. Horneck, Ch. Baumstark-Kahn),  
Springer Verlag Berlin, 2002.
- [3] Bignami G.F.,  
Cosmic Vision: Space Science for Europe 2015-2025,  
Nature, (435) 2005, pp.563–565.
- [4] Rontó Gy., Tarján I.:  
A biofizika alapjai.  
Semmelweis Kiadó, Budapest, 1999.
- [5] Kolb C., Abart R., Bérces, A., Garry J.R.C.,  
Hansen A.A., Hohenau W., Kargl G., Lammer H.,  
Patel M.R., Rettberg P., Stan-Lotter H.,  
A UV simulator for the incident Martian surface  
irradiation and its applications,  
Int. Journal Astrobiology (4) 2005, pp.241–249.
- [6] Nicholson W.L., Munakata N., Horneck G.,  
Melosh H.J., Setlow P.,  
Resistance of Bacillus endospores to extreme  
terrestrial and extraterrestrial environments,  
Microbiol. Mol. Biol. (64) 2000, pp.548–572.

# A SAS2 ULF-VLF elektromágneses hullám elemző műszer a Kompas-2 műhold fedélzetén

FERENCZ CSABA, LICHTENBERGER JÁNOS, E. FERENCZ ORSOLYA, HAMAR DÁNIEL  
ELTE Space Research Group, [spacerg@sas.elte.hu](mailto:spacerg@sas.elte.hu)

BODNÁR LÁSZLÓ<sup>1</sup>, STEINBACH PÉTER<sup>2</sup>, VALERY KOREPANOV<sup>3</sup>

<sup>1</sup>BL-Electronics; Solymár, [bodnar@bl-elelctronics.hu](mailto:bodnar@bl-elelctronics.hu)

<sup>2</sup>MTA-ELTE Research Group for Geology, Geophysics and Space Sciences; [spacerg@sas.elte.hu](mailto:spacerg@sas.elte.hu)

<sup>3</sup>Lviv Centre of Institute of Space Sciences; Lviv, Ukraine, [vakor@isr.lviv.ua](mailto:vakor@isr.lviv.ua)

GALINA MIKHAJLOVA, YURI MIKHAJLOV, VLADIMIR D. KUZNETSOV

IZMIRAN; Troitsk, Moscow Region, Russia, [yumikh@izmiran.ru](mailto:yumikh@izmiran.ru)

Lektorált

**Kulcsszavak:** VLF, whistler, elektromágneses hullámterjedés, elektromágneses monitorozás, űr-időjárás, SAS-műszer

A 2006-ban startolt Kompas-2 műhold fedélzetén sikeresen működött a továbbfejlesztett SAS elektromágneses hullámelemző műszer, a SAS2. A műhold fő feladata részben a szeizmikus események előrejelzését, részben az űr-időjárás kutatni hivatott műhold sorozat tervezett műszerezettségének az űrbeli, technológiai próbája volt. A műszerek jól működtek. A SAS2-K2 által észlelt ULF-VLF elektromágneses jelenségek között több igen érdekeset is találtunk. Whistler-kettősöket, amelyeket korábban az IK-24-en még 1989-ben repült első SAS-műszerrel észleltünk. Tüskés, azaz „Spiky” whistlert (SpW), amelyeket először a Demeter műhold adatait feldolgozva azonosítottunk, az elméleti megoldást is megadva akkor ezekhez a jelekhez. Továbbá elsőként sikerült most azonosítani valóban vezetett módusban terjedő whistler jeleket, amelyek két, plazma-inhomogenitás alkotta felület („hagymahéj-szerű” szerkezet) között terjedtek a magnetoszférában, magasabb rendű (harmadrendű) módus formában. Ehhez az elméleti megoldást is megadtuk – ultraszéles-sávú (UWB) jelekre szintén először.

## 1. Bevezetés

A bolygók, elsősorban a Földünk elektromágneses környezetének monitorozása, bár több kísérlet is volt eddig e téren, érdemben csak most kezdődik. Ennek egyik oka az, hogy a szükséges adatkezelési-mérési technika csak most áll már rendelkezésre legalább alapfokon, másrészt az ehhez szükséges hullámterjedési elmélet csak mostanra született meg, mivel több – mondhatjuk úgy – áttörésre volt szükség elméleti téren is. A több előkísérlet egyike volt például az IK-24 („Aktív”) műhold repülése, amelyik műhold 1989-ben startolt [8] az általunk kifejlesztett „Signal Analyzer and Sampler”, azaz SAS nevű műszerrel a fedélzetén.

Mára világhossá vált, hogy általában a bolygók és közöttük érthetően a lakhelyünk, a Föld elektromágneses környezetének a megismerése és folyamatos figyelése, monitorozása a bolygó működésének megértéséhez és állapota nyomonkövetéséhez elengedhetetlenül szükséges. Ezért fejlesztettük ki a korszerűsített SAS műszereket a SAS2-t műholdakon és bolygóközi, illetve más bolygókat kutató szondákra való alkalmazásra, míg a SAS3-at részben a Nemzetközi Űrállomáson (ISS), részben műholdakon az igen nagy felbontású hullámalak mérésekre.

Ezen adatok segítségével remélhetjük egyrészt a Nap-Föld kapcsolatokat és az űridőjárás jobb megértését, a Föld működésének pontosabb leírását és a földrengések a Föld szeizmikus aktivitása előrejelzéséhez megbízható adatbázis szolgáltatását.

Ahhoz azonban, hogy a műholdakon regisztrált jeleket megértsük, azok alakjából megbízható következtetésekre juthassunk, például elrendeljük-e egy nagy város kiűrtését vagy sem mondjuk földrengés veszély miatt, mindenképp az adott jelek kialakulását, vagyis az elektromágneses hullámok terjedését kell tudnunk pontosan leírni. Példaként tekintsük azt az igen fontos modell-kérdést, amely szerint a villámokból keletkező ULF-VLF jelek, azaz a whistlerek az egyik – és a ma leginkább vallott – nézet szerint [7] csak plazma-inhomogenitásokból kialakuló hullámvezetők, azaz „duct”-ok mentén juthatnak el a villámlás helyétől a mágneses erővonal másik, úgynevezett konjugált pontjára a Földön, ahol whistlerként vesszük ezeket, vagy egy másik nézet szerint eljuthatnak-e vezető struktúra nélkül is, vagy egy harmadik nézet szerint nem „spagetti”-szerű „duct”-ok vannak a magaslégkörben, hanem „hagymahéj”-szerű inhomogenitás-felületek, s ezek vezetik a hullámokat.

E kérdés eldöntése azért fontos, mert ennek ismeretében tudjuk csak egzaktul megmondani, milyen hatások hogyan terjednek, s az egyes mérések mit jelentenek. De e döntéshez pontosan kell tudnunk, hogy e különleges környezetben, a feltételezett különleges hullámvezetőkben hogyan is terjednek a tetszőleges alakú, azaz igen széles, ultraszéles-sávú (UWB) jelek, hogyan változik az alakjuk a terjedés során (lásd pl. [1]). Ha ezt tudjuk, a többi már csak pontos műholdas mérés kérdése [2,5]. Meg persze a műholdas mérésekkel szimultán, valóban folyamatos és a folyamatos adatfeldolgozást és értékelést is automatikusan elvégző, a



műholdas mérésekkel teljesen kompatibilis földi méréseké, amelyet szintén meg kellett oldanunk [10,11]. Az elméleti modellek és megoldási módszerek folyamatos és eredményes fejlesztése mellett lényeges előrelépést jelent ezen az úton – a francia Demeter műhold repülése mellett – az eredeti SAS-sal és a mai hasonló célú űreszközökkel összevetve is igen fejlett, új SAS2 műszer repülése a Kompas-2 műholdon. Ez egy, a fentebb leírt célból indítandó műhold sorozat technológiai próbájaként startolt, valamint az általunk globálisan telepített és még telepítendő, a SAS2-vel és következő fejlettebb társaival kompatibilis, földi VR-1 és VR-2 mérőrendszer, amely már sikeresen működik a Kárpát-medencében 4 ponton, az Antarktiszon 2 ponton, Dél-Afrikában 2 ponton, Új-Zélandon, s hamarosan más helyeken is (például 2 finnországi ponton).

E földi rendszer folyamatosan, megszakítás nélkül mér, automatikusan felismeri a whistlereket, s azonnal értékeli is azokat az idei év első félévétől kezdve automatikusan szolgáltatva az alapvető magaslégköri plazma paramétereket, ahogyan eddig az elérhetetlen volt. Ez az AWDA rendszer [11]. Az áttöréshez a legpontosabb (új) UWB hullámterjedési modelleket kellett kifejleszteni és használni, mert a régi, megszokott közelítések nem alkalmasak a feladat megoldására.

A SAS2 első űrbeli működésére és a kapott adatok fontosságára tekintettel most először a SAS2-t ismeretjük, majd három érdekes és fontos mért adatsort mutatunk be az értelmezéssel együtt.

## 2. A SAS2 a Kompas misszióban

A Kompas misszió fő célja tehát a Kompaszt követő műhold-rendszer tervezett tudományos céljához – azaz a szeizmikus események előrejelezhetősége, az űr-időjárás és a földi magaslégkör, a Föld elektromágneses környezete vizsgálatához – alkalmazni tervezett szakmai elképzelések, mérések és mérőeszközök műholdfedélzeti próbája és ellenőrzése volt. Ezen belül a SAS kísérlet szempontjából kiemelt cél a szeizmikus eseményeket megelőző, kísérő elektromágneses jelenségek felderítése, valamint a Föld elektromágneses környezetének részletes tanulmányozása és monitorozása, benne a villám-aktivitás, a whistler terjedés és az űr-időjárási kapcsolatok kutatása. A Kompas misszió keretében a SAS2 alkalmasságát kellett igazolni e célok elérésére.

A Kompas-1 2001. december 10-én startolt, de a sikeres start után a műhold a pályára érve meghibásodott. Ezért a kísérletet meg kellett ismételni, hogy a fentebb leírt cél elérhető legyen. A Kompas-2 2006. május 26-án indult és elérte a tervezett pályát (79° inklináció, ~400 km magasságú körpálya). A műholdat az 1. ábra, a műhold általános vázlatát a 2. ábra mutatja.

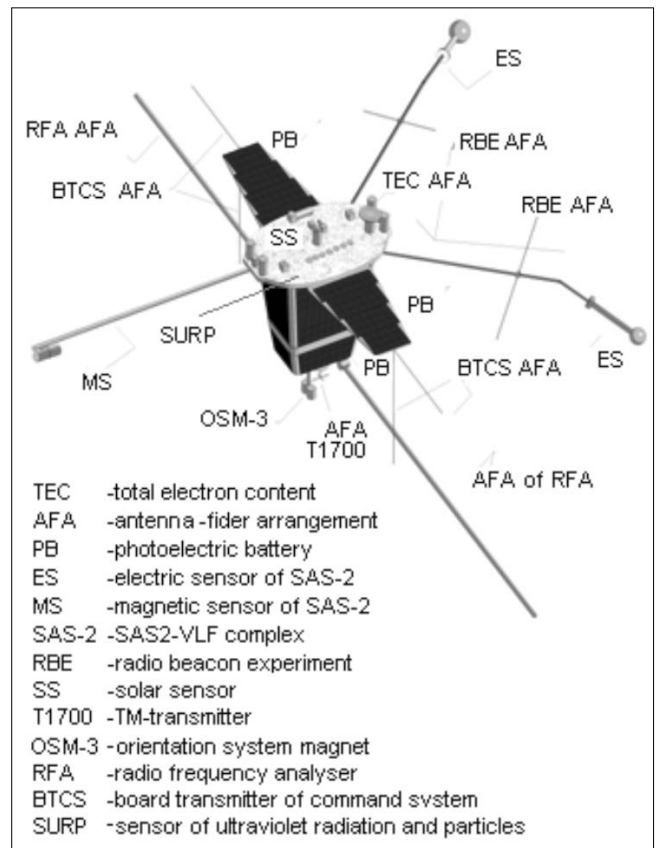
A start után, a műhold teljes műszaki üzembeállítása és kalibrálása során azonban a fedélzeti energiaellátó rendszer (napelemek, akkumulátorok) működésében komoly zavarok álltak be, amelyeket csak november



1. ábra  
A Kompas-2 a végső ellenőrzés alatt a hordozórakétára szerelés előtt

elejére sikerült részlegesen kompenzálni. Így akkor vált lehetővé a teljes tudományos műszerpark ellenőrzése, működtetése. A Kompas-2 egész aktív működése során mind a SAS2, mind a többi tudományos fedélzeti műszer hibátlanul működött.

2. ábra  
A Kompas-2 vázlatrajza a műszerekkel.  
A SAS2-K2 érzékelői az ukrán gyártmányú két ES elektromos érzékelő és a szintén ukrán gyártmányú MS mágneses érzékelő.





3. ábra  
A Kompas-1-en repült SAS2-K1 műszer

A SAS2 egy fejlett technológiájú, intelligens ULF-VLF hullámelemző műszer, amelyet az Eötvös Lóránd Tudományegyetem Úrkutató Csoportja és a BL Electronics Kft. fejlesztett ki, s a BL Electronics gyárt, s amely ukrán érzékelőket használ.

A SAS2 Kompas misszióban használt változata két csatornás, azaz a terjedő elektromágneses ULF-VLF sávú jel egy elektromos és egy mágneses komponensét méri. Az érzékelők egyike (ES) két vezető gömb egymástól >1,5 m távolságra, s a két gömb között fellépő elektromos potenciálkülönbség a hasznos jel; míg a másik érzékelő (MS) egy az ULF-VLF sávban a tengelyével párhuzamos mágneses jeleket venni képes tekercs (search coil). Mind a SAS2-K2, mind az érzékelők tökéletesen működtek, nagy érzékenységgel, kis zajszinttel és az elektromos és mágneses csatorna érzékenysége nemcsak nagy, de szimmetrikus is volt, összhangban az eredeti specifikációval.

Ezzel minőségileg sikerült előrelépni a francia Demeter műholdhoz viszonyítva, mert a Demeteren a VLF sávban az elektromos csatornához képest a mágneses csatorna érzékenysége sokkal kisebb. Így a Kompas-2-ről származó jeleknek mind az elektromos, mind a mágneses komponensét sikerült azonos minőségben regisztrálni és értékelni.

A Kompas-1-en startolt SAS2-K1 egyetlen két csatornás SAS2-t tartalmazott. A SAS2-K1-et a 3. ábra mutatja. Ugyanakkor a Kompas-2-n működött SAS2-K2 (4. ábra) két, teljesen azonos két csatornás SAS2-t tartalmazott, amelyben az egyik SAS2 az éppen működő másik hideg tartaléka volt, hogy a teljes misszió megbízhatóságát megnöveljük. Ez jól látszik a SAS2-K2 blokkvázlatán, amelyet az 5. ábra mutat.

### A SAS2 fő jellemzői

Frekvencia tartomány

(mind az elektromos, mind a mágneses csatornán):

1 Hz – 20 kHz

Mágneses érzékelő átviteli függvénye:

1 Hz – 1 kHz lineáris, 1 kHz – 20 kHz állandó

Elektromos érzékelő átviteli függvénye:

1 Hz – 20 kHz állandó

Zajszint:

Mágn. érzékelő: 10 Hz – 2 pT / Hz<sup>1/2</sup>,

100 Hz – 0.2 pT / Hz<sup>1/2</sup>,

1 kHz – 0.03 pT / Hz<sup>1/2</sup>,

10 kHz – 0.05 pT / Hz<sup>1/2</sup>

Elektr. érzékelő (egy pár):

10 Hz – 40 nV / Hz<sup>1/2</sup>,

10 kHz – 20 nV / Hz<sup>1/2</sup>.

A SAS2-K2 érzékelők nélküli tömege 470 g, a teljes tömeg az érzékelők összes szerelvényével 1260 g. A SAS2 elektronikus egység mérete 150x70x110 mm. A teljes fogyasztása ≤ 3 W úgy, hogy a fő egységen belül csak az egyik SAS2 működik, míg a másik nem, mivel az hideg tartalék.

A működése során a SAS2 földi parancsokkal vezérelhető. Állítható a mintavételi sebessége (max. 43,2 kHz), a bementi erősítése (-18 dB és +20 dB között három lépésben, az üzemmódja stb. A működési programját egy 128 kByte-os EPROM tárolja, az aktuális működési paramétereket egy 64 kByte-os EEPROM, míg a fő (cirkuláris) adattároló és telemetria memóriája 4 MB SRAM.

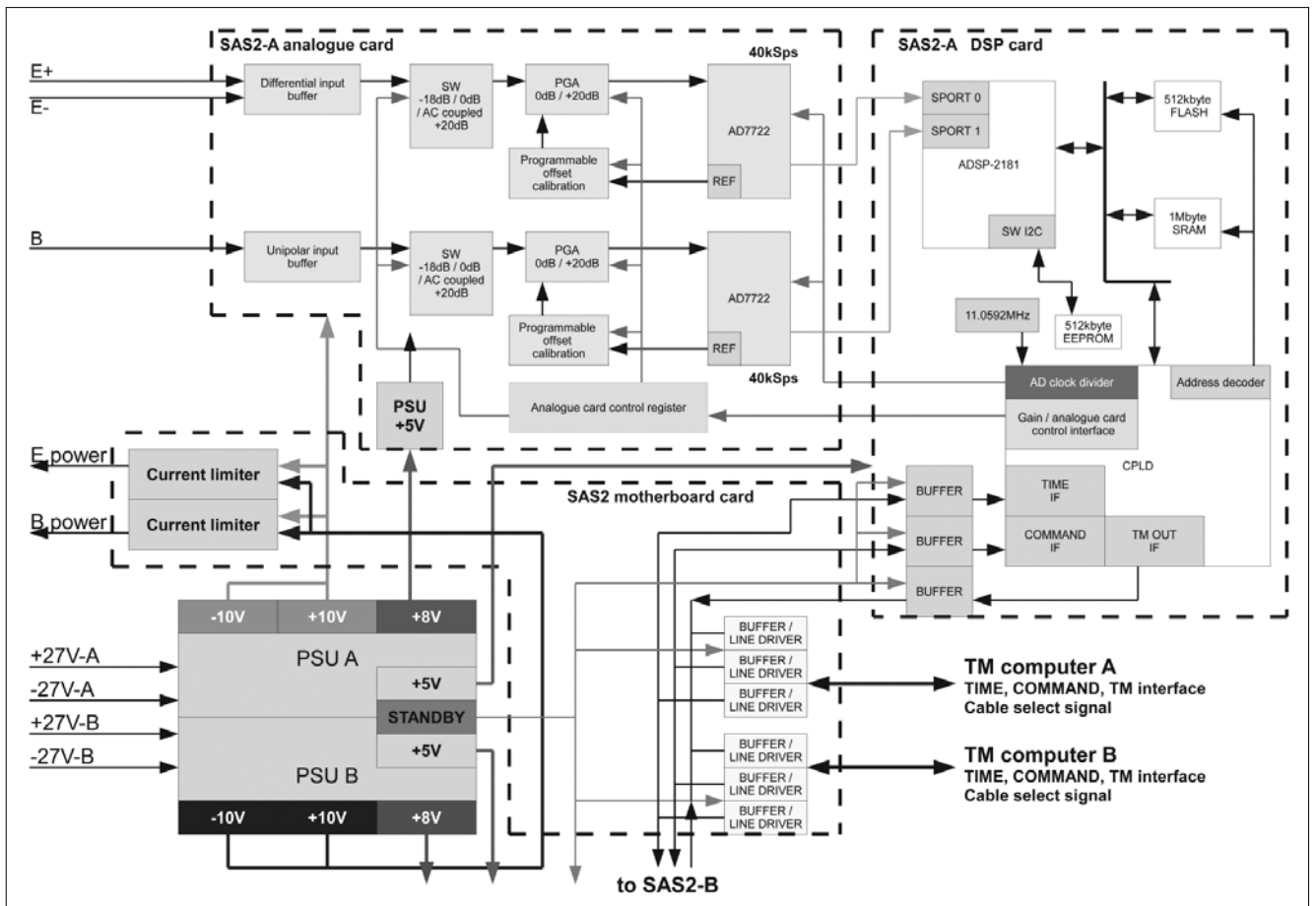
E rendszer lehetőségeit kihasználva a következők a SAS2-K2 üzemmódjai:

- Az átlagolt e.m. zajspektrum monitorozása mindkét csatornán:* Az átlagolási idő vezérelhető 1 másodperc és 10 perc között. Ez az üzemmód szimultán fut a következő kettő valamelyikével.
- Kapcsolt jelenség érzékelés:* A vett jeleket folyamatosan feldolgozza miközben a vett jel maga a cirkuláris memóriában halad előre a belépéstől a lecsordulásig. A jel FFT spektrumát képezi eközben az egyik, parancssal kijelölt csatornán, s azt összeveti a tárolt referencia spektrummal. Ha a referenciát a vett spektrum valahol, előírt módon túllépi (az eljárásról többet: [11]), akkor az egy „ese-

4. ábra

A Kompas-2 műhold SAS2-K2 műszere, valamint az egyik elektromos érzékelő gömb és a mágneses érzékelő. (Melléjük a méretek szemléltetéséeként egy-egy ceruzaelem látható.)





5. ábra  
A SAS2-K2 blokkvázlata. A SAS2-A és a SAS2-B egységek egyformák.

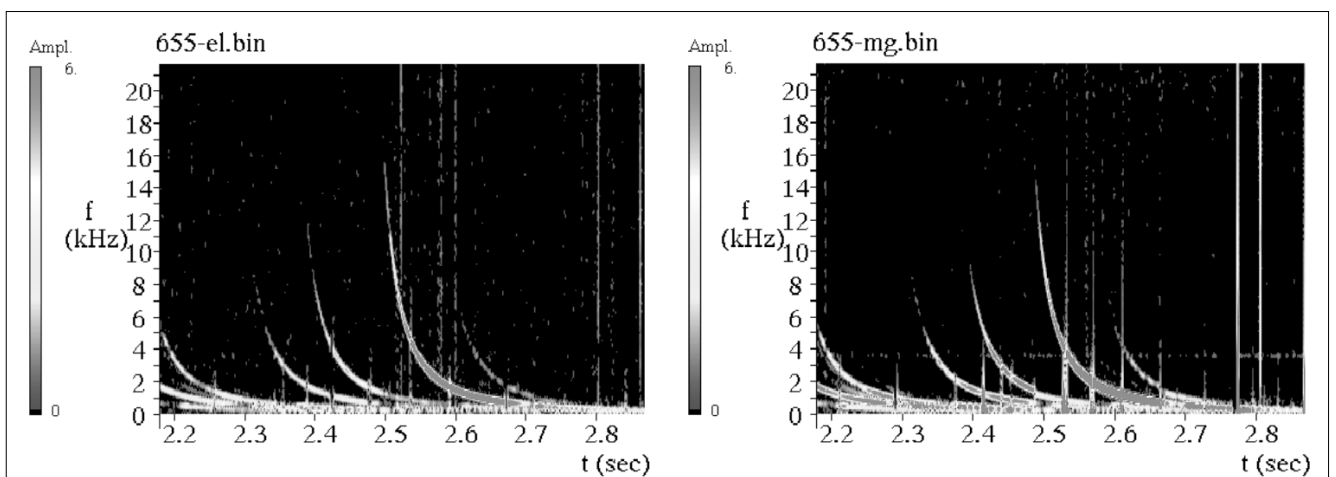
mény”, s a SAS2 az esemény előttől (előre definiált idő, pl. 0,5 sec) az esemény utánig (előre definiált idő, pl. 1,5 sec) terjedő regisztrátum szakaszt mindkét csatornáról a cirkuláris memóriából a telemetria puffer memóriá-részbe átírja.

c) *Periódikus, idővezérlésű adatgyűjtés:* Ez a szokásos, „burst” üzemmód, amikor előre programozott időben be- és kikapcsolva a vett jelet írjuk be a

telemetria memória részbe mindkét csatornáról, bármiféle fedélzeti elemzés nélkül.

A SAS2 igen jól működött, s több érdekes jelet, jelenséget is rögzített. A 6. ábrán az első mért jel, egy rendkívül erős whistler csoport látható, mind az elektromos, mind a mágneses komponens. A továbbiakban három fontos, mért jelet mutatunk be, röviden utalva az értelmezésre is.

6. ábra  
A SAS2-K2 első mérési adatai, egy rendkívül erős whistler csoport elektromos és mágneses komponenseinek FFT képe, 2006. november 29., 5.00.00 UT Indonézia fölött



### 3. Példák a SAS2 által regisztrált e.m. eseményekre

A következőkben három fontos példát mutatunk be a SAS2 regisztrátumok közül. Az első kettő korábbi felismeréseinkhez kapcsolódik, míg a harmadik eddig még senki által nem észlelt jelenséget mutat.

#### 3.1. Whistler kettősök

Whistler kettősöket már az első SAS kísérlet során észleltünk az IK-24 („Aktív”) műhold fedélzetén (lásd a 7. ábrát és bővebben [8]-ben). Ekkor e kettősök keletkezési lehetőségeit vagy a műhold alatt reflektálódó és a műholdhoz visszaérkező jelben véltük megtalálni – a két jel távolsága és a műhold pályamagassága ezt erősíteni látszott –, vagy két egymáshoz igen közel eső, a plazma inhomogenitásaiból kialakult hullámvezetőben (duct-ban) értelemszerűen kialakuló kis futási idő különbségen.

Az időkülönbség egy-egy whistler kettős két jele között az akkor mért, és a 7. ábrán is látható sorozatnál  $70 < 80$  ms volt, s ezt a röviden említett mindkét lehetőség magyarázni tudta. A két jel úgynevezett finomszerkezete nagyon hasonló lévén a jelforrás (keltő villám) azonosságát és a terjedési út nagy hasonlóságát jogosan fel lehetett tételezni. Ezt az interpretációt azonban valódi, UWB hullámterjedési modell-számítással megerősíteni nem tudtuk, hisz az első pontos UWB terjedési modelleket később sikerült kifejlesztenünk.

A SAS2 is mért whistler kettősöket, amelyre például a 8. ábra mutat. Ez esetben a két jel időkülönbsége hasonló értékű, mint a régi SAS mérésnél, most ez  $60 < 70$  ms. Bár itt nem jelentkezett 1-2 másodpercen belül több kettős, de még ugyanebben a mérési szakaszban, pár másodperccel előbb is ugyanilyen kettős jelet észlelt a SAS2, vagyis a whistler kettősök időnként, de szisztematikusan előfordulnak. A jelenség nem eseti, nem tekinthető egyszeri véletlennek. Ugyanakkor a korábbi keletkezési értelmezésünk alapvető felülvizsgálatra szorul, mert a Kompas-2 jóval alacsonyabb pályán kering,

mint az IK-24 annak idején; a pálya magassága ~400 km. Ez túl alacsony ahhoz, hogy egy jel a műholdtól a felszín felé haladva és annak közelében visszaverődve ily nagy futási idő késést szenvedjen.

A Kompas-2 az ionoszférában kering, mint a Demeter is, nem magasan fölötté. Így a visszaverődéses keletkezés most kizárható. Viszont a két, közeli és keskeny, kis átmérőjű hullámvezetőben terjedést is ki kell zárjuk, mert azóta sikerült pontosan megoldani a tetszőleges alakú (UWB) jelek terjedését előmágnesezett plazmával töltött hullámvezetőkben, s e jelpáros semmi jelét nem mutatja a hullámvezetőben terjedésnek; az azokban terjedő jelek alakja jellegzetes eltérést mutat (lásd még a 3.3. részben). Vagyis újra kell kezdeni e kettősök vizsgálatát, hisz vagy a keltő villámok kettősök ily módon időnként, s akkor arra kell magyarázatot találni, vagy a kettőződés oka ma még ismeretlen mechanizmus, s akkor azt a mechanizmust meg kell találni, le kell tudni írni, hiszen a villámok keletkezése (és előfordulási sűrűsége is) közvetlenül kapcsolódik a globális változásokhoz, a globális felmelegedéshez is.

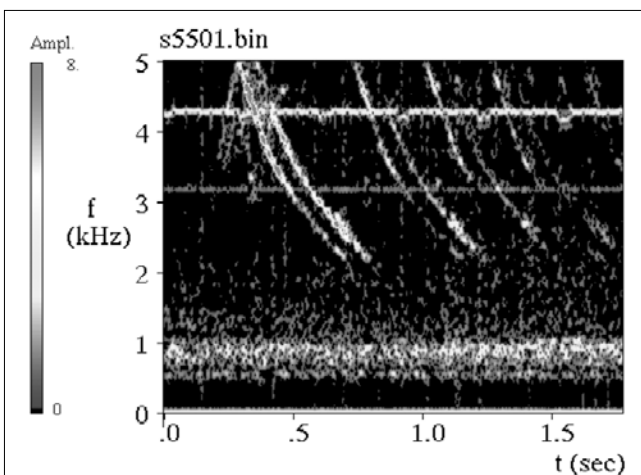
#### 3.2. Tüskés whistlerek (Spiky Whistlers – SpW)

E whistlerekről röviden beszámoltunk már a Demeter műhold méréseivel is foglalkozó korábbi cikkünkben [2]. A jelenség pontos azonosítását és hullámterjedési leírását, a teljes UWB terjedési modell ismertetésével együtt meg lehet találni a [3] és [5]-ben.

Lényege az, hogy a villám dominánsan függőleges gerjesztő áramot hoz létre, azaz felhő-föld jellegű villám. A keletkezett elektromágneses jel a Föld-ionoszférára hullámvezetőben kezd terjedni, majd nagyobb távolságot megtéve e hullámvezetőben egy idő után kicsatolódik a magasléggör felé és az ionoszférán, ezen előmágnesezett plazmán át eljut a műholdhoz. A Föld-ionoszférára hullámvezetőben terjedés következtében különféle rendű vezetett hullámképek jönnek létre és terjednek, amelyeknek a felszín és az ionoszféra D-réteg aljának távolságától függő határhullámhosszai alakulnak ki, s e határfrekvenciák egymás harmonikusai. Így

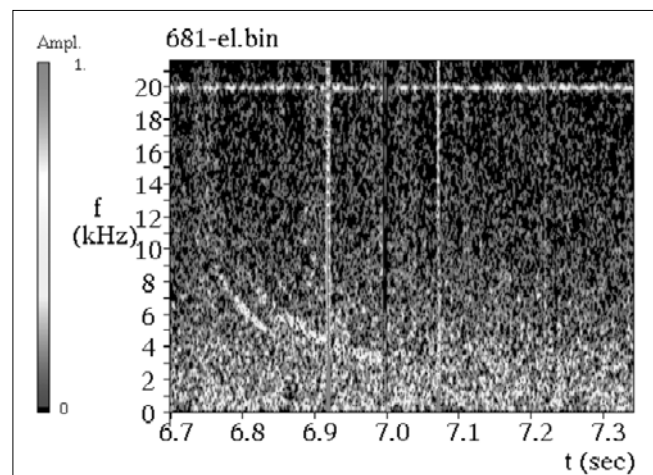
7. ábra

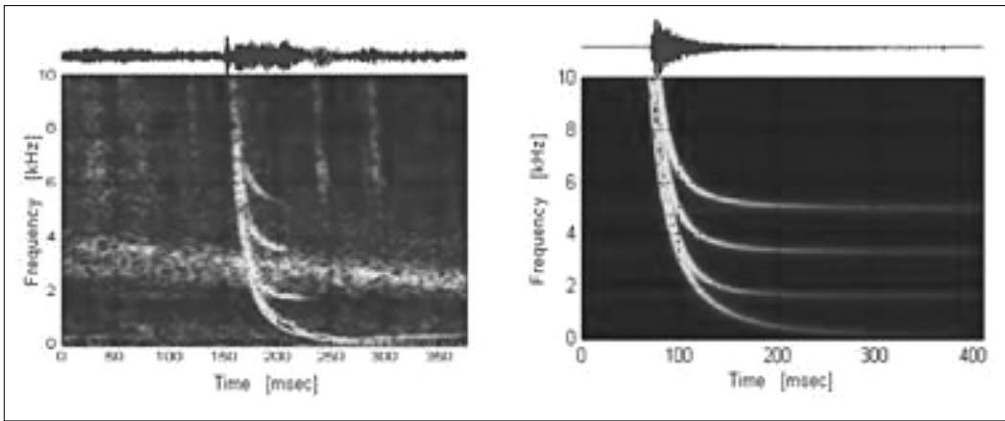
Whistler kettősök, amelyeket az első SAS mért az IK-24 fedélzetén 1990. december 14-én.



8. ábra

Egy példa a Kompas-2 fedélzetén a SAS2 által mért whistler kettősökre; a SAS2 2007. január 27-i mérése





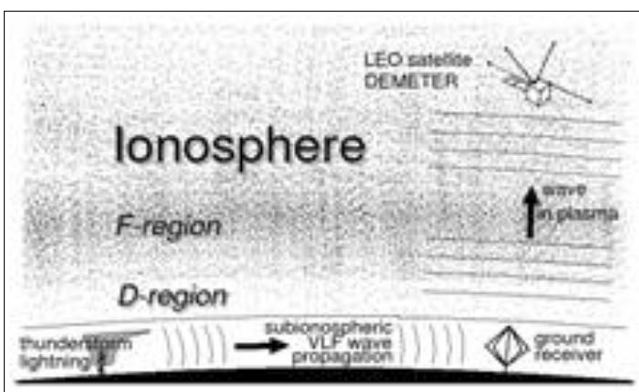
10. ábra  
A Demeter által  
2004. november 6-án mért  
és a pontos UWB terjedési  
modellel számított jelalak  
és FFT spektrogramjaik,  
[5] nyomán

a jel spektrogramja (például FFT képe) „tüskés” lesz. E jel terjed azután a műholdig, diszpergálódva, de e tüskés szerkezetét megőrizve. A terjedés vázlatát a 9. ábra, a kialakult és a Demeteren mért, valamint a pontos UWB modellel számított hullámkép FFT spektrogramját a 10. ábra mutatja.

A Kompas-2 fedélzetén is mértünk SpW-t, lásd a 11. ábrát. Ebben a jelcsoportban a másod-, harmad-, hatod-, heted- és kilenced-rendű módusok azonosíthatók. Közülük a harmad-rendű és kilenced-rendű módus formában terjedő jelek nagyon markánsak, a többi felsorolt módus forma ugyan azonosítható, de kis intenzitású, míg a többi módus ez esetben nem terjedt a műhold fele.

Vagyis sikerült igazolni, hogy az SpW-k, amelyeket először a Demeter adatait használva mutattunk ki, sűrűn előfordulnak, a várakozásunknak megfelelően. Mivel pedig a módusok határhullámhossza, határfrekvenciája a felszín–D réteg távolságtól függ, az SpW-k segítségével valóban folyamatosan és a teljes Földre vonatkozóan monitorozni lehet az ionoszféra alsó határfelületének magasság ingadozásait, amelyek a napszak, évszak stb., de az űridőjárás, a szeizmikus aktivitás és a globális változások következményeiként lépnek fel. A különféle változások okai folyamatos monitorozás eredményeként előálló idősorok és egyéb jellegzetességek alapján – várakozásunk szerint – megkülönböztethetők. Ez egyben az egyik jövőbeni kutatási irány is, nem kevés K+F munkát jelentve.

9. ábra  
A tüskés whistlerek (SpW-k) kialakulását okozó hullámterjedési út vázlata, [5] nyomán



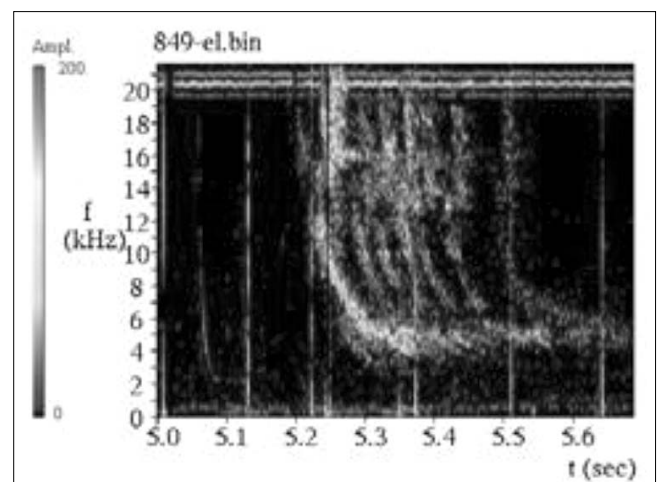
### 3.3. Vezetett módus formában terjedő whistler jel létének közvetlen kimutatása

Amint már a bevezetőben is röviden említettük, a whistler jelenség földfelszínen megjelenésének egyik problémája volt a kezdetektől fogva, hogy hogyan is jutnak el e villámok által keltett jelek a Föld egyik (északi vagy déli) féltékéről a másik féltékére a magszférán keresztül. Ez fontos kérdés, mert a jó választól függ, hogy e mért jelekből hogyan lehet és kell a Föld felsőléggörét, a felsőléggöri (előmágnesezett) plazmát jellemző paramétereket meghatározni, a Föld az élet megmaradása szempontjából is fontos felsőléggöre állapotát figyelni, a viselkedését nyomon követni, az ottani folyamatokat pontosan leírni.

E kérdés alapvető fontossága miatt kezdtük el kiépíteni a globális kiterjedésű, a műholdas műszereinkkel kompatibilis földi műszerekkel (VR-1 és VR-2 műszerek) felszerelt, a nap 24 óráján át automatikusan és folyamatosan mérő, a whistlereket kiválogató és (rövidesen) teljesen automatikusan értékelő AWDA mérőhálózatot is [9-11].

A kezdeti vizsgálatok, amelyekben VLF sávba eső, de szigorúan monokromatikus (szinuszos), folyamatos jelek terjedését számolták sugárkövetési programokkal, azt sugallták, hogy e jelek csak akkor terjedhetnek végig a mágneses erővonalak mentén, ha azok mentén egy

11. ábra  
A SAS2 által a Kompas-2 fedélzetén  
2007. március 16-án mért SpW csoport



plazma sűrűség inhomogenitásból kialakult, csőszerű (duct) vezető struktúra van, enélkül nem [7]. Ez nem lehetetlen, hiszen a töltött részecskék a Föld mágneses erőtere miatt az erővonalakra merőlegesen nehezen tudnak elmozdulni, míg az erővonalak mentén könnyen. Így egy plazma inhomogenitás a magnetoszférában az erővonalak mentén kenődik szét.

Az azonban gondot okoz, hogy a whistlerek nagy száma miatt e „spagetti”-szerű csöveknek, a ductoknak folyamatosan és nagy számban, nagy stabilitással kellene jelen lenni. Az is probléma, hogy a whistlerek alakja mind a korábbi közelítő számítások szerint, mind a pontos UWB megoldások szerint [1] megfelel az előmágnesezett plazmában szabadon, nem vezetetten terjedő jelalaknak. A kérdés helyes megválaszolásától pedig, mint fentebb jeleztük, a felsőlégkör megismerésének és monitorozásának alapvető modelljei függenek. A két lehetőség közötti átmenetként az is felmerült, hogy inhomogén felület-szerű, azaz héj-szerű („hagymahéj” szerkezet) vezető struktúrák léteznek a magaslégkörben, s ez az egyszerűbb és értelemszerűen stabilabb, talán valószínűbb felsőlégköri szerkezet vezeti a whistlereket a mágneses erővonalak mentén.

E kérdés fontossága miatt kellett vizsgálni és végül sikerült megoldani az előmágnesezett plazmával töltött hullámvezetőkben terjedő impulzusok, UWB jelek leírását [4]. Ekkor derült ki, hogy az ezen hullámvezetőkben kialakuló hullámképek egyrészt, mint várható is volt, eltérnek a szabadtéri terjedés során kialakuló hullámké-

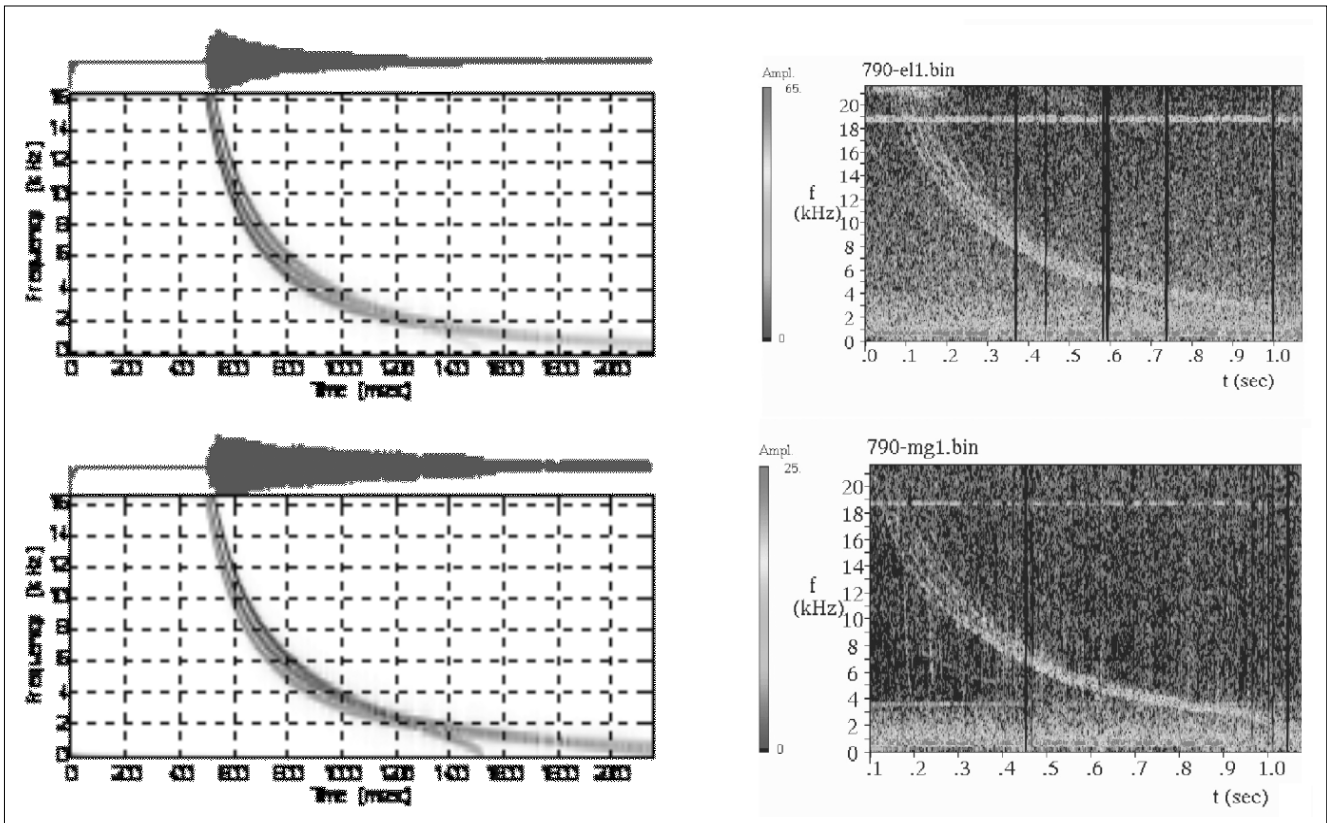
pektől, másrészt, s ez nagyon váratlan volt, a spektrogramjuk alakja szokatlan, nincs a módusoknak aszimptotikus határfrekvenciája, hanem egy idő múlva a jel dinamikus spektrum-görbéjének görbülete megfordul és a spektrogram a nulla frekvenciához fut ki véges, rövid idő alatt. (E szokatlanság miatt az elméleti modellt mintegy két évig újra és újra ellenőriztük. De az eredmény nem változott. Hibát nem találtunk.) Méréssel e kérdés viszont csak akkor dönthető el, ha a mérőeszköz nemcsak a VLF sávban, de az ULF-ELF sávokban is kellően érzékeny, s így a jel dinamikus spektrumának nullához tartása is jól vizsgálható a mért adatokon. E követelményeknek a SAS2-K2 megfelelt.

A SAS2-K2 által a Kompas-2 fedélzetén 2007. február 28-án mért egyik whistler csoport az elméleti várakozásainknak megfelelő alakot mutatja (12. ábra). Ez az első eset, hogy sikerült kimutatni valóban vezetett módusban terjedő whistler jelet. A már rendelkezésre álló elméleti modell segítségével vizsgáltuk, hogy milyen hullámvezető struktúrában alakulhatott ki a mért jel alakja. A számítások alapján azt mondhatjuk, hogy a mért whistler jel magasabb rendű vezetett módusban terjedt a mágneses erővonal mentén. A vezető struktúra azonban nem csőszerű, nem úgynevezett duct, hanem felületek közötti terjedés történt, azaz a vezető szerkezet „hagymahéj”-szerű volt.

A modellszámítások során a méréssel igen jól egyező eredményt kaptunk akkor, amikor két, egymástól 6 km-re lévő felület között terjedt a jel. (A mágneses tér a fe-

12. ábra

Az UWB modellel számított, első-, másod- és harmad-rendű módus-formában terjedő whistler, valamint a Kompas-2-n 2007. február 28-án mért whistler dinamikus spektruma

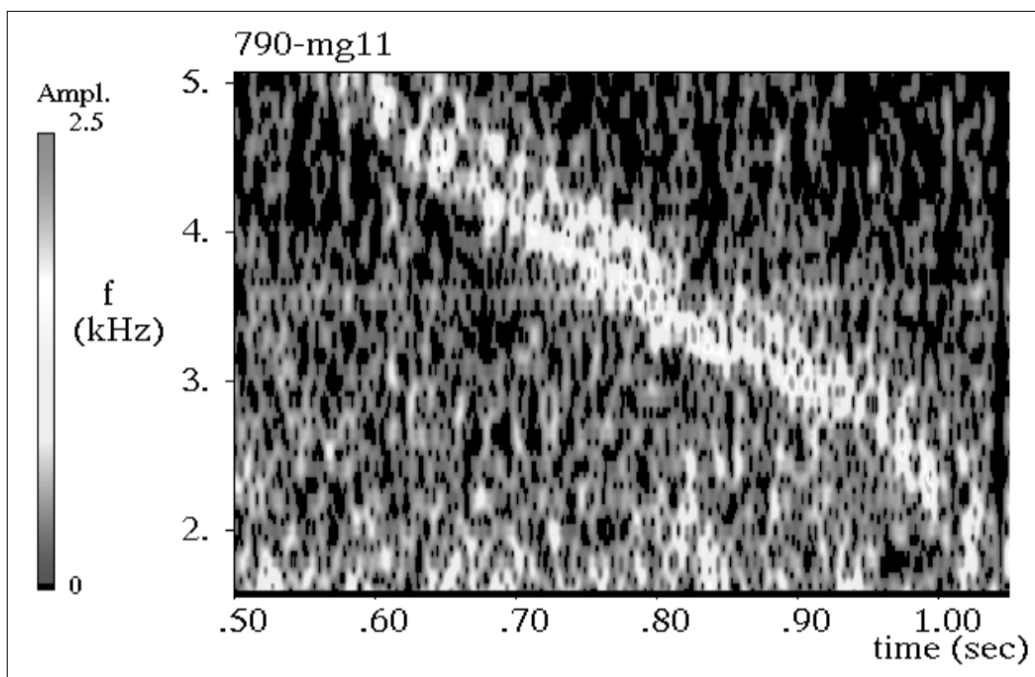


lűletekkel párhuzamos, s a terjedés induló és a terjedés során nem változó iránya az előmágnesező tér irányával egyezik meg.) A terjedési út hossza 30.000 km, a modellszámításban a plazmában a plazmafrekvencia 2,5 Mrad/s és a girofrekvencia 900 krad/s.

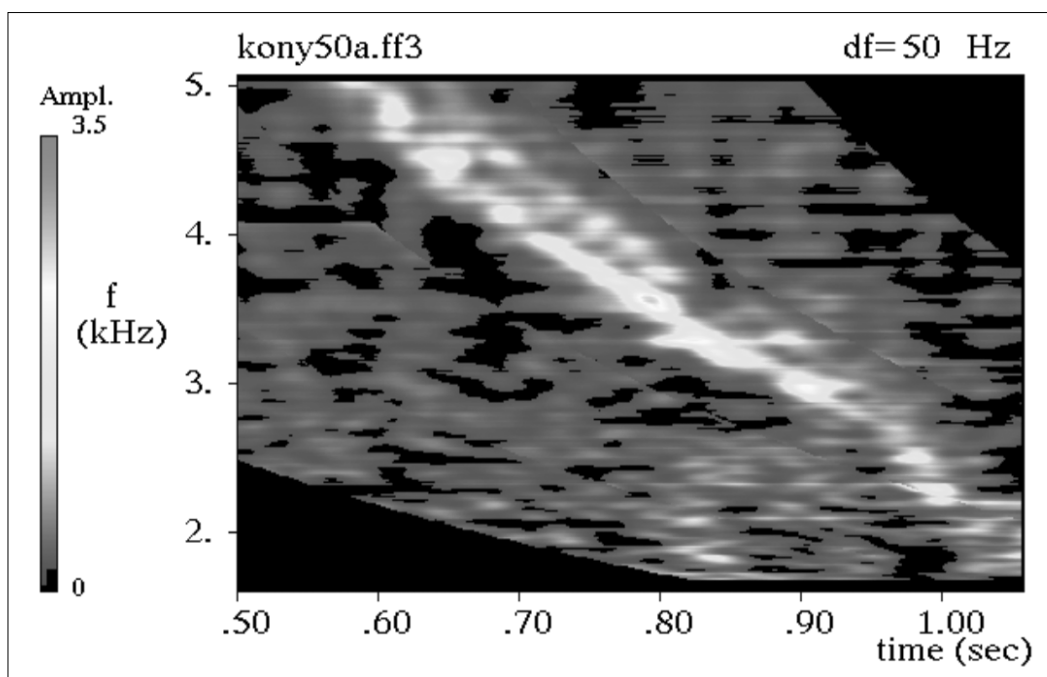
Az előző oldali 12. ábrán az első-, másod- és harmadrendű modusok dinamikus spektruma látható, s az is, hogy a harmadrendű módus dinamikus spektruma a mért jel dinamikus spektrumával nagyon pontosan megegyezik. Vagyis kijelenthetjük, hogy ez a jel vezetett jel és a két vezető felület között harmadrendű módus-formában terjedt. Viszont ebből az is következik, hogy a duct-ok létezését ezen mérési sorozattal nem sikerült igazolni, s a duct-ok legalábbis nem alapvetően fontosak a whistlerek terjedéséhez.

Az is kimondható még, hogy azok a whistlerek, amelyek nem mutatják a vezetett jelek jellegzetességeit, nem terjedtek vezetők szerkezetekben. Ezért intenzív kutatást kell indítani annak tisztázására, hogy mikor és mennyi jel terjed vezetett és nem vezetett formában. (Értelem-szerűen a különféle terjedési situációk pontosabb UWB elméleti modelljeit is fejleszteni kell, amely során az eredmény eléréséhez több elméleti áttörés is szükséges.)

E szokatlan jelalak természetesen sokoldalú elemzést és ellenőrzést tesz szükségessé. Ezért többek között illesztett szűréssel [6] is megvizsgáltuk a jelet. A 13. ábra ugyanazon jelszakasz, azaz a jel vége FFT képét, míg a 14. ábra az illesztett szűréssel kapott képét mutatja. A jel alakja, a nulla frekvenciához tartásának módja, „lekonyulása” vitathatatlan tény.



13. ábra  
A vezetett módusban terjedő whistler végső szakaszának FFT képe



14. ábra  
A vezetett módusban terjedő whistler végső szakaszának illesztett szűréssel készült képe

#### 4. Összegzés

- a) A Kompas-2 és rajta a SAS2-K2 mérőrendszer technológiai fejlesztést verifikáló próbája sikeres volt.
- b) A SAS2-K2 fontos, új ismeretek megszerzését tette lehetővé.
- c) A whistler kettősök vizsgálatát újra kell kezdeni, s véglegesen tisztázni e kettőződés okát.
- d) Az SpW-k alkalmasak az ionoszféra alsó határfelülete dinamikájának folyamatos és globális vizsgálatára.
- e) Először sikerült kimutatni vezetett módban terjedő whistler jelet, s ez egyben megnyitotta az utat a whistlerek terjedési formái változatainak és ezzel összefüggésben a magnetoszféra finomszerkezetének a kutatásához, túllépve a régebbi közelítő leírásokon és pontatlan elképzeléseken.

#### Köszönetnyilvánítás

Szerzők köszönetet mondanak a Magyar Űrkutatási Irodának (Környezetvédelmi és Vízügyi Minisztérium) Magyarországon; az IZMIRAN-nak Oroszországban; továbbá a Lviv Centre of Institute of Space Sciences-nek Ukrajnában e K+F munka költségvetési és egyéb feltételeinek biztosításáért.

#### Irodalom

- [1] Ferencz, Cs, O.E. Ferencz, D. Hamar and J. Lichtenberger (2001), Whistler phenomena. Short impulse propagation, Astrophysics and Space Science Library, Kluwer Academic Publ., Dordrecht, The Netherlands.
- [2] Ferencz, Cs., Ferencz, O.E., Lichtenberger, J., Székely, B., Steinbach, P. és Bodnár, L. (2006), Híradástechnika, LXI., 2006/4, pp.29–33.
- [3] Ferencz, O.E., Steinbach, P., Ferencz, Cs., Lichtenberger, J., Hamar, D., Berthelier, J.-J., Lefeuvre, F. and Parrot, M. (2006), Full-wave modeling of long subionospheric propagation and fractional hop whistlers on electric field data of the DEMETER satellite, Int. Symp. Demeter, Toulouse, June 14-16, 2006.
- [4] Ferencz, O.E., Steinbach, P., Ferencz, Cs., Lichtenberger, J., Parrot, M. and Lefeuvre, F. (2006), UWB modeling of guided waves in anisotropic plasmas, 2nd VERSIM Workshop 2006, Sodankylä, Abstracts p.27, ISBN 951-42-6053-8.
- [5] Ferencz, O.E., Ferencz, Cs., Steinbach, P., Lichtenberger, J., Hamar, D., Parrot, M., Lefeuvre, F. and Berthelier, J.-J. (2007), The effect of subionospheric propagation on whistlers recorded by the DEMETER satellite-observation and modeling, Ann. Geophys., 25, pp.1103–1112.
- [6] Hamar, D. and Tarcsai, Gy. (1982), High resolution frequency-time analysis of whistlers using digital matched filtering,

Part I: Theory and simulation studies, Annales Geophys., 38, pp.119–128.

- [7] Helliwell, R.A. (1965), Whistlers and related ionospheric phenomena, Stanford University Press, Stanford, California.
- [8] Lichtenberger, J., Tarcsai, Gy., Pásztor, Sz., Ferencz, Cs., Hamar, D., Molchanov, O.A. and Golyavin, A.M. (1991), Whistler doublets and hyperfine structure recorded digitally by the Signal Analyzer and Sampler on the Active satellite, Journal Geophys. Research, 96, 21, 149-21, p.158.
- [9] Lichtenberger, J., Bodnár L., Ferencz Cs., Ferencz O.E., Hamar D. and Steinbach P. (2001), Automatic whistler detector, First results, IAGA IASPEI, G2.07, 2001, Hanoi, Vietnam, p.124.
- [10] Lichtenberger, J., Ferencz E.O., Bodnár, L., Ferencz, Cs. és Steinbach, P. (2006), Változóban a Föld-képünk, Híradástechnika, LXI., 2006/4, pp.51–53.
- [11] Lichtenberger, J., Ferencz, Cs., Hamar, D., Steinbach, P. and Bodnár, L. (2007), Automatic whistler detector and analyzer system, Geophys. Res. Abs., 6, 01390.



# A BepiColombo űrszonda adatgyűjtő és vezérlő rendszere

SULYÁN JÁNOS, SZALAI LAJOS

KFKI Részecske és Magfizikai Kutatóintézet, {sulyan, szlajos}@rmki.kfki.hu

LIPUSZ CSABA, SZALAI SÁNDOR

SGF Kft., lipusz.csaba@freemail.hu, szalai@sgf.hu

**Kulcsszavak:** űrszonda, adatgyűjtő, beágyazott processzor, buszrendszer, SpaceWire

A BepiColombo űrszondában való magyar részvétel kapcsán röviden ismertetjük a Merkúrhoz induló programot. Ezen a szondán kerül alkalmazásra egy új adatgyűjtő és vezérlő buszrendszer; a SpaceWire. Ennek az űreszközök fedélzeti adatátvitelére kidolgozott szabványnak az előnyeit ismerteti és rövid összefoglalóját tartalmazza a cikk.

## 1. Bevezetés

A BepiColombo az Európai Űrügynökség (ESA) első űrprogramja a Merkúr bolygó kutatására, a programot dr. Giuseppe (Bepi) Colombo olasz asztrofizikusról nevezték el, aki a gravitációs hintamanőver elvét dolgozta ki, azaz az űrszondák gyorsítását a bolygók melletti elhaladás révén. A program keretében két űrszonda készül: Mercury Planetary Orbiter (MPO) és Mercury Magnetospheric Orbiter (MMO). Az MMO alapvetően a japán űrkutatók fejlesztése, míg az MPO az európai kutatók együttműködésében készül [1,2].

A KFKI Részecske és Magfizikai Kutatóintézet valamint az SGF Kft. a SERENA (Search for Exospheric Refilling and Emitted Neutral Abundances) rendszer PICAM (Planetary Ion Camera) érzékelőjének a fejlesztésében vesz részt. A SERENA rendszer négy érzékelőt tartalmaz, melyek a Merkúr exoszférájának folyamatait fogják vizsgálni. Az SGF Kft. feladata a PICAM műszer földi ellenőrző berendezésének fejlesztése, melynek az űrszonda parancsait illetve a PICAM mérési adatait kell fogadni és megjeleníteni.

A bolygóközi űrszondák a különböző tudományos kísérletek műszerei számára a biztosítják a megfelelő működtetési feltételeket, azaz energiaellátást, viszonylag elviselhető működési hőmérsékleti ( $-60^{\circ}\text{C} \div +100^{\circ}\text{C}$ ) tartományt, vezérelhetőségét (földi parancsok továbbítását), valamint a mérési adatok begyűjtését és a Földre való továbbítását. Az utóbbi két feladat szokásos vezérlő és adatgyűjtő rendszernek felel meg. A bolygóközi űrszondák egyik legszigorúbb követelménye a súlyminimalizálása, ezért a különböző szondákon a súlyminimalizálás elsődleges céljából – és figyelembe véve a Földdel való rádiókapcsolat átbocsátó képességét –, különböző egyedi adatgyűjtő rendszerek kerültek alkalmazásra. Ez ellentmond az egységes szabvány alkalmazásának, amely kizárja a tudományos műszerek újrafelhasználhatóságát. A múltban is történtek törekvések szabványok alkalmazására, így például a NASA-nál több szondán is alkalmazta a Mil-1553-as repülőipari busz szabványt. Az ESA a jövő szondáin alkalmazásra kerülő buszrendszert, a SpaceWire-t választotta a BepiColombo szondára.

## 2. A BepiColombo űrszonda

Az MMO és az MPO orbiterek egy egységként startolnak 2013-ban, majd hatévi utazás és több hintamanőver után 2019-ben válnak szét és állnak pályára a Merkúr körül. Az út során a szonda ionhajtóművet fog használni és egyszer a Hold, kétszer pedig a Vénusz mellett is elhalad. A szonda csak az út legvégén válik szét, ekkor elhagyják az ionhajtóművet, majd a két egység különböző pályára áll a bolygó körül.

Az MMO-nek elnyúlt poláris pályát választottak, ami a Merkúr mágneses terének feltérképezéséhez és dinamikájának megfigyeléséhez alkalmas, az MPO viszont alacsonyabb körpályára áll, mivel ennek feladata a felszín és a magas légkör vizsgálata. Az MMO a SERENA rendszeren kívül kamerákat, infravörös-, ultrabolya- és röntgen-spektrométereket, lézeres magasságmérőt, rádiókísérletet és gyorsulásmérőt visz a fedélzetén. A műszerek évente több mint másfél terabit mérési adatot gyűjtenek, amit 50 kbit/s-os adatátviteli sebességgel sugároznak majd a Föld felé.

Az adatgyűjtő és a kommunikációs egységekről általában nem sok szó esik az űreszközökről szóló hírekben, sőt a szondáról szóló publikációkban sem, mégis szinte a legfontosabb eszközök, hisz ezek hibája a teljes küldetést tönkretelheti. Az adatgyűjtő rendszer feladata nemcsak a kísérletek adatainak összegyűjtése, tárolása és továbbítása, hanem az egész rendszer működésének összehangolása, ellenőrzése. Mivel minden szonda egyedi, speciális feladatra szánt adatgyűjtő rendszert kell fejleszteni hozzá. Ennek a rendszernek minden kísérlettel kapcsolatot kell tartania, így nagyon fontos, hogy milyen interfészen keresztül kommunikálnak. A gyakran különböző fejlesztések költségesebbé és nehezebben kezelhetővé tették a nagyméretű, általában különböző nemzetek által fejlesztett modulokból álló űrszisztemeket.

A szondán három típusú adatgyűjtő és vezérlő rendszer lesz alkalmazva: SpaceWire interfész a viszonylag nagy adatforgalomra, a Mil-1553 zajérzékenyen csak a rádiós kísérlet vezérlésére, harmadikként pedig a csak monitorozást szolgáló rendszer, amely a műszerek álla-

potát jellemző hőmérsékleti adatokat lassú mintavételezéssel gyűjti. A továbbiakban a SpaceWire alkalmazását részletezzük.

### 3. A SpaceWire, mint megoldás a problémákra

A SpaceWire az ESA által kifejlesztett kommunikációs szabvány, melyet űreszközök fedélzetén kívánnak használni [3]. Ezért az ESA létrehozta az ECSS-E-50-12A szabványt, amely a korábbi lassú (1 Mbit/s), nagyobb fogyasztású, korlátozottabban használható (maximum 32 végpont) Mil-1553-as szabványt hivatott felváltani [4].

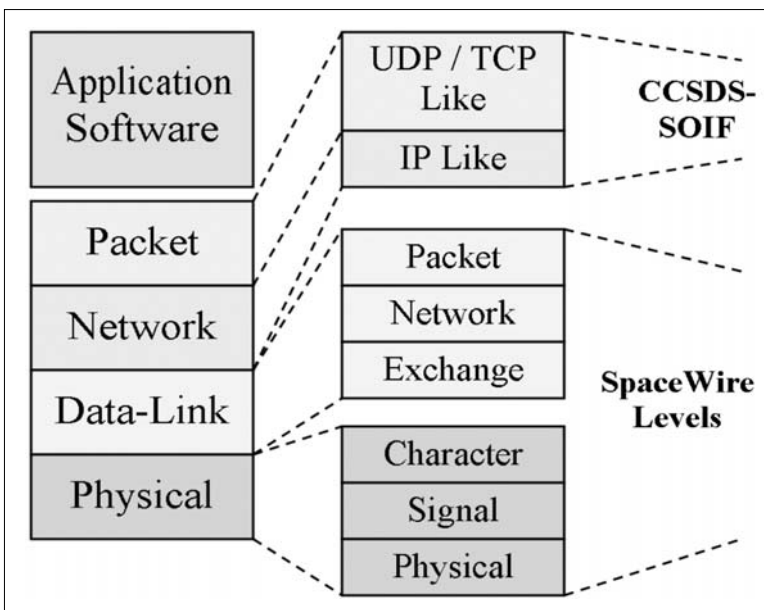
A SpaceWire-nek sokféle feladatra kell megfelelnie. Egyre fontosabb szempont a nagy adatátviteli sebesség és a kis energiateljesítmény, hiszen napjainkban egyre messzebb küldenek űrszondákat, melyek kamerái igen nagy adatmennyiséget produkálnak. Fontos a bővíthetőség, a megbízhatóság és a kompatibilitás. A SpaceWire kis méretű hardvert igényel, valamint egyszerű kábelezést és könnyű szoftveres kezelést tesz lehetővé.

#### 3.1. A SpaceWire tulajdonságai

A SpaceWire szabvány egy olyan hálózati interfészt definiál, mely az OSI modell alsó két rétegét, a fizikai (physical layer) és az adatkapcsolati (data-link layer) réteget fed le (1. ábra).

A felsőbb rétegeken módosított UDP és TCP protokollok működhetnek IP alapú hálózati rendszer felett. Ennek neve SpaceWire Networking Protocol és egye-

1. ábra  
OSI modell és a SpaceWire rétegek

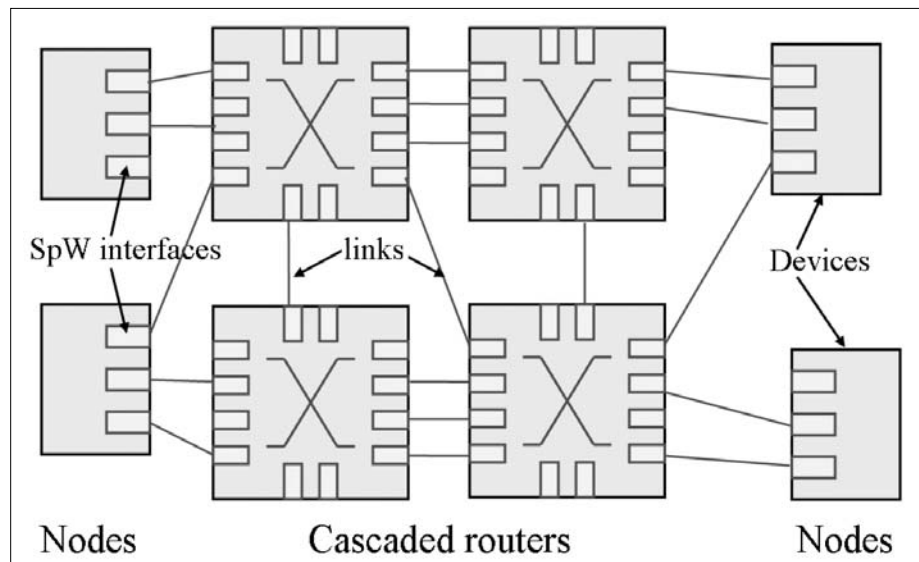


lőre fejlesztés alatt áll, de mindez nem hátráltatja a szabvány alkalmazását, hiszen már több űrszonda is ezzel készült. Sikerét az is jelzi, hogy a NASA is használja egyes misszióiban.

További lehetőségeket nyújthat a TopNet (Technology for On-board Processing in a Network with Extended Throughput) rendszer, amely elképzelés szerint a SpaceWire hálózattal készülő eszközöket egy kapugépen keresztül közvetlenül el lehet érni az Internettel, így a fejlesztést távolról is segíthetik, illetve így is lehet modulokat csatlakoztatni a szondához tesztelési célokkal.

Egy SpaceWire hálózat csatolóelemekből (linkekből), végpontokból (node-okból) és útválasztókból (routerekből) áll. Az egyes node-ok pont-pont kapcsolatban állnak egymással. Kommunikációjuk kétirányú, full-duplex, 2-200 Mbit/s adatátviteli sebességű linkeken történik, a hálózatot a routerek kapcsolómátrixként kötik össze (2. ábra).

2. ábra  
A SpaceWire hálózat felépítése



Mint az 1. ábrán is látható, a SpaceWire további hat rétegre bontható.

A *fizikai szint* (physical level) a kábeleket, csatlakozókat, a *jelszint* (signal level) a vezetékeken futó elektromos jeleket és ezeknek logikai megfelelőit, a *karakterszint* (character level) pedig a kommunikáció elemeit írja le. Az *adatkapcsolati szint* (exchange level) a link működését, a *hálózati szint* (network level) a hálózati topológiát, végül a *csomagszint* (packet level) az egyes csomagok struktúráját definiálja.

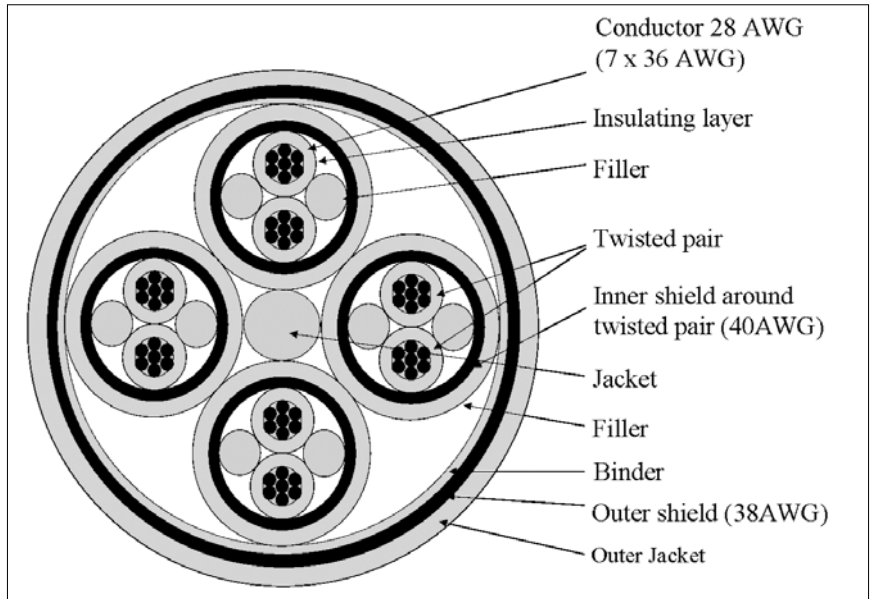
#### 3.2. Fizikai szint (Physical Level)

A jó zajvédetség miatt árnyékolt, sodort érpárokat használnak. Egy kábelben összesen nyolc ér fut párosával sodorva, árnyékolva, majd ezt a négy érpárt újabb árnyékolás védi (3. ábra).

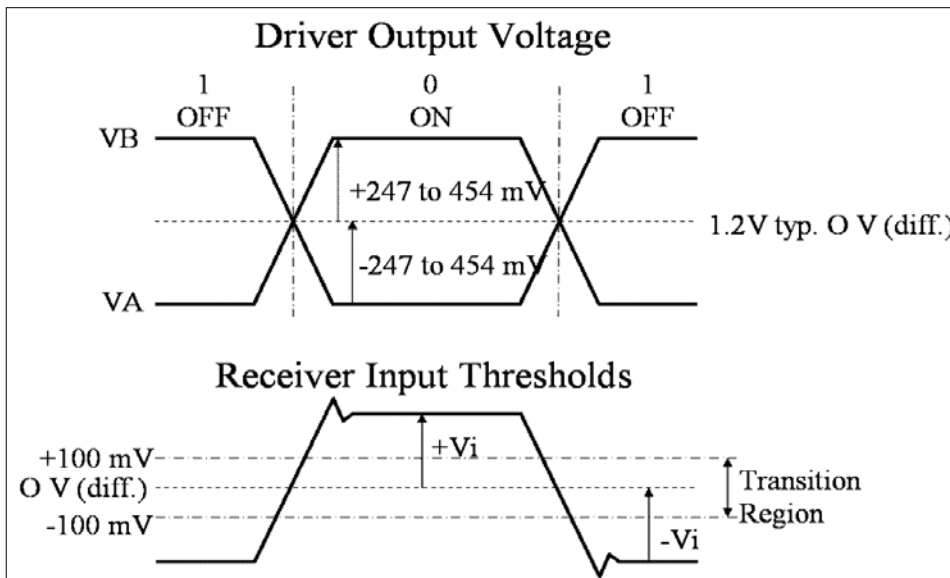
A kábelvégeken 9 tűs mikro-miniatúr D csatlakozót használnak. A kábelek hossza 10 méter lehet, ezen felül már nem biztosítható a maximális adatátviteli sebesség (400 Mbit/s), de a sebesség csökkentésével a kábelhossz akár 100 méterig is növelhető.

**3.3. Jelszint (Signal Level)**

A jó átvitel és a kis EM sugárzás érdekében a jelkódolást is megfelelően kellett kialakítani, ezért esett a választás az LVDS-re (Low Voltage Differential Signalling – kisfeszültségű differenciális jelkódolás). Az LVDS egy jelet két vezetéken visz át, melyek ellenütemben dolgoznak (4. ábra).



3. ábra  
A SpaceWire kábel



4. ábra  
LVDS jelszintek

5. ábra  
Data-strobe kódolás

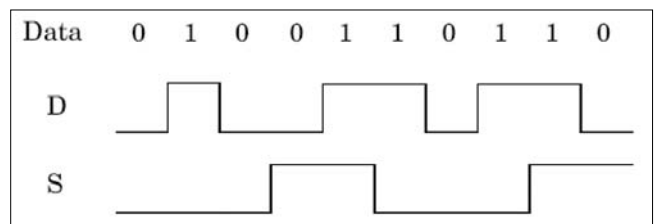
Jelenként 3,5 mA áramfelvétellel számolhatunk, az az kábelenként 14 mA-t vesznek fel a meghajtó áramkörök, így a teljesítményfelvétel körülbelül 50 mW lesz, ami jóval kedvezőbb a korábbi ECL és PECL meghajtó áramkörök 120 mW körüli fogyasztásánál.

Az adatokat soros módon Data-Strobe (adat-enge-délyező) kódolással továbbítják. Ez a kódolás két jel-vezetéken (data és strobe) történik úgy, hogy az adatvonalon az adat legalacsonyabb bitjével kezdve sorosan kiküldésre kerül és a strobe vonalon akkor változik a jel, ha az adatvonal nem változott (5. ábra).

Így egy egész bitidőnyi csúszás (skew) engedhető meg a két jel között, szemben az órajeles megoldás fél bitidős skew toleranciájával. A vételi órajelet a D és S jelekből XOR logikai művelet segítségével kaphatjuk. Ekkor az órajel lefutó és felfutó élénél is egy-egy bejövő adattal kell számolni.

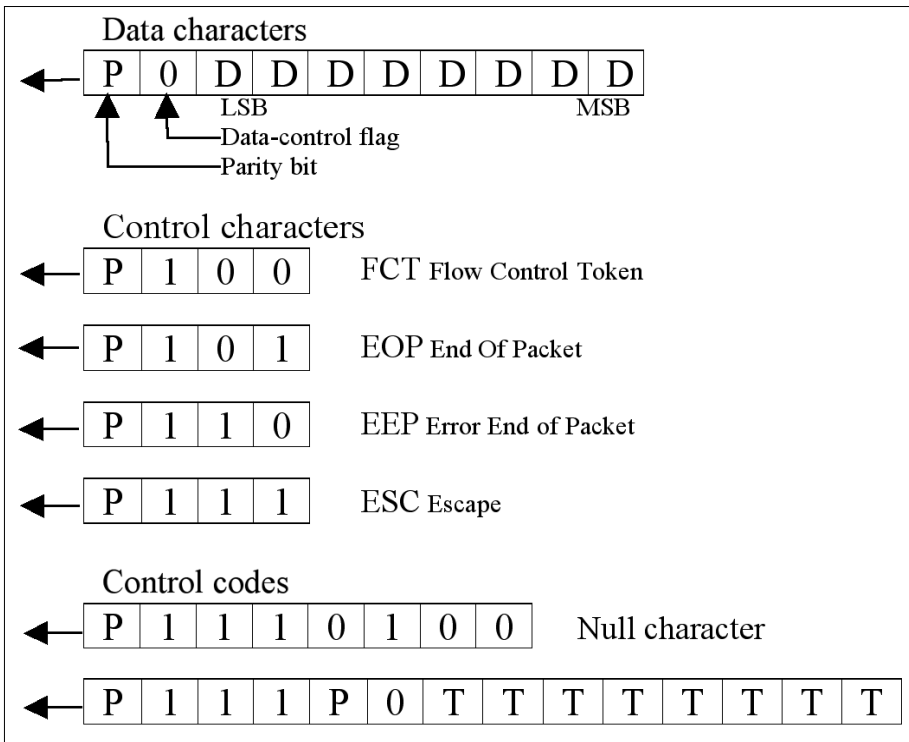
**3.4. Karakter szint (Character Level)**

A SpaceWire kétféle karaktertípust definiál, az adat- és a vezérlő karaktereket. Az adatkarakterek tíz, a ve-



zérlő karakterek négybitesek, paritásbittel védettek. Összesen négy vezérlő karakter létezik, ezek az adatfolyam irányítására valók. Szükséges még két vezérlőszó is, melyek az előbbi karakterekből épülnek fel. A Null-karakter a link fenntartásához kell, a Time-Code karakter pedig az óraszinkronizálásnál használható. A karakterek felépítése a 6. ábrán látható.

Érdekes a paritás generálása is, ugyanis a páratlan paritás nem az aktuális karakter bitjeit fedi, hanem az adatkarakter utolsó 8, vagy az előző vezérlő karakter utolsó 2 bitjét, valamint az aktuális karakter Data-control flagét. A Data-control flag, vagyis adat-kontrol jel mutatja meg, hogy az aktuális karaktert adatként, vagy vezérlő jelként kell-e értelmezni.



Az inicializálás során a végpontok Null-karaktereket küldenek, majd FCT-vel (Flow Control Token – adatfolyam vezérlő jel) nyugtázzák, ha a másik végponttól Null-karakteret fogadtak. Az ekkor küldött FCT-k száma a vevőoldali puffer méretére utal, minden kiküldött FCT 8 byte puffer méretet jelent. A maximális pufferméret 56 byte, ami 7 FCT kiküldését jelenti. Később minden 8 fogadott adatkarakter után egy újabb FCT kerül kiküldésre, ha a vevő pufferében van 8 karakternyi szabad hely.

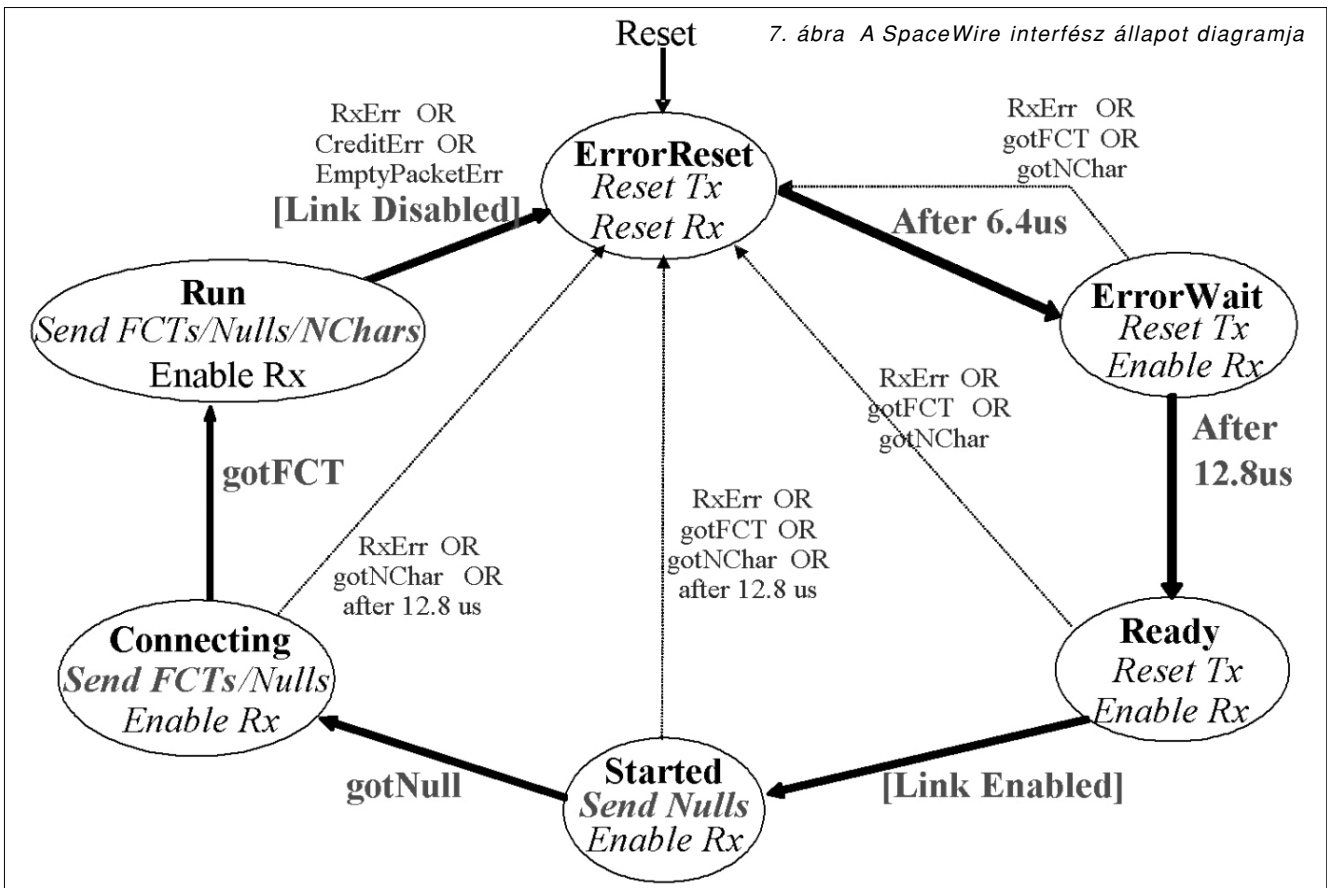
Ezzel a *Flow control*-al biztosítható, hogy a vevő mindig képes legyen az adatok fogadására, a végpontok ugyanis számolják a fogadott FCT-eket és a küldött adatokat, így rögtön kiderül, ha a túlóldali vevő puffere megtelt.

6. ábra SpaceWire karakterek

### 3.5. Adatkapcsolati szint (Exchange Level)

Ez a réteg építi fel és tartja fenn a kapcsolatot a két végpont között. Feladata a link inicializálása, az adatátvitel nyomon követése, a hibák felderítése és javítása.

Az adatátvitel során pillanatnyi zaj, vagy a data vagy strobe jelek váratlan elcsúszása (skew) miatt paritáshiba léphet fel. Az egybites paritás egy bitnyi hiba detektálására alkalmas, de ez elég is, mert az erősen védett linken igen valószínűtlen egy karakterben 2 bithiba előfordulása. Ennek felderítése viszont már a felsőbb pro-



tokollok feladata. További hibajelenség a Disconnect error (kapcsolatbomlási hiba), mely akkor lép fel, ha a bemeneti vonalak (data és strobe) egyikén sincs változás 850 ns-ig. Ez határozza meg a legkisebb adatátviteli sebességet is, ilyen hiba akkor következhet be, ha az egyik végpontban szoftverhiba lép fel vagy váratlan újraindítás történik. További hibák is felléphetnek, például egy csatlakozó rossz illeszkedése esetén, ha csak az egyik vezeték hibás, akkor sem épülhet fel a kapcsolat, vagy ha ez menet közben következik be, paritáshiba keletkezik. Egyetlen eset lehetséges, amikor a strobe vonal szakadása nem okoz hibát, ha egy adatkarakter küldése közben történik. Ekkor a vevő folyamatos „AA” adatot vesz.

Létrejöhetnek még a protokollt érintő hibák is, melyek kényes pillanatokban bekövetkező adatátviteli hibákra, vagy az egyes végpontok hibás működésére hívhatják fel a figyelmet.

A link működését egy állapotgép vezérli, melynek egyszerűsített diagramja az előző oldali 7. ábrán látható.

Egy kapcsolat inicializálása a következő képen történik: a link bekapcsolás vagy bármely hiba után Error-Reset állapotba kerül, majd idővel, ha a link engedélyezve van és nem keletkezik hiba, eljut a Started állapotig, ahol megkezdődik a Null karakterek küldését. Ha a másik oldal is eljutott ebbe az állapotba és fogadjuk az onnan jövő Null-t, akkor a Connecting fázis következik, mikor FCT karakterek segítségével megállapodnak a végpontok a puffer-méreteken és máris Run állapotba kerülnek, ami a kapcsolat további teljes időtartama alatt fennáll.

Bármely fellépő hiba a link lebomlásához, majd újrakapcsolódáshoz vezet, ez a folyamat elvileg rejtett is maradhat a felsőbb rétegek előtt, feltéve, ha épp nem történik adatátvitel, ezért az inicializálás során fellépő hibák nem is kerülnek jelentésre. Ha viszont adatküldés során lép fel egy hiba, akkor az épp küldés alatt álló adatcsomag hátralévő részét el kell dobni, küldését folytatni nem szabad. Ekkor a vevőoldalon a csomag fogadása nem fejeződik be, hibajelöléssel ellátva jelenteni kell, hogy a packet sérült, hiányos. EEP karaktert akkor kell küldeni a másik node-nak, ha a packet adását valami miatt (például felhasználói megszakítás) leállítjuk. EEP karaktert fogadhatunk akkor is, ha a kapcsolat rou-

teren keresztül jött létre és a hiba a router és a távoli node között jött létre. Ekkor az EEP karaktert a router generálja.

### 3.6. Csomagszint (Packet Level)

A csomag egy olyan struktúra, mely címből, törzsből és csomag vége jelből áll:

`<address><cargo><EOP>`

A csomag a linken egy adat-karakterrel kezdődik, és EOP (End of Packet – csomag vége) vagy EEP (Error End of Packet – hibás csomagvég) kontrol-karakterrel végződik. A cím több részből is állhat, ezek egymás után vannak felsorolva. Az utolsó címet a törzs első byte-ja követi. A csomag törzsére nincs korlátozás, mérete tetszőleges lehet, a SpaceWire fölött futó protokoll határozza meg. A csomagot lezáró EOP vagy EEP utáni első adat-karakter már a következő packet elejét jelenti.

A BepiColombo esetében a cargo egy protokoll azonosítót, két kitöltő bájtot (zéro értékűt), valamint a egy telemetria (TM) vagy egy telecommand (TC) csomagot tartalmaz. A csomagok a Consultative Committee for Space Data System (CCSDS) által kidolgozott szabvány szerinti struktúrával rendelkeznek [5]. A TM csomag egy fejrészből és adatrészből áll, az adatrész maximum 4112 bájtot tartalmazhat. Ilyen csomagban érkeznek a tudományos adatok, és a rendszer állapotát leíró, úgynevezett housekeeping adatok. A telemetria csomagok adatmezőjének fejléce tartalmaz egy 48 bites időkódot, ami elengedhetetlen a különböző érzéklők által gyűjtött adatok együttes elemzéséhez.

A TM struktúráját a 8. ábra mutatja be. A TC csomag három részből áll, a fejrészt a maximum 246 bájtos hosszúságú adat mező követi, végül pedig az ellenőrző összeget tartalmazó adat következik (9. ábra). A telecommand csomag általában a földről felküldött parancsokat tartalmaz, de a fedélzeten lévő autonóm rendszerek vagy időzítők is generálhatnak ilyen packeteket.

### 3.7. Hálózati szint (Network Level)

A SpaceWire hálózat pont-pont jellegű, de az egyes node-ok nincsenek minden másikkal összekötve, hanem kaszkád router-hálózaton keresztül kapcsolódnak. Az egyes node-ok rendszerint több SpaceWire interfésszel rendelkeznek, melyek egy vagy több routerhez

8. ábra  
A TM csomag  
struktúrája

Packet Header (48 bits)			Packet Data Field (variable)	
Packet ID	Packet Seq. Contol	Packet Length	Data Field Header (time code 48b)	Source Data
16 bits	16 bits	16 bits	80 bits	variable <4112

9. ábra  
A TC csomag  
struktúrája

Packet Header (48 bits)			Packet Data Field (variable)	Packet Error
Packet ID	Packet Seq. Contol	Packet Length	Data Field Header	Error Code
16 bits	16 bits	16 bits	32 bits	variable <246 16 bits

csatlakoznak (2. ábra). Egy űreszköz hálózatának felépítésénél fontos szempont a megbízhatóság, ezért minél nagyobb redundanciát érdemes beleépíteni. A routerek közti többszörös kapcsolat a hálózat áteresztőképességét is növeli, így a nagyobb adatmennyiséget produkáló kísérleteknek még nagyobb sávszélesség biztosítható.

Az egyes végpontok kétféle címezéssel érhetők el. A fizikai címezés (path addressing, hardware addressing) a hálózat tényleges felépítéséből adódik, ez a cím a routerek kimeneti portjai azonosítóinak sorozatából áll. Logikai címezés (logic addressing) esetén minden végpont egyedi azonosítót kap, ebben az esetben a cím csak ebből az azonosítóból áll és a routerek egy táblázat szerint (routing table) választják ki portjaikat. Nagyobb hálózatok esetében, vagy ha a fizikai felépítés ismeretlen, a logikai címezés használata az előnyös. Ekkor használható a regional addressing (régional címzés), mely voltaképp logikai címezés. Ebben az esetben a fizikai címezéshez hasonlóan a cím több részből áll és az egyes alhálózatokat (régiónkat) összekötő routerek kitörlik a cím elején az őket azonosító logikai címet. Így elvileg tetszőlegesen sok végpontot tartalmazó hálózat jöhet létre. Előfordulhat azonban, hogy az egyik router adott portját már egy másik link lefoglalta, ezen segíthet logikai címezés esetén a Group adaptive routing. Ekkor két router közt nem a routing table szerinti kapcsolat jön létre, hanem egy szabad portot választanak ki.

Meg kell említeni, hogy elvileg egy aktív link folyamatosan lefoglalja a résztvevő node-okat, routereket. Ez viszont felesleges sávszélesség-csökkenést jelenthetne, hisz így a routerek közti kisebb számú csatlakozást helykitöltő null-karakterek forgalmazásával terhelnék. A wormhole routing eljárás lehetővé teszi, hogy egy ilyen link csak akkor legyen foglalt, amikor a végpontok közt tényleges kommunikáció van, azaz épp egy packet küldése folyik. Az egyes node-ok elől ez el van rejtve, ha a vonal épp foglalt, akkor a router puffert töltheti meg, majd szünetelteti az adást, míg FCT-t nem kap.

Űreszközökön általában megfelelő a fizikai címezés, hisz viszonylag kevés a végpont, és pontosan ismert a fizikai struktúra, de igen hasznos lehet, ha a fejlesztés során az egyes eszközök szélesebb, dinamikusan változó hálózatról is elérhetők.

#### 4. Összefoglalás

A SpaceWire hálózat előnyei más rendszerekkel szemben onnan fakad, hogy kifejezetten űreszközök fedélzeti kommunikációjához fejlesztették ki, az ottani igényeknek megfelelően. Redundanciájának köszönhetően akkor is teljes működést tud biztosítani, ha egyes eszközök meghibásodnak, kicsi a teljesítményfelvétele, sávszélessége széles határok közt akár menet közben is változtatható, kis válaszidőt és késleltetést ad, full-duplex működést biztosít és modulárisan bővíthető. Az adaptive és a wormhole routingnak köszönhetően jóval

nagyobb lehet a teljes hálózat áteresztőképessége, mint egy ethernetes hálózaté. Hardverigénye kicsi, és egyszerű szoftverekkel lehet a meglévő protokollokhoz illeszteni.

További nagy előnye, hogy kompatibilissé tette az eszközöket, így nem kell ugyanazokat a funkciókat el látó modulokat, mint az adatgyűjtő rendszer és a háttértárak, minden űreszközhöz újra megtervezni, megépíteni, és ezzel jelentős költségcsökkenés érhető el.

#### Köszönetnyilvánítás

A BepiColombo misszióban való részvétel az ESA PECS irodájánál elnyert pályázatok, valamint az MTA támogatásával valósul meg. Az ennek során szerzett ismeretek alapján készülhetett el jelen cikkünk.

#### A szerzőkről

**Sulyán János** 1962-ben végzett a BME Villamosmérnöki Kar Híradástechnikai szakán – KFKI ösztöndíjasként. A KFKI-MSZKI-ban kommunikációs illesztők és lokális, laboratóriumi hálózatok fejlesztésével, valamint kisgép-nagygép összekapcsolására szolgáló illesztőegységek létrehozásával foglalkozott. 1990-től a KFKI RMKI-ban űrszondák tudományos berendezéseinek földi bevizsgálására szolgáló eszközök és fedélzeti elektronikák fejlesztésében vett részt. Nyugdíjasként az SGF Kft-nek fejleszt beágyazott rendszereket.

**Szalai Lajos** 2003-ban végzett a BME Villamosmérnöki Karán Beágyazott rendszerek szakirányon. 2004-től a KFKI Rézecske és Magfizikai Kutató Intézetben fejlesztőmérnök. Ezidáig többek között USB és SpaceWire interfészek fejlesztésével és kezelésével foglalkozott, jelenleg a fedélzeti tápegységek tervezése, illetve a BepiColombo-hoz fejlesztett SpaceWire interfész alsóbb rétegeinek megvalósítása volt a feladata.

**Lipusz Csaba** 1986-ban végzett fizikus szakon az ELTE TTK-n. A hardverközeli programozás és az informatikai rendszerek technikai architektúrájának fejlesztése olyan területek, melyeken pályafutása során több évet dolgozott. Jelenleg fedélzeti adatgyűjtő berendezések real-time Linux operációs rendszereivel és illesztő kártyák device drivereinek fejlesztésével foglalkozik.

**Szalai Sándor** 1962-ben villamosmérnöki, 1967 folyamatszabályozási szakmérnöki oklevelet szerzett a BME-n. Kezdetben a nukleáris elektronika területén, majd 1980-tól az űrkutatás területén fejlesztett vezérlő és adatgyűjtő rendszereket. Az első munkái hardver, majd később hardverközeli szoftver-fejlesztések, valamint rendszertervezés voltak. 1977-ben kandidátus, 1992-ben a műszaki tudomány doktora lett. 1977-től a KFKI RMKI-ban dolgozik, tudományos tanácsadó. 1996-tól az SGF Kft. ügyvezető igazgatója.

#### Irodalom

- [1] ESA Science & Technology – BepiColombo Homepage  
<http://sci.esa.int/science-e/www/area/index.cfm?fareaid=30>
- [2] ESA Research and Scientific Support Department – BepiColombo Homepage  
<http://www.rssd.esa.int/index.php?project=BEPICOLOMBO>
- [3] ESA SpaceWire Homepage  
<http://spacewire.esa.int>
- [4] ECSS-E-50-12A Spacewire – Links, nodes, routers and networks, 2003.01.24.
- [5] CCSDS 850.0-G-1  
Spacecraft Onboard Interface Services.  
Green Book, Issue 1, June 2007.

# Passzív űrdozimetria magyar részvétellel

DUDÁS BEÁTA, SZABÓ JULIANNA, PÁLFALVI JÓZSEF

MTA KFKI Atomenergia Kutatóintézet  
dudbea@aeki.kfki.hu

**Kulcsszavak:** dozimetria, szilárdtest nyomdetektor, kozmikus sugárzás, ISS (Nemzetközi Űrállomás)

Ebben a cikkben két űrkutatással foglalkozó projektről lesz szó, név szerint a jelenleg is zajló MATROSHKA és BIOPAN programokról, amelyek évek óta nemzetközi összefogással, köztük magyar részvétellel folynak az Európai Űrkutatási Ügynökség (ESA) irányításával és az orosz Orvos-biológiai Problémák Intézetével (IBMP) együttműködve. A MATROSHKA projekt egy emberszerű fantom felhasználásával a kozmikus sugárzás okozta dózisterhelés eloszlásának meghatározását tűzte ki célul. A BIOPAN kísérletsorozatban űrbiológiai folyamatok vizsgálata és ezek dozimetriai támogatása volt a feladat Földre visszatérő műholdak segítségével, az ISS-hez közeli orbitális pályán. A kutatócsoportunk passzív, szilárdtest nyom- és termolumineszcens detektorokkal szerepel ezekben a kísérletekben. Az űrbeli mérések előkészítéséhez földi szimulációs kísérleteket, besugárzásokat végeztünk a többi résztvevővel közösen, különböző részecskegyorsítók alkalmazásával.

## 1. Bevezetés

Az űrkorszak 50. évfordulójának ünneplése során országsszerte számos kiállítás nyílt és megemlékezés történt, így a magyar polgárok is szembesülhettek az űrkutatás fontosságával és a használt technológiák terjedésével. Ez a kutatási terület folyamatosan jelen van a tudományban, sőt még a mindennapi életünkben is, gondoljunk csak a legmodernebb ágymatracokra. Az űrkutatás régi és új technológiák tökéletesítésére, illetve felmerülő problémák megoldására törekszik, mint például a hordozórakéták meghajtásának problémája vagy épp az űrturizmus kérdése. Itt kell bevezetnünk az űrdozimetria témakörét is, amely egyre inkább előtérbe kerül a meghosszabbodott és gyakoribb űrutazások miatt.

Ez a tudományág a kozmikus sugárzás (világegyetemből érkező ionizáló hatású, nagy energiájú részecske- és elektromágneses sugárzás) mérésével, feltérképezésével foglalkozik főleg az ISS-en, de más űrben keringő objektumok esetén is. A földfelszínen a természetes eredetű sugárterhelésnek igen magas hányadát, 17 %-át a kozmikus sugárzás adja. Itt fellép a Föld mágneses terének és a légkörnek jótékony védő hatása, ami azonban a magasság növekedésével folyamatosan csökken és 400 km magasságban, ahol az ISS kering, már nem érvényesül ez a védőmechanizmus. Az űrhajósokat akár százszorosan nagyobb sugárzás érheti, mint a földi lakosságot, ezért az űrexpedíciók során a sugárvédelmi feladatok ellátására mindig nagy hangsúlyt fektetnek.

A sugárvédelemben a sugárzás mennyiségét a dózissal jellemezzük. Az abszorbeált dózis azt mutatja meg, hogy a sugárzás egységnyi tömegű anyagban mennyi energiát adott le (mértékegysége a gray, 1 Gy = 1 joule/kg). Az ekvivalens dózis ezen felül súlyozottan figyelembe veszi a sugárzás összetevőinek fajta- és ener-

giafüggő biológiai hatását egy adott anyagban, egy úgynevezett minőségi tényező alkalmazásával; mértékegysége a sievert (Sv). Példaként az ISS belsejében kialakuló elsődleges és másodlagos kozmikus sugárzás biológiai hatása az emberi szövetekre mintegy 2,5-szerese a diagnosztikai röntgensugárzásnak (más szóval az átlag minőségi tényező 2,5).

A kozmikus sugarak a Galaktikából és a Napból származnak, összetevőik nagyrészt protonok, alfa-részecskék és ezeknél nagyobb rendszámú ( $Z > 2$ ), nagyenergiás ( $E > 10$  MeV) töltött részecskék (HZE), valamint fotonok. A galaktikus sugárzás (GCR) többé-kevésbé állandó, míg a Napból származó, szoláris sugárzás intenzitását a napkitörések erősen befolyásolják: ilyenkor a protonsugárzás fluxusa erősen megnő. A kozmikus sugárzást a részecskék anyagban történő lineáris energiaátadása (LET, mértékegysége  $\text{keV}/\mu\text{m}$ ) szerint szokásos két csoportba osztani. A kis LET értékű csoportba a  $\sim 10$   $\text{keV}/\mu\text{m}$  alatti fotonok, elektronok és nagyenergiás protonok tartoznak, ezt a tartományt úgynevezett termolumineszcens detektorokkal (TLD) célszerű mérni. Az ennél nagyobb energialeadási képességgel rendelkező, tehát a nagy LET értékű csoportba tartozó részecskéket pedig szilárdtest nyomdetektorokkal regisztrálhatjuk. A TLD-k és a nyomdetektorok a passzív, vagyis detektálás közben energiaellátást nem igénylő detektorok közé tartoznak. Kis méretük miatt akár az űrhajós ruhájába is elhelyezhetőek, például egy űrséta alkalmával.

Az AEKI sugárvédelmi kutatócsoportja 1975 óta foglalkozik töltött részecskék szilárdtest nyomdetektorral történő vizsgálatával, és 2000-től a Nemzetközi Űrállomás kozmikus sugárzás eredetű dózisviszonyainak kutatásával. A következőkben bemutatjuk a magyar kutatócsoport által használt technikákat és megismertetünk az olvasóval két űrdozimetriai projektet (MATROSHKA és BIOPAN).

## 2. Az alkalmazott detektorok

A TLD-k működésének részletes leírását megtalálhatják Apáthy István „Sugárdózis-mérés égen és földön” című, a Híradástechnikában 2004-ben megjelent cikkében [1]. Röviden: a termolumineszcens anyagban valamilyen sugárzás által bevitt energia a kristályszerkezetben hosszan megőrződő, de visszafordítható változást hoz létre. Az anyag kiértékeléskor több száz fokok felmelegítés hatására a kapott dózissal arányos, mérhető fényt bocsát ki, amelyet alkalmas eszközzel – úgynevezett kiolvasóval –, mint például a „hungarikumnak” számító PILLE készülékkel [1] mérni lehet.

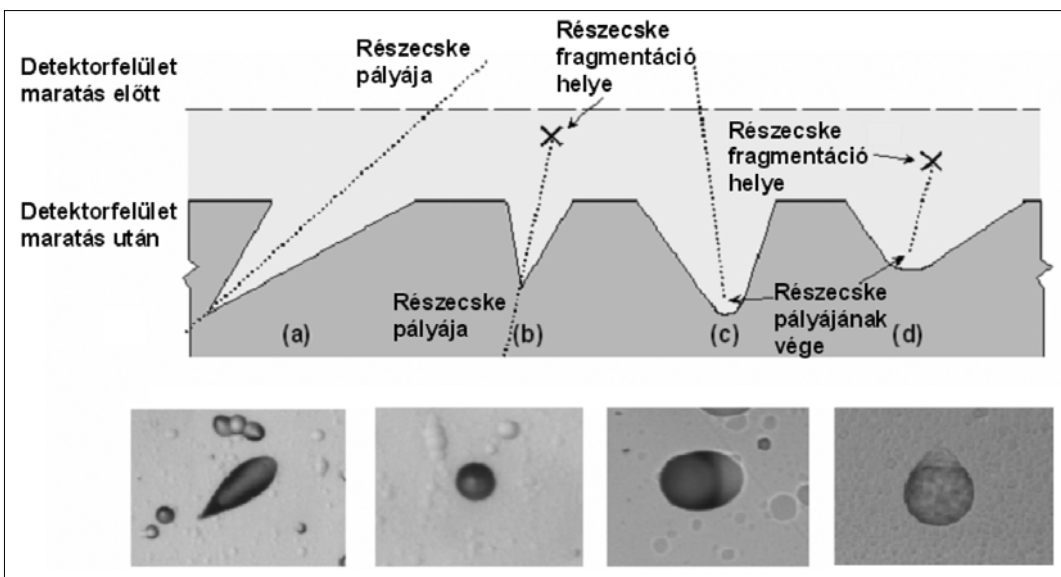
A szilárdtest nyomdetektorok az elektromosan töltött, ionizáló részecskéket képesek detektálni, amelyek szigetelő anyagokon való áthaladásukkor pályájuk mentén keskeny (3-10 nm szélességű) rombolt zónát hoznak létre. Ez kristályos anyagokban különböző rácshibák létrejöttéhez, míg műanyagokban a kémiai kötések felszakadásához, szabad gyökök keletkezéséhez vezet. Bizonyos kémiai reagensek ezeket a rombolt zónákat nagyobb sebességgel oldják vagy „marják”, mint az illető anyag nem rombolt részeit. Így a keskeny roncsolt zónát a maratószer kiszélesíti, egy kúpszerű mélyedést, szakszóval nyomot hoz létre. Ha a nyom kellően nagy méretet ér el, optikai mikroszkóp segítségével láthatóvá válik [2].

Az 1. ábra kinagyított nyomfelvételein láthatjuk, hogy egy adott idejű maratás során az (a) és (b) esetben a maratószer nem érte el a részecske pályájának végét, így a nyomok alakja hegyes, kúp formát ölt. A (c) és (d) nyomüregben ezzel ellentétben gömbszerű bemélyedés alakult ki a detektorban, mivel a maratás elérte a részecskepálya végét, a részecskék rövid hatótávolsága miatt. A (b) és (d) rajzokon a nyomot hagyó részecske a detektor anyagában széthasítás, fragmentáció révén keletkezett, ilyenkor a céltárgyat, targetet alkotó részecske magreakció során több részre esik szét, például nagy energiás neutronnal vagy protonnal történő bomlásakor. Kimaratható nyom akkor jön létre, ha a töltött

részecske pályája mentén kellően nagy számú iont kelt az anyagban. Néhány műanyagban akár már a lassú protonok is képesek maratható nyomok létrehozására, más anyagok csak nagyobb tömegű részecskék detektálására alkalmasak. Viszont az alacsony LET-ű elektronok és a fotonok, akármekkora nagy dózist adnak is le, nincsenek hatással a nyomdetektorokra, így ez a tulajdonságuk előnyösen használható, amikor kevert sugárzási térben kell a különböző LET-ű részecskéket szelektíven mérni. A rombolt zóna maratási sebessége, ezáltal a kialakuló nyom mérete a becsapódó részecske típusától és energiájától függ, tehát a különböző nyomok alkalmasak a részecskék azonosítására.

Az általunk használt nyomdetektor 1 mm vastagságú műanyag lapka, anyaga poliallil-diglikol-karbonát (PADC). A PADC detektor szénből, hidrogénből és oxigénből épül fel ( $C_{12}H_{18}O_7$ ). Az anyag detektálja azokat a részecskéket, amelyekre a  $LET > 10 \text{ keV}/\mu\text{m}$  érvényes. Így az elsődleges kozmikus sugárzásból közvetlenül detektálja a földi mágneses tér által befogott protonok egy részét és minden olyan egyéb GCR részecskét is, melyekre fennáll a következő összefüggés:  $6 \leq Z/\beta \leq 100$ . Itt  $\beta$  a részecske sebességének és a fénysebességnek a hányadosa, amely a GCR részecskék esetén megközelítheti a 0,8-at vagy még magasabb értéket is. Például egy Li atom ( $Z=3$ ) csak akkor detektálható, ha sebessége kisebb, mint a fénysebesség fele. A nagyenergiás protonokra a fenti LET kritérium nem teljesül, de ezek a detektort alkotó atomokat fragmentálhatják, kialakulnak a másodlagos (többnyire  $\alpha$ ) részecskék, amelyek már megfelelnek a kritériumnak és ezáltal az ilyen proton jelenléte is kimutatható.

A töltött részecskék mellett a PADC detektoranyag a primer kozmikus sugárzás, főleg protonok által keltett másodlagos neutronok közvetett vizsgálatára is képes, kihasználva a neutronok által különféle magreakciók révén létrehozott töltött részecskéket. A reakció lehet például rugalmas ütközés, amikor is a meglökött H, C és O magok keltenek viszonylag rövid nyomokat, hasonlóan a target fragmentekhez. Nagyenergiás neutronok a pro-



1. ábra  
Négy különböző részecske nyomkialakulásának szemléltetése és mikroszkópos felvétele



tonokhoz hasonlóan fragmentálhatják is a C és O magokat és így sok fajta töltött részecske jöhet létre (p, D, T,  $\alpha$ , Be stb.) (2. ábra). Ez történik az űrhajósok testszövetében is, melynek a detektor anyaghoz nagyon hasonló az összetétele.

Az anyag maratásához, azaz a benne keletkező ionizáló részecskék által keltett nyomok láthatóvá tételéhez tömény 6 M-os NaOH oldatot használunk 70°C hőmérsékleten. 6 óra maratás után a ~20 keV/ $\mu\text{m}$  feletti, nagy LET-ű nyomok, 15 h maratás után már a ~12 keV/ $\mu\text{m}$  LET feletti is vizsgálhatóak a nyomparaméterek képanalizátorral történő mérésével (3. ábra). A nyomok alakját leíró adatokból, felhasználva a földi szimulációs kísérletek eredményeit, a kalibrálást, meghatározható a részecskék által leadott energia és ezzel mód nyílik a dózismérésre.

### 3. MATROSHKA

A MATROSHKA kísérletekben az AEKI kutatócsoportja a Német Űrkutatási Hivatal (DLR) meghívására van jelen, ezeket a vizsgálatokat a Magyar Űrkutatási Iroda (MŰI) is támogatja. A projekt egy emberhez hasonló, csontokból és szövetekvivalens műanyagból készített fantomot használ fel az űrhajósok modellezésére (4. ábra), amit először 2004-ben egy Progressz teherszállító űrhajóval juttattak fel az ISS fedélzetére, a szegmenseiben elhelyezett detektorokat eddig már kétszer is lecserélték.

A projekt több ütemből áll. Első alkalommal a detektorok (MATROSHKA I összeállítás) 622 napot voltak az ISS-en, ebből 539 napot az űrállomás külső felszínéhez rögzítve töltöttek [2]. Ez lényegében egy űrséta szimulálására szolgált. Második alkalommal az újabb detektorcsomagok (MATROSHKA IIA) 367 napra egy zsilipkamrába, harmadszorra (MATROSHKA IIB) pedig az orosz szegmensbe, a Zvezda (csillag) modulba kerültek, ahol ma is detektálják a részecskéket.

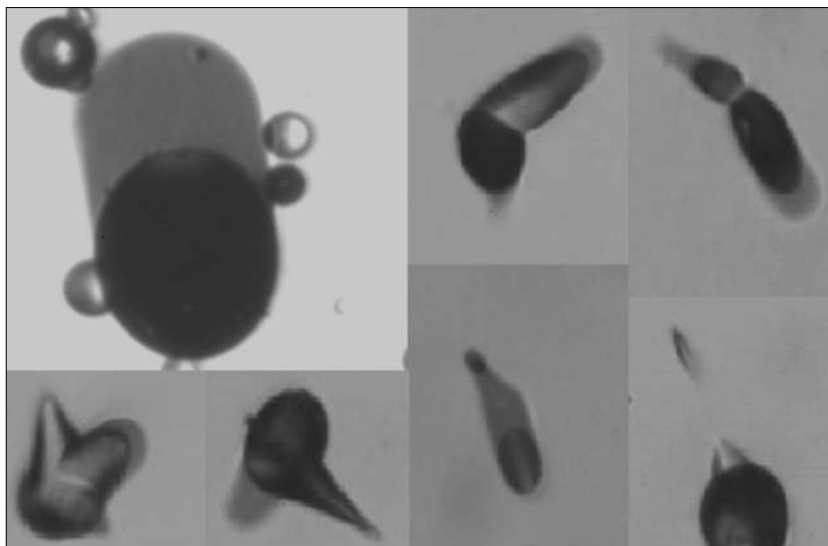


3. ábra  
Optikai mikroszkóphoz kapcsolt képanalizátor berendezés szilárdtest nyomdetektorok kiértékeléséhez (Pálfalvi József felvétele)

Mint említettük, a MATROSHKA fantom több szeletből áll, így lehetővé válik a kozmikus sugárzás okozta dózis eloszlásának mérése. Még nagyon keveset tudunk az egyes szerveket ténylegesen érő sugárdózisról. Ennek vizsgálatára alkalmazott magyar szilárdtest nyomdetektorokat a fantom különböző részeibe helyezték el.

A MATROSHKA I és IIA detektorok Budapestre visszaérkezésük után kerültek kiértékelésre. Mindkét esetben egy-egy PADC detektorokból álló csomag került a tüdő és vese „szervekbe”, két összeállítás a fantom fedő mellényke (poncsó) zsebeibe jutott, egy csomag pedig referenciaként szolgált a Zvezdában, a szerviz modulban, ahol is az űrhajósok a legtöbb időt töltik (5. ábra).

Az űrbeli méréseknél a detektorok alkalmazásának elengedhetetlen feltétele, hogy megfelelő kalibrálást végezzünk. Az általunk használt rendszert nagy energiájú részecskegyorsítókkal, neutron generátorral, 1 MeV protonnal (Van de Graaf) és kollimált  $^{210}\text{Po}$   $\alpha$ -forrással (4,65 MeV) kalibráltuk.

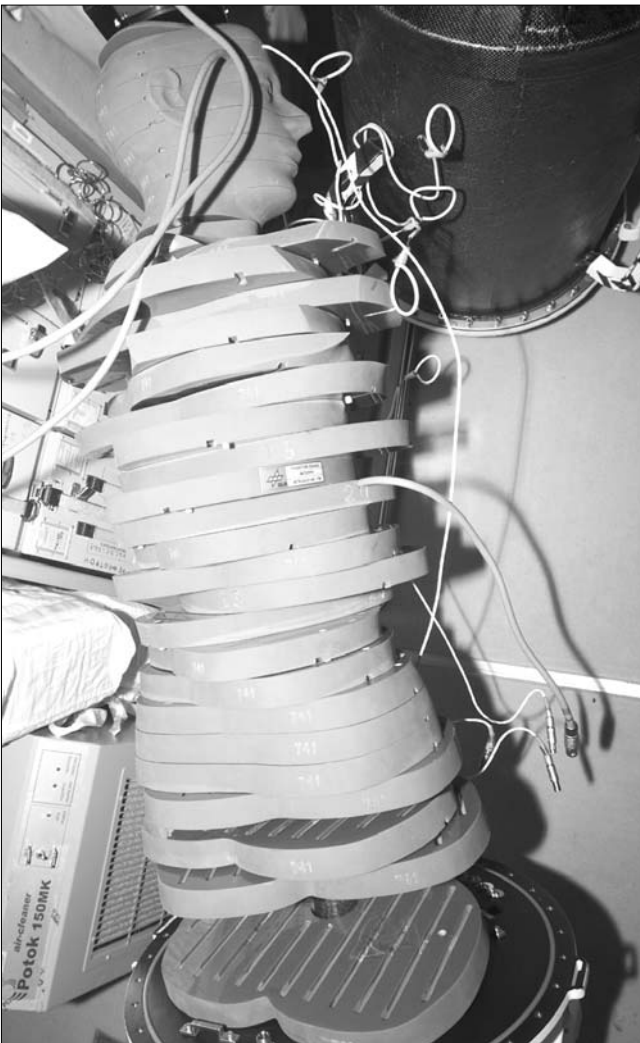


2. ábra  
Egy HZE, feltehetően a detektorban éppen leálló Fe részecske nyoma látható a bal felső sarokban, körülvéve néhány fragmentum vagy meglökött mag nyomaival. A többi kép nagyenergiás neutronok által keltett magreakciók mikroszkópos felvétele a PADC nyomdetektorok felületén. A reakcióban keletkező részecskéket felismerhetjük arról, hogy nyomaik egy centrális pontból, az ütközés helyéről, különböző irányokba indulnak ki és hosszuk, illetve átmérőjük a keletkezett részecskék energiájától és rendszámától függ.

A kémiai maratással láthatóvá tett részecskenyomok paramétereinek meghatározása után a  $LET > 10 \text{ keV}/\mu\text{m}$ -es részecskékre kiszámítottuk a LET eloszlását, amelyből végül a napi dózisteljesítmények adódtak. Eredményül a MATROSHKA I/IIA kísérletekben a tüdőre 226/177  $\mu\text{Sv}/\text{nap}$ , a vesére 202/158  $\mu\text{Sv}/\text{nap}$ , a poncsókra 323/275  $\mu\text{Sv}/\text{nap}$ , a referencia detektorokra pedig 273/223  $\mu\text{Sv}/\text{nap}$  értékeket kaptunk. Megjelentek a várt különbségek, a külső szövetek elnyelő hatása miatt a belső szerveket kisebb ekvivalens dózis érte, mint a poncsóban elhelyezett detektorokat. Meg kell jegyezni, hogy a kis LET-ű sugárzások dóziszjáruléka is igen számottevő. Más kutatócsoportok által TLD-vel mért adatok szerint például az űrsétát szimuláló MATROSHKA I kísérletben a poncsóban 536  $\mu\text{Sv}/\text{nap}$  dózis teljesítmény adódott, vagyis a teljes, a felső szöveteket ért dózisteljesítmény 859  $\mu\text{Sv}/\text{nap}$  volt. Az ISS belsejében ugyanakkor a kontroll TLD-k 139  $\mu\text{Sv}/\text{nap}$ -ot jeleztek és a teljes dózis így körülbelül a fele értéket, 412  $\mu\text{Sv}/\text{nap}$ -ot érte el. Ez egy átlagos, 180 napos űrutazás esetében 74 mSv dózist jelent, mely lényegesen magasabb, mint a földi sugárveszélyes munkahelyeken megengedett 10 mSv.

#### 4. ábra

A MATROSHKA fantom detektorcsere előtt a zsillipkamrában. A szegmensekben található mélyedésekben helyezik el majd a kisméretű detektorokat. (DLR felvétele)



5. ábra  
MATROSHKA I, IIA és IIB detektorok összeállítása, az űrbe utazásuk előtt. A detektorcsomagok mindegyike több réteg PADC lemezből áll. (P.J. felvétele)



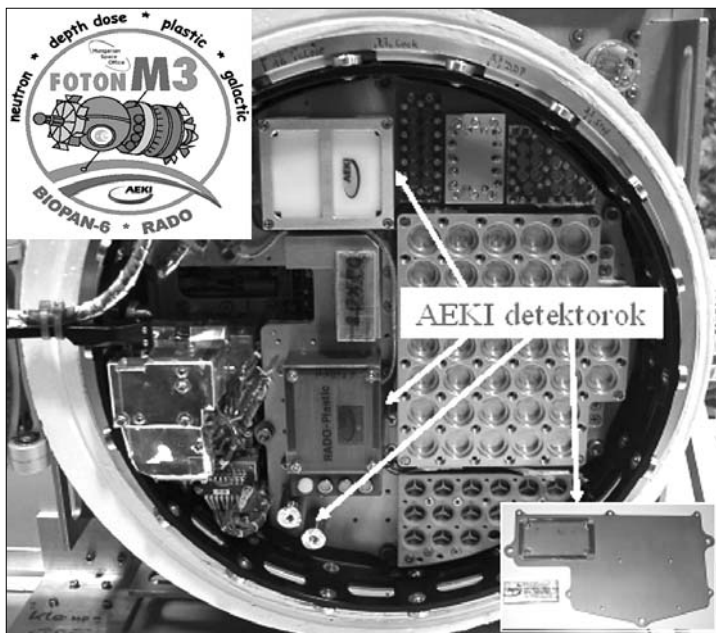
## 4. BIOPAN

A BIOPAN program az Európai Űrügynökség (ESA) irányítása alatt 1991 óta folyik, elsősorban űrbiológiai vizsgálatokat jelent a Föld körül keringő és a Földre visszatérő egységgel rendelkező műholdak bevetésével [3].

Az AEKI munkacsoportja 2001. óta vesz részt dozimetriai összeállításával a nemzetközi BIOPAN űrprogramban, a RADO (sugárdozimetria) elnevezésű részfeladatban. Az első ilyen kísérlet 2002-ben, az oroszországi pleszecki rakétabázisról indított Proton típusú orosz szállító rakéta lezuhanása miatt kudarcba fulladt. 2005-ben a biológiai minták és a dozimetriai mérőeszközök a Foton-M2 műholdhoz rögzített BIOPAN-5 műszerdobozban utaztak. Ezt a műholdat a kazahsztáni Bajkonurból egy Szojuz-U típusú rakéta állította 300 km-es magasságban orbitális pályára, amely a földi egyenlítő síkjával  $63^\circ$ -os szöveget zárt be. A 29 kg tömegű, 15 mérőegységet tartalmazó fedeles tepsire hasonlító BIOPAN-5, a német Kaiser Threde vállalat terméke, a pályára állást követően szétnyílt és közvetlen a Földre visszatérés előtt 14,625 nap múlva csukódott össze. A RADO-neutron egység feladata volt meghatározni az elsődleges kozmikus nagy energiájú galaktikus ionokat, illetve az ezek által kiváltott másodlagos neutronsugárzást.

Ennek mérésére 10 darab PADC lapocskát és különböző konvertereket – neutronok által keltett magreakciók létrehozására alkalmas (pl. Al, Ni stb.) lemezeket – tartalmazó összeállítást alkalmaztunk. A detektorcsomag felépítése lehetővé tette a sugárzás közvetlen vizsgálatát az űrből és a műhold irányából egyaránt. A kiértékelés a MATROSHKA detektorokkal megegyezően történt. Megállapítottuk, hogy az űr felől érkező nagyobb elsődleges részecskelfluxus ellenére a műhold felé néző, alsó detektorfelületeken mért nyomásűrség adatok magasabbak az űr felé néző, felső felületeknél, amit a műholdról visszavert másodlagos neutronok detektálásának tudtunk be.

A szilárdtest nyomdetektorok méréseiből kapott ekvivalens dózisteljesítmény 658  $\mu\text{Sv}/\text{nap}$ , míg a TLD-kel együtt kapott eredmény 795  $\mu\text{Sv}/\text{nap}$  volt. A BIOPAN-5



6. ábra  
Az eszközök elhelyezkedése a BIOPAN-6 tepsi egyik felében a szerelési próbák ideje alatt 2006. december 6-án.  
A kép bal oldalán, fentről lefelé haladva:  
RADO-neutron, RADO-plastic, RADO-depth dose,  
jobbra a RADO-galactic detektorok láthatóak. (P.J. felvétele)

dóziseredmény 5-ször nagyobb, mint az ISS-en belül mért adatok. A RADO-depth dose elnevezésű TLD csomag szolgáltatva továbbá a kis LET-ű kozmikus sugárzás anyagba való behatolásának mélység szerinti eloszlását. A repülési idő alatt 30 Gy dózist lehetett mérni a felszíni TLD-ken, és ezt kapták a kísérletben résztvevő biológiai objektumok is, de ez az érték 5 mm víznek megfelelő mélységben már ezredrészére csökkent.

2007. szeptemberben úrutazásra indult a BIOPAN-6 elnevezésű kísérlet a Foton-M3 felszínén, ahol a teljes dozimetriai ellenőrzést már az AEKI továbbfejlesztett egységei biztosították (6. ábra). Az ESA irányítása mellett ez volt a 12. Foton küldetés. A BIOPAN mérődoboz most repült hatodik alkalommal orbitális pályán a tudomány szolgálatában. Az ábrán látható a programot népszerűsítő, kutatócsoportunkat reprezentáló logo. A magyar egységeket ismét RADO néven foglaltuk össze: a két már ismert csomag mellett az új RADO-plastic és a RADO-galactic összeállítások is helyet kaptak. Ezek elektronikus eszközök mellé kerültek, az utóbbi éppen a mikrokontrollerbe, oda, ahol a korábbi kísérletben egy vélhetően HZE részecske becsapódás miatt a memória egység felmondta a szolgálatot. Segítségünkkel most térképet kaphatunk az elektronikába becsapódó kozmikus nehéz ionokról. A detektorok visszaérkeztek laboratóriumunkba, kiértékelésük még folyamatban van.

## 5. Összefoglalás

A Nemzetközi Űrállomás bővítése, a munkaterület megnövelése – például a Columbus európai kutatómodul csatlakozása – egyre több lehetőséget nyújt a kutatások

kiszélesítésére, új műszeregyüttesek és mérőegységek elhelyezésére. A legnagyobb korlátozást az űrhajósok mindennapi munkájában a sugárdózis nagysága jelenti. Ennek csökkentéséhez ismerni kell a dózisadatokat, hogy a megfelelő védelmet, ruházatot kialakíthassák számukra. A MAT-ROSKA és BIOPAN programok dózisteljesítmény eredményei mind a szkafanderek megtervezésében, mind az űrbeli tartózkodás késői egészségkárosító hatásainak (például rák kialakulása) felmérésében kiemelkedő szerepet játszanak, ezenkívül pedig az aktív elektronikus adatgyűjtő eszközök védelmének fejlesztését is elősegítik.

Mindemellett ki kell emelni, hogy megbízható eredményeket eléréséhez szükség van a különböző, más nemzetek laboratóriumai által használt mérőeszközök és módszerek összevetésére földi kozmikus sugárzás szimulációs kísérletekkel, amelyeket nagyenergiás gyorsító berendezések mellett lehet elvégezni. Ilyen kísérletek folytak eddig a CERN neutron szimulátoránál és japán, amerikai, svéd részecskegyorsítóknál.

## A szerzőkről

**Dudás Beáta** biomérnök szakon végzett a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetemen 2003-ban, majd egészségügyi mérnök szakon folytatta tanulmányait. 2006-ban szerezte meg második diplomáját. 2004-től dolgozik tudományos segédmunkatársként az Atomenergia Kutatóintézet csillebérci telephelyén, ahol a kozmikus sugárzás vizsgálatával foglalkozik szilárdtest nyomdetektorok alkalmazásával.

**Szabó Julianna** 2000-ben végzett a kolozsvári Babes-Bolyai Tudományegyetem Kémia- és Vegyészmérnöki Karán okleveles vegyész-fizikusként. 2001 óta dolgozik a Magyar Tudományos Akadémia KFKI Atomenergia Kutatóintézetében. Kezdetben a kis dózisu ionizáló sugárzások sejtenyészetekre gyakorolt biológiai hatásaival, illetve a sejtsugárzásos kísérletek dozimetriájával foglalkozott, majd folyamatosan bekapcsolódott a Nemzetközi Űrállomáson és a Foton műholdakon végzett nyomdetektoros űrdozimetriai és kozmikus sugárzás vizsgálatokba.

**Pálfalvi József** fizikus 1970 óta foglalkozik radiatív sugárzások vizsgálatával. A különféle technikák közül a szilárdtest nyomdetektorok (SND) fejlesztésével ért el eredményeket, melyeket több mint száz publikációban tett közzé. A Magyar Nukleáris Társaság munkásságát Szilárd Leó-díjjal ismerte el. Egyik alapítója, majd éveken át elnökségi tagja a Nemzetközi SND Társaságnak, szerkesztőbizottsági tagja több szakmai folyóiratnak. A Nemzetközi Űrállomás első állandó legénységének felbocsátását követően 2001-től folyamatosan részt vesz nemzetközi együttműködésben az ISS-en dolgozó asztronautákat érő elsődleges és másodlagos sugárzások vizsgálatában újabb fejlesztésű SND-kel. Részt vesz az Európai Űrügynökség összefogásával történő űrbiológiai kísérletekhez kapcsolódó kozmikus sugárzási tér vizsgálatában a Foton-Biopan program keretében és egyéb űrdozimetriai projekteknél.

## Irodalom

- [1] Apáthy I.,  
Sugárdózis-mérés égen és földön.  
Híradástechnika, LIX. évf., 2004/5, pp.25–36.
- [2] Szabó J., Dudás B., Pálfalvi J.,  
Az Űrállomás fantomja.  
Természettudományi Közli., 138. (2007) 7, pp.323–325.
- [3] Pálfalvi J., Szabó J., Dudás B.,  
AEKI: exobiológiai programokban.  
Technika Műszaki Szemle, 50. (2007) 3. pp.38–39.

# A földi ellenőrző berendezésekben alkalmazott programozási technikák

BALAJTHY KÁLMÁN

KFKI Részecske és Magfizikai Kutatóintézet, balajthy@rmki.kfki.hu

LIPUSZ CSABA, SÓDOR BÁLINT, SZALAI SÁNDOR

SGF Kft., {lipusz.csaba, soba}@freemail.hu, szalai@sgf.hu

**Kulcsszavak:** úrkutatás, földi ellenőrzőberendezés, elosztott adatgyűjtő- és vezérlő-rendszerek, beágyazott rendszerek

*Az elektronikus földi ellenőrzőberendezés (EGSE) alapvető feladata az úrkutatási műszerek tesztelése és az űrszonda elektromos illesztő felületeinek szimulálása a fejlesztés különböző fázisaiban. A magyar fejlesztők húsz éves tapasztalattal rendelkeznek az EGSE létrehozásában és alkalmazásában. A cikk az elmúlt években az EGSE rendszerek fejlesztése kapcsán felhalmozott tapasztalatokat, az alkalmazott technológiákat mutatja be röviden.*

## 1. Bevezetés

A tudományos úrkutatási programok jellemzően nemzetközi együttműködésben készülnek, a misszió során használatos különböző tudományos műszerek, illetve vezérlő és adatgyűjtő egységek fejlesztése párhuzamosan folyik, különböző országok kutatóhelyein. Természetesen a fejlesztés során a különböző fejlesztő részlegeknek nem állnak rendelkezésükre a máshol készülő, szintén még fejlesztési stádiumban lévő komponensek, noha a fejlesztés során erre, kiváltképp a vezérlő és adatgyűjtő egységre nagy szükség van. Ennek a problémának a feloldása az úgynevezett elektronikus földi ellenőrzőberendezések (Electrical Ground Support Equipment – EGSE) segítségével történik. Az EGSE rendszerek biztosítják a műszer az űrszondára szerelt tesztkörnyezetét, a különböző komponensek interfészeinek szimulációját a fejlesztés és minősítés során. A Részecske és Magfizikai Kutatóintézet (KFKI RMKI) már hosszú évek óta részt vesz úrkutatással kapcsolatos fejlesztésekben és az intézethez kapcsolódóan az SGF Kft. is. A KFKI RMKI elsősorban fedélzeti részek, míg az SGF Kft. elsődlegesen a földi ellenőrzőberendezések fejlesztésében vállal szerepet. Az intézet és a kft az elmúlt húsz év során több jelentős feladatban való sikeres szereplése révén jó tapasztalatra és jó referenciára tettek szert.

Az EGSE rendszerek rövid történelme és néhány megvalósított, illetve megvalósítás alatt álló rendszer bemutatása után sorra vesszük az alkalmazott rendszerprogramozás technikai megoldásait, amelyek megkönnyítik a fejlesztési időszakban még gyakran változó paraméterek megjelenítésével kapcsolatos problémák minimalizálását és lehetővé teszik az automatikus tesztlekés futtatását.

## 2. Elektronikus földi ellenőrzőberendezések

Az első EGSE rendszerek még dedikált hardverből és szoftverből épültek fel, majd az asztali számítógépek számítási kapacitásának növekedésével lehetővé vált

a PC-k alkalmazása mind a szimulációs, mind az adatgyűjtő alrendszer funkcióinak megvalósítására. A nyolcvanas években a PC-k ISA buszára kifejlesztett egyedi illesztő kártyák szimulálták az űrszondák különböző jeleit. Ekkor a PC erőforrásai maximálisan kihasználásra kerültek, például a PC memóriája közvetlenül fogadta a műszer mérési adatát a közvetlen memória hozzáférés útján. A PC ezen memóriatartománya volt egyben a megjelenítés forrása is, a szoftverek a DOS rendszer alatt készültek, így a grafikus megjelenítés biztosítása jelentős szoftvermunkát jelentett.

Ebben az időben készült a KFKI RMKI-ban a Szovjet Űrügynökség Phobos szondájának több kísérletéhez, majd a jelenleg is a Szaturnusz környezetében működő NASA Cassini szondájának két műszeréhez az EGSE. Napjainkban az inetrgrált áramkörök viharos fejlődése, valamint az operációs rendszerek javuló szolgáltatásai lehetővé teszik a hatékonyabb EGSE-k létrehozását, így lehetővé válik funkcióinak fizikai szétválasztása is. A pontosabb eredmények érdekében az űreszközök szimulációját valós idejű beágyazott processzoros egységekkel valósítjuk meg, míg adatgyűjtésre, adatfeldolgozásra, továbbá a felhasználói felület megvalósítására (Graphical User Interface – GUI) a széles körben elterjedt sokfunkciós kereskedelmi számítógépeket használjuk.

### 2.1. ASPERA

Az Európai Űrügynökség Vénusz-kutató missziójának kapcsán, a VenusExpress űrszonda ASPERA-4 tudományos műszerének kalibráló rendszerének automatizálását vállalta a magyar fél. A feladat kapcsán egy olyan rendszert kellett megvalósítani, amely a műszer kalibrációs folyamatát felügyeli. A feladatot megoldása során egy elosztott intelligenciájú, három önálló beágyazott processzoregységet és egy kereskedelmi forgalomban beszerezhető számítógépet magába foglaló rendszer jött létre [3]. Az utóbbin Windows, míg a beágyazott processzorokon valós idejű Linux operációs rendszer fut. A beágyazott rendszerek feladata a kalibrációs környezet vezérlése és a mérőműszer vezérlése, valamint a

mért tudományos adatok összegyűjtése. A laptop vagy asztali számítógép feladata a teljes rendszer felügyelete, felhasználói interfész biztosítása a kalibrációs folyamat felügyeletéhez és az összegyűjtött adatok vizuális megjelenítése az eredmények kiértékeléséhez.

## 2.2. Plazma Hullám Mérőrendszer

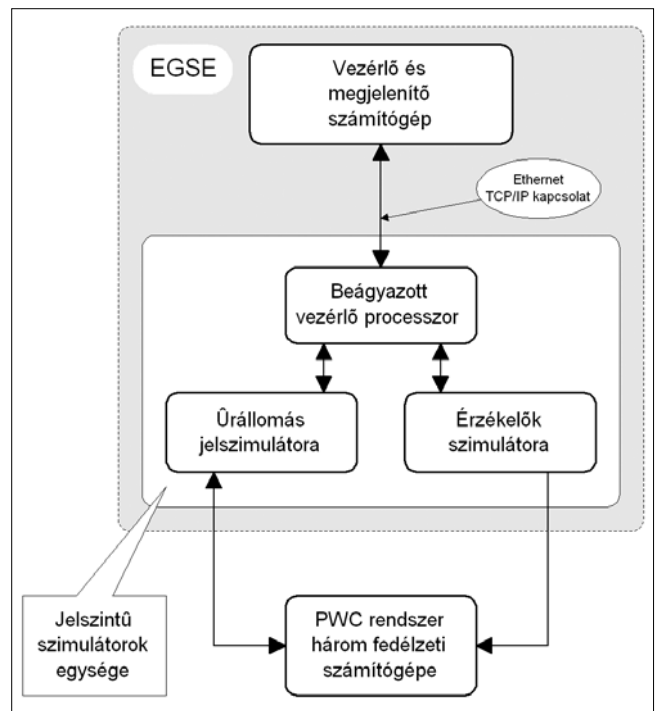
A nemzetközi űrállomás orosz szegmensébe kerülő Plasma Wave Complex (PWC) kísérlet kapcsán a magyarok feladata az érzékelők adatgyűjtő rendszerének és annak földi ellenőrzőberendezésének megtervezése és implementálása volt. A PWC adatgyűjtő és vezérlő rendszere három számítógépből áll [4] (1. ábra).

A kísérletben 11 tudományos műszer vesz részt, ezek az űrállomás különböző pontjain végeznek méréseket és az eredményeket két az űrállomás külsőoldalon lévő beágyazott processzor ethernet TCP/IP kapcsolatán át továbbítja a beltéri központi adatgyűjtő berendezésnek. A központi adatgyűjtő feladata az, hogy a mérési eredményeket archiválja és a földről érkező parancsokat a műszereknek továbbítsa. Az EGSE feladata a fejlesztés korai szakaszában a még el nem készült tudományos berendezések interfészeinek szimulációja, későbbi szakaszokban, pedig a rendszer egység szintű és integrációs tesztelésének támogatása. A fejlesztendő rendszerek között itt is megtalálható egy kereskedelmi számítógép, amelynek a feladata, hogy grafikus felhasználói felületet biztosítson a rendszer vezérléséhez, illetve a tudományos adatok megjelenítéséhez.

## 2.3. BepiColombo

A BepiColombo az európai űrügynökség Merkurt kutató missziója. A projekt kapcsán az intézet feladata az űrszonda Planetary Ion CAMera (PICAM) műszeréhez EGSE rendszer implementálása. Az EGSE feladata a kamera üzemmódjainak és pozíciójának vezérlése, valamint a műszer által készített képek fogadása és archiválása. Az EGSE rendszerekben folyó kommunikáció aszimmetrikusságára jellemző módon az EGSE-től a kamera irányában folytatott kommunikáció (parancsok vagy telecommand) sávszélessége várhatóan kisebb lesz mint 4 kbit/sec, míg ellenkező irányban (mérési eredmények vagy telemetria) 30 és 675 kbit/sec között változhat az adatforgalom, a Földtől való távolság függvényében.

A fejlesztés alatt álló rendszer, a már elkészített architektúraterv szerint, egy beágyazott és egy kereskedelmi számítógépből fog állni. A korábbi rendszerekhez hasonlóan itt is a beágyazott rendszer feladata, hogy a műszer felé az űreszköz interfészeinek a szimulációját végezze, a számítógép feladata az adatmegjelenítés és a felhasználói felület biztosítása a vezérléshez. A számítógép és a beágyazott rendszer közti kommunikáció ethernet keresztül zajlik, a tudományos műszer és a beágyazott rendszer között pedig SpaceWire szabványú interfészen folyik a kommunikáció. A SpaceWire szabványt implementáló interfész kártya és annak real-time linux drivere a csoport munkatársainak fejlesztése. Ez gyakorlatilag készen van, a további feladat az alkalmazói szoftverek tervezésének, fejlesztésének folytatása.



1. ábra  
A PWC EGSE rendszerének vázlata

## 3. EGSE rendszerek fejlesztésének programozás-technikai aspektusai

Az EGSE rendszerek implementálása kapcsán felmerülnek programozástechnikai kérdések is, mint például a rendszer párhuzamossága, megbízhatóság, valós idejű működés. A továbbiakban ezen aspektusokból kerül bemutatásra az EGSE rendszereknél alkalmazott fejlesztési metodika.

EGSE rendszerekben a kiszolgálás minősége szempontjából többféle adatfolyamot lehet megkülönböztetni. Első és legfontosabb a nagytömegű, valós időben érkező, tudományos mérési eredményeket hordozó adatfolyam. A tudományos adatfolyam kezelés közben adat nem vesztethet el, hiszen ez később lehetetlenné tenné az adatok kiértékelését, feldolgozását. Ezeknek a kezelése magában foglalja a kiszolgálásukat és archiválásukat. A földi parancsokat tartalmazó adatfolyam prioritása magas, de adattartalma kevés, kismértékű várokozottatás, késés nem okoz problémát.

Az adatok feldolgozása, megjelenítése az egyik legalacsonyabb prioritású feladat egy EGSE rendszerben. Ennek oka, hogy egyrészt számítási igény szempontjából ez a legmegterhelőbb feladat, lévén a nagytömegű beérkező adatfolyamon kell végrehajtani és a grafikus megjelenítés, a különféle számítási feladatok időigényeinek. Másrészt a veszteségmentes archiválásnak köszönhetően, később 'off-line' módon elvégezhetőek ezek a műveletek a tudományos adatokon. Az utolsó funkció, ami adatfolyam kezelést igényel a rendszer és a tudományos műszer belső állapotainak illetve az eseményeknek a naplózása, ez nem tartalmaz számottevő mennyiségű adatot.

### 3.1. Elosztott feldolgozás

Az EGSE rendszerek feladata kettős, egyfelől valós időben kell adatgyűjtést és beavatkozást végezni egy olyan környezetben, mely szigorú ütemezési követelményeket támaszt a rendszerrel szemben. Másfelől a vezérlésbe való beavatkozáshoz, illetve az eredmények megjelenítéséhez egy grafikus felületet kell biztosítani a felhasználó felé. A grafikus megjelenítés, adatok archiválása, felhasználói interakciók fogadása nehezen összeegyeztethető egy valós idejű, szigorú ütemezéssel, így az implementált EGSE rendszerek minden esetben legalább két komponensből állnak. A befolyásolt, megfigyelt környezettel közvetlenül kapcsolatban álló rész valós idejű operációs rendszert futtató beágyazott processzorkártyás komponensekből áll, míg a grafikus megjelenítést egy asztali számítógép végzi. A párhuzamos feldolgozást végző egységek egymással lazán csatoltak, köztük régebben sorosporti, újabban a növekvő sávszélesség igény és rugalmasság miatt TCP/IP protokoll fölötti kommunikáció zajlik.

A feladat komplexitásától függően egy vagy több beágyazott komponens kerül alkalmazásra. A beágyazott egységek real-time linux operációs rendszeren futó, a konkrét feladathoz dedikáltan fejlesztett szoftvert futtatnak. Az alkalmazott operációs rendszer, már meglévő valós idejű-linux kernel modulokból, az intézetben került kialakításra, maximálisan szem előtt tartva a vele szemben támasztott követelményeket és a futási környezetet.

### 3.2. Adatátvitel

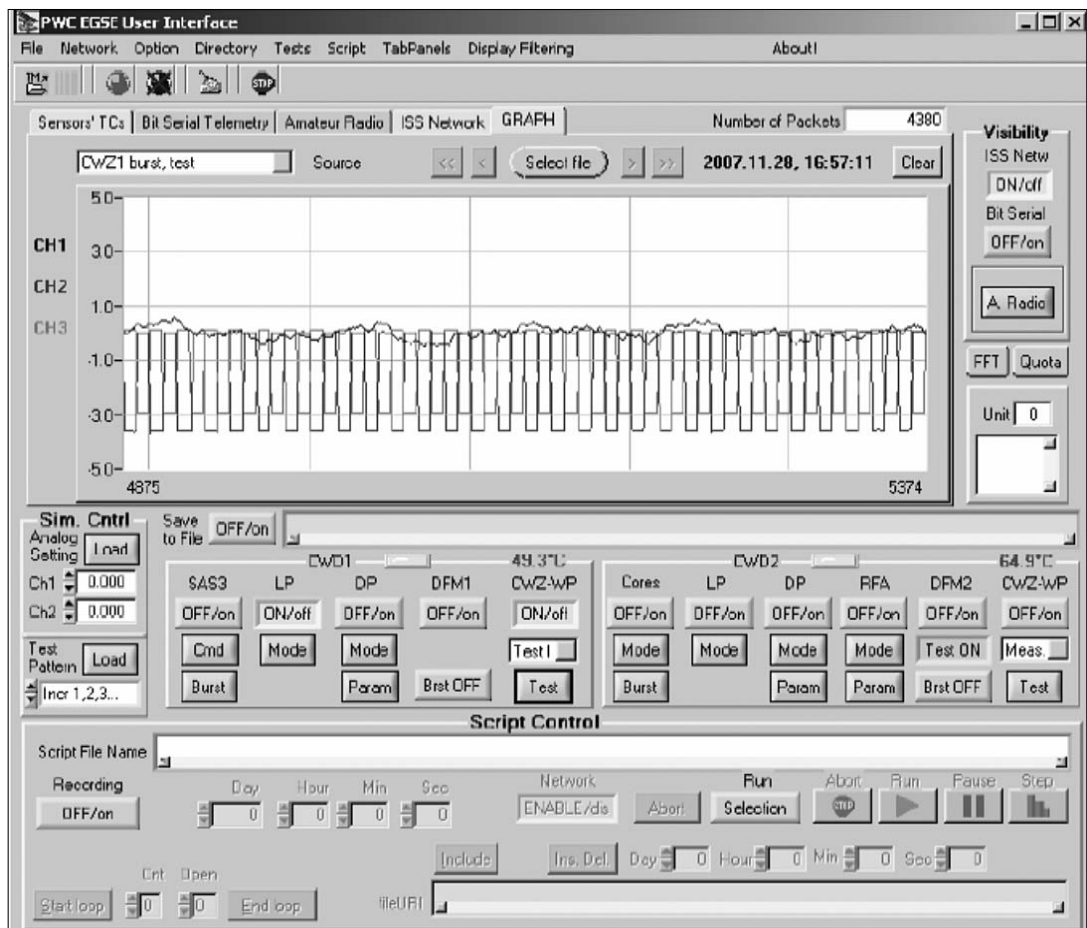
Az jelenlegi EGSE rendszer komponensei között az adatátvitel minden esetben egy adott fizikai rétegen, TCP/IP fölött implementált, dedikált kommunikációs protokoll szerint történik. A fizikai réteg lehet „hagyományos” utp-kábeles, fényvezetőkábeles vagy vezeték nélküli átvitel is. Az EGSE és a befolyásolt környezeti közötti kommunikációt mindig az utóbbi interfésze határozza meg, ennek teljes mértékben meg kell egyeznie az üreszköz megfelelő kommunikációs protokolljával. Ezen kommunikációs protokollok között egyaránt megtalálhatóak a hagyományos RS-232 sorosporti kommunikációs protokollok, a SpaceWire implementációk és újabban már az autópárból átvett CAN busz feletti kommunikációs protokollok is.

Az adatátvitelre jellemző az aszimmetrikusság, azaz jellemzően a 'downlink' (üreszköz felőli) irányban nagyságrendekkel nagyobb a forgalom, mint 'uplink' irányban (a felhasználói felülettől az üreszköz felé). Az üreszköz felől érkező adatok lehetnek tudományos mérés eredménye (tudományos adatok) valamint a műszer belső állapotait leíró adatok (HK vagy house-keeping adatok). Ezeket az adatokat veszteségmentesen kell eljuttatni a felhasználónak megjelenítés és archiválás céljából.

### 3.3. Grafikus kezelői felület (GUI)

A grafikus kezelői felület egy program, amely jellemzően Windows operációs rendszer alatt fut az asztali vagy hordozható számítógépen. Feladata az, hogy a fel-

2. ábra  
LabWindows/CVI-jal  
összeállított  
kezelőfelület a PWC  
EGSE projekthez



használót folyamatosan tájékoztassa a felügyelt rendszer és a teljes EGSE rendszer aktuális belső állapotáról, valamint beavatkozást biztosítson a vizsgálat alatt álló műszer működésében. A GUI feladata, hogy a tudományos műszertől érkező adatokat megjelenítse, illetve archiválja. Az aktuálisan futó projektekben a kezelőfelület feladatköre egy újabb jelentős funkcióval, a szcenáriókészítéssel bővült, ami lehetővé teszi, hogy egy adott forgatókönyvnek megfelelő felhasználói interakció sorozat rögzítésre kerüljön és később visszajátszható legyen.

3.3.1. Fejlesztőkörnyezet

A beágyazott rendszeren futó alkalmazások fejlesztése általában linux környezetben, karakteres szövegszerkesztő és gcc használatával történik. A GUI program fejlesztésére a National Instruments cég LabWindows/CVI terméke került kiválasztásra, a sokrétű grafikai szolgáltatása miatt. Az elmúlt évek során az EGSE rendszerek kezelői felületének fejlesztése során minden elvárásnak megfelelt. Grafikus komponenseinek köszönhetően hatékonyan támogatja úgy a tudományos adatok megjelenítését, mint a különböző portokon keresztül (hálózat, sorosport stb.) történő kommunikációt, valamint a többszálú programozást. A fejlesztő eszköz egy ANSI C alapú programozási környezetet és egy egyszerűen kezelhető, ablakok összeállítására alkalmas grafikus szerkesztőt biztosít.

3.3.2. Adatgyűjtés, megjelenítés

Az intézetben implementált EGSE rendszerekben az adatgyűjtés és megjelenítés minden esetben az általános célú számítógép (jellemzően Windows-t futtató gép) feladata. A nagymennyiségű beérkező adat feldolgozása időigényes feladat, míg a fogadásnak mindenképpen veszteségmentesnek kell lennie. A felada-

tok összeegyeztetéséhez többszálú program kerül implementálásra, ahol egy dedikált, minden feldolgozási folyamattól mentes külön szál (thread) végzi a TCP/IP kapcsolat kezelését, az adatok fogadását és a feldolgozó szál(ak)nak való továbbítást. A megjelenítést külön programszálak végzik, a szálak közötti kommunikáció a fejlesztőkörnyezet által felkínált, kifejezetten a párhuzamos elérés problémáit kiküszöbölő, úgynevezett szálbiztos üzenetsorokon (thread safe queue) keresztül történik. A 3. ábra a szálak közötti adatátvitelt vázolja. A beérkező adatot a TCP/IP kezelő szál fogadja és behelyezi a megfelelő pufferbe a csomag típusától függően. A pufferbe kerülő adat egy eseményt generál, ennek hatására a pufferhez regisztrál úgynevezett 'callback' függvény fog lefutni, a neki megfelelő feldolgozó szálaban.

A 4. ábra a megjelenítést végző számítógép és a beágyazott számítógép közötti TCP/IP kapcsolat létrehozását szemlélteti. A kapcsolat létrehozásakor egy új programszál jön létre, ebben fog futni minden a kommunikáció fenntartásáért felelős metódus. A szál feladata az, hogy fogadja az adatokat, valamint hogy a megfelelő adatfeldolgozó szálnak továbbítsa. További fontos feladata, hogy fogadás után ellenőrizze az adatcsomag konzisztenciáját, ami többnyire egy jól ismert bájt szekvencia (szinkronizációs minta) keresését és a csomaghossz ellenőrzését foglalja magában. Minden érvényes csomag, a fejlécének egy adott értéke alapján a megfelelő pufferbe kerül további feldolgozásra.

A szolgálati adatok (hőmérséklet, áramfelvétel, feszültség, állapotok) feldolgozása, azaz olvasható formában, a fizikai egységeinek megfelelő mértékegységben való átalakítása egy adott szolgálati adatcsomaghoz tartozó külső leírófájl alapján történik. Ez a programrész tulajdonképpen egy több leírófájl alapú interpreter.

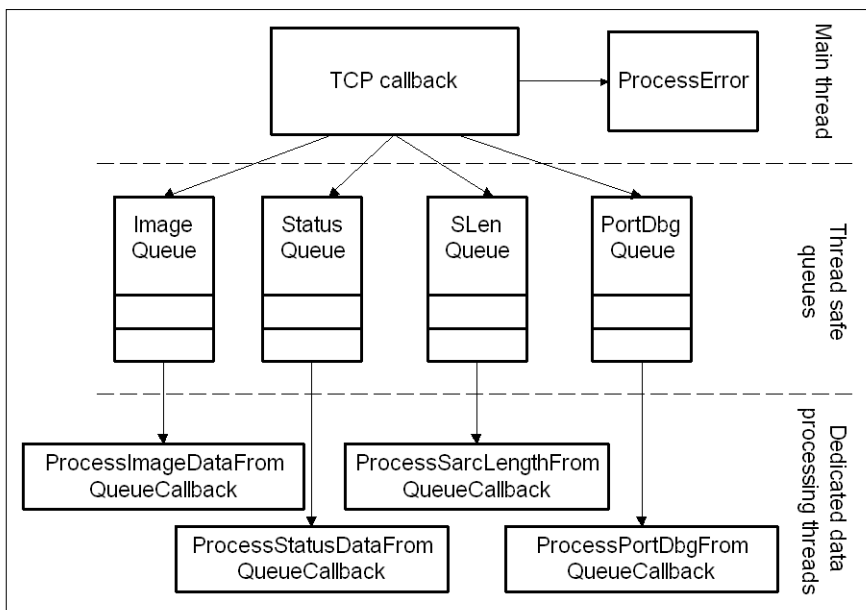
A fejlesztett EGSE rendszerek általában lehetővé teszik, hogy hozzájuk további adatkiértékelő modulok csatlakozhassanak. Ennek eredménye, hogy a tudományos műszer fejlesztői által a műszerből érkező ad-

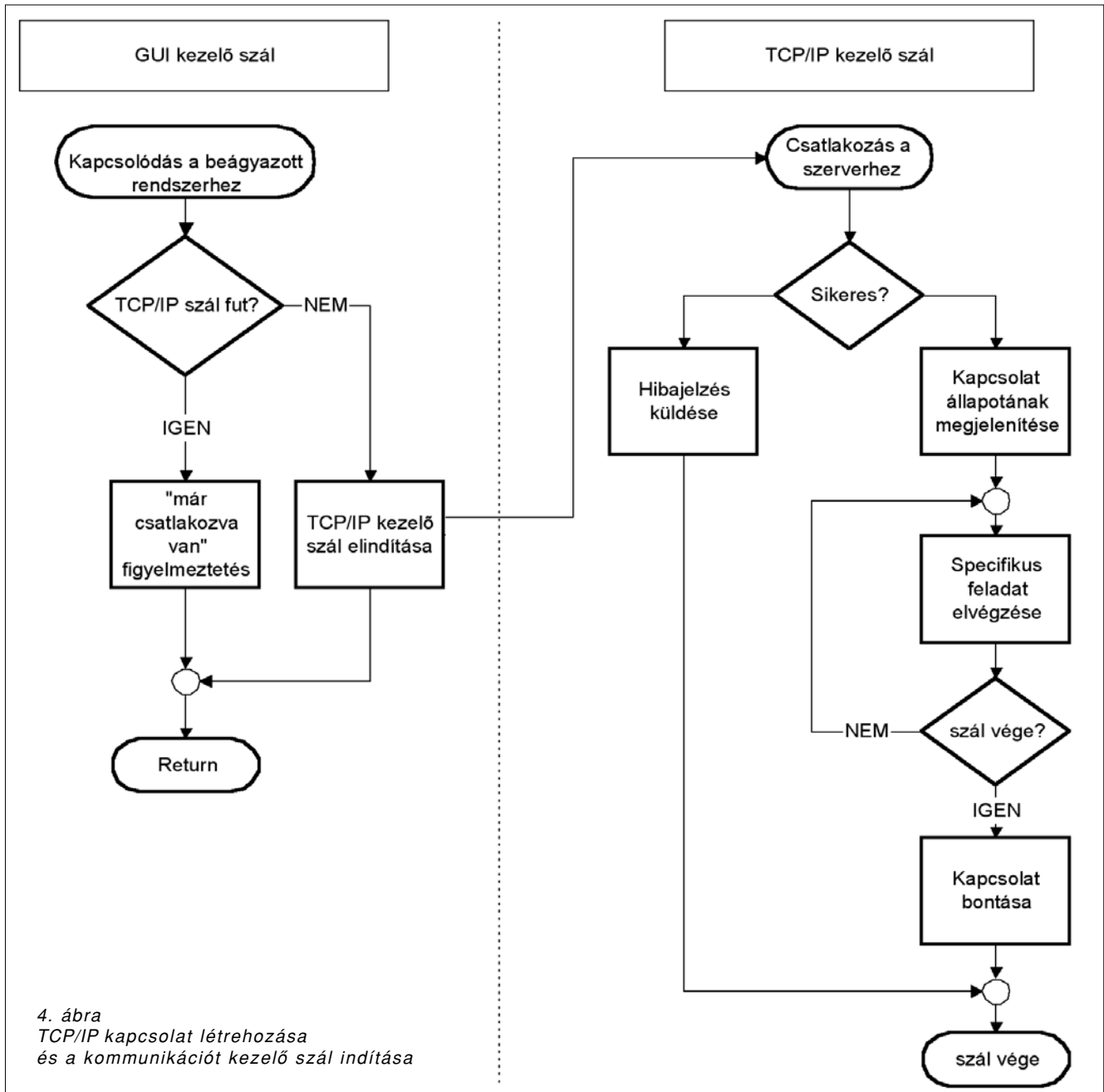
atok feldolgozásához implementált modul képes az EGSE rendszeren keresztül csatlakozni a műszerhez, parancsokat küldeni és fogadni. Az EGSE rendszer ekkor transzparens a külső feldolgozómodul számára.

3.3.3. Felhasználói interakció szekvenciák rögzítése

A felhasználó által a grafikus felületen végrehajtott interakció-sorozat rögzítésének két fontos célja van. Egyfelől egy adott forgatókönyvhöz illeszkedő, elmentett szekvenciák később tetszőleges időben-, akárhányszor visszajátszható, a mérés, tesztelés, kalibráció megismételhető lesz. Másrészt az elmentett szekvencia dokumentálja a szcenárió végrehajtását. Az igények, célok figyelembe-

3. ábra Szálak közötti kommunikáció 'thread safe queue-k' használatával





vételével a szekvenciák egy XML alapú szöveges fájlban kerülnek tárolásra [1,2]. Az XML szkript fájlok nyelvtana a mindig egy adott feladathoz, dedikáltan készül el. Az 5. ábrán egy ilyen szekvencia leíró (szkript) fájl részlete látható. Az XML fájlok írása és olvasása egy Xerces-C++ alapú DOM olvasót implementáló modul segítségével történik, a nyelvtan megadásához, bonyolultságtól függetlenül, XSD vagy DTD került felhasználásra.

### 3.4. Adatleíró réteg

Az utóbbi időben egyre nagyobb hangsúlyt kapott a fejlesztésekben, hogy az imple-

mentál rendszerek működésük során felhasznált, illetve előállított adatok olvashatóan, platformfüggetlenül kerüljenek leírásra. Ezen adatok lehetnek például a korábban tárgyalt forgatókönyveket leíró szkriptfájlok,

```

    <Digout value="8"/>
    <save act="on"/>
    <acquisition act="on"/>
    <acquisition act="off"/>
    <acquisition act="on"/>
    <delay value="1" dim="sec"/>
    <acquisition act="off"/>
    <save act="off"/>
    <step axis="azimut" speed="5" value="1.000000" dir="pos"/>
    <step axis="vertical" speed="5" value="1.000000" dir="pos"/>
    <step axis="horizontal" speed="5" value="1.000000" dir="neg"/>
    <turnPWR30supply act="off"/>
    
```

5. ábra  
Részlet egy XML szkript fájlból



vagy szimuláció esetén a szimulálandó egységek modelljeit leíró fájlok, valamint a különféle konfigurációs, strukturált adatmegjelenítést leíró fájlok. Az adatok fenti kritériumok szerinti ábrázolására az XML nyelv került kiválasztásra [5].

Implementálásra került egy modul, mely XML olvasó és író metódusokat tartalmaz, továbbá lehetőséget biztosít az XML társtechnológiának a hatékony kihasználására [6,7]. Ezek lehetnek a konkrét nyelvtan ellenőrzésére, vagy XSLT transzformációk elvégzésére a többszintű leírás kialakítására. A többszintű adatleírás szükségességét az ember szempontjából való jól olvashatóság és a gép számára könnyen feldolgozhatóság közötti esetleges hézag, illetve a rugalmas felhasználás indokolja. Ennek köszönhetően a modul forráskódja nagymértékben független lesz a felhasználási környezettől, csak a szükséges transzformációkat tartalmazó fájlokat kell megadni.

#### 4. Összefoglalás

A cikkben bemutatásra került, hogy az űrkutatásban használatos földi ellenőrzőberendezések fejlesztése kapcsán milyen programozástechnikai kérdések merülnek fel, és hogy ezek a kérdések miként lettek feloldva a területen szerzett sokéves tapasztalatnak köszönhetően. Írásunk első része az EGSE rendszerek általános jellemzését, majd a KFKI RMKI és az SGF Kft. jelenlegi fejlesztési munkáit foglalta össze.

#### Köszönetnyilvánítás

A bemutatott eredmények a Magyar Űrkutatási Iroda, az ESA PECS irodája valamint az MTA támogatása alapján jöhettek létre.

#### A szerzőkről

**Balajthy Kálmán** 1975-ben villamosmérnöki, 1988-ban gazdasági mérnöki diplomát szerzett a BME-n. 17 éven át a KFKI MSzKI-ban számítógépek ipari alkalmazásával foglalkozott. Szakterülete a valós idejű, idő- és helykritikus programok, nagyméretű alkalmazások elkészítése volt. Ezt követően egy német-magyar cégnél 9 éven át energia-elszámolási és számlázási programok fejlesztését végző programozói csoportot vezetett. 2004 óta a KFKI RMKI-ban űrkutatási projektek beágyazott processzorainak programfejlesztésében vesz részt.

**Lipusz Csaba** 1986-ban végzett fizikus szakon az ELTE TTK-n. A hardverközelű programozás és az informatikai rendszerek technikai architektúrájának fejlesztése azok a területek, melyeken pályafutása során több évet dolgozott. Jelenleg fedélzeti adatgyűjtő berendezések real-time Linux operációs rendszereivel és illesztő kártyák device drivereinek fejlesztésével foglalkozik.

**Sódor Bálint** a BME Villamosmérnöki és Informatikai Karán az informatikai infrastruktúrák tervezése szakirányon szerzett műszaki informatikusi végzettséget 2006-ban. Egyetemi tanulmányai során került kapcsolatba a KFKI RMKI-val, ahol missziókritikus rendszerek tesztelésével és szimulációjával foglalkozott és itt is került főállásba. Jelenleg az űrmissziók műszereihez alkalmazott tesztelő és szimulációs eszközök szoftverfejlesztésén dolgozik.

**Szalai Sándor** 1962-ben villamosmérnöki, 1967-ben folyamatszabályozási szakmérnöki oklevelet szerzett a BME-n. Kezdetben a nukleáris elektronika, majd 1980-tól az űrkutatás területén fejlesztett vezérlő- és adatgyűjtő-rendszereket. Az első munkái hardver-, majd később hardverközelű szoftver-fejlesztések, valamint rendszertervezés voltak. 1977-ben kandidátus, 1992-ben a műszaki tudomány doktora lett. 1977-től a KFKI RMKI-ban dolgozik, jelenleg tudományos tanácsadó. 1996-tól az SGF Kft. ügyvezető igazgatója.

#### Irodalom

- [1] <http://www.w3.org/MarkUp/SGML/>
- [2] <http://www.w3.org/MarkUp/>
- [3] Balajthy K., Sulyán J., Szalai L., Sódor B., Lipusz Cs., dr. Szalai S., Elosztott intelligenciájú automatizált rendszer a VenusExpress űrmisszió kísérletének kalibrálására. Híradástechnika, 2006/04, pp.34–38.
- [4] Balajthy K., Endrőczy G. dr Nagy J., Horváth I., Lipusz Cs., dr. Szalai S., Adatgyűjtő és vezérlő számítógép a Nemzetközi Űrállomás Obsztanovka kísérletéhez. Híradástechnika, 2006/04, pp.17–22.
- [5] Brett McLaughlin, Java és XML. O'Reilly, Kossuth, 2001, ISBN: 963 09 4230 5.
- [6] B. Sódor, G. Tróznai, Cs. Lipusz, Implementing Data Presentation Layer in Testing and Simulation Environments Using XML. 58th Int. Astronautical Congress Hyderabad, India, 24-28 September 2007, IAC-07-D1.1.11.
- [7] Sódor Bálint, XML használata tesztelő, szimulációs rendszerekben. Elektronet, 2006. december, pp.12–14.

# Műhold és beltéri környezet közötti rádiócsatorna szimulációs vizsgálata

FARKASVÖLGYI ANDREA, FARKAS LÓRÁNT, NAGY LAJOS

BME Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék  
lajos.nagy@mht.bme.hu

Lektorált

**Kulcsszavak:** terjedési modell, polarizáció, sugár követés, műholdas kommunikáció

A cikkben a műhold és beltéri csatorna analízisére alkalmas szimulációs eljárást és annak eredményeit mutatjuk be. Elsődleges célunk a vett beltéri jel polarizációs állapotának pontos meghatározása. Eddigi vizsgálataink eredménye az, hogy a beltéri hullám polarizációs állapota alapvetően változik, amint az ablaktól egyre jobban eltávolodunk, a hatás másodlagos sugárzásként jelentkezik. Ismertetjük a komplex harmonikus tér polarizációs állapotának leírási módszerét, majd ennek felhasználásával a cikkben közöljük a szimuláció eredményeit. A kiterjesztett predikációs eljárás során módosított háromdimenziós sugárkövetési módszert alkalmaztunk. Részletesen foglalkozunk azzal a terjedési problémával, hogy milyen módon függ a beltéri hullám egyrészt a műhold elevációs szögétől, másrészt a műhold mozgásából adódó olyan csatornajellemzőktől, mint a Doppler-hatás és a késleltetés. Továbbá foglalkozni kívánunk a MIMO antenna rendszerek műholdas alkalmazhatóságával, tekintettel a beltérben jelentkező szóródási problémákra.

## 1. Bevezetés

A mobil műholdas rendszereket már jelenleg is alkalmazzák és előreláthatóan széles körben fognak tovább terjedni. A közvetlen beltéri alkalmazás a vezeték nélküli kommunikáció egyik kulcsproblémája, mely nélkül a műholdas rendszerek csak jelentős korlátozásokkal használhatóak a kommunikációs hálózatokban. A kommunikációs hálózatok felhasználói, előbb vagy utóbb kérik a szolgáltatásokat. Tehát véleményünk szerint igen hasznos lenne, egy jól kidolgozott módszer a beltérbe történő behatolás becslésére és a hullámok polarizációs állapotának jellemzésére.

A nagy távolságok következtében a műhold-föld közötti terjedési közeg igen jelentős csillapítású, de jól leírható. Amint azonban a hullám eléri az épületeket, jellemzői szignifikánsan változni fognak, ám általánosságban figyelembe kell venni, hogy magas házak közötti terjedés a síkhullámú polarizációt különböző mértékben elliptikussá változtatja.

Az épület erőteljes hatásai az először belépő hullámra: többszörös reflexió, transzmisszió a falakon való áthaladásakor, élek diffrakciója, valamint az épület anyagának inhomogenitása miatt. Az épületen belüli tér nagyon összetett, de továbbra is harmonikus, ezért vizsgálható. A továbbiakban ezek figyelembe vételével egy általános célú szimulációs módszert javasolunk a keskeny- és szélessávú műhold és beltér közötti csatorna jellemzőinek kiszámítására.

A cikkben első lépésként a beltéri hullámok polarimetrikus leírására és a következtetésekre koncentráltunk, figyelembe véve általános polarimetrikus karakterisztikáikat, elliptikus és lineárisan polarizált beeső hullám figyelembe vételével. Ez az első lépés tisztázni szeretné, hogy milyen típusú antenna szükséges beltéri vevők esetén és ezen antennák alkalmazása milyen ered-

ményekre vezet. A szimulációs rendszer ezen állapotában, a többszörös reflexiót és falon keresztüli transzmissziót veszi figyelembe és egy háromdimenziós sugárkövető eszközre épül. A következő lépés a diffrakció hatásának figyelembe vétele lesz.

## 2. Polarizáció

Minden harmonikus vektortér leírható polarizációs jellemzőivel. Általában azt mondhatjuk, hogy a polarizációt egy vektormező lokális tulajdonságaként úgy definiálhatjuk, mint egy görbét, melyet egy adott helytér-rősség-vektor végpontja leír. Az [1] szerint a kisugárzott hullám polarizációja „a kisugárzott elektromágneses hullám azon tulajdonsága, mely leírható az elektromágneses térvektor időben változó iránya és relatív nagysága együttesével.

Hivatkozva [2]-re, a polarizációt általában három kategóriába sorolhatjuk: lineáris, körös és elliptikus polarizáció, melyek közül a körös és a lineáris polarizáció az elliptikus polarizáció speciális fajtáiként kezelhetőek. A polarizáció általánosan – a lineáris polarizációt kivéve – lehet az óra járásának megfelelő, vagy ellentétes (jobb, illetve balforgású).

A polarizáció jelenségének leírása optikai és rádió hullámterjedés szempontjából jelentősen különbözik. Az antennaelméletben használják a horizontális és vertikális polarizáció fogalmát, melyek lineáris polarizációt jelentenek, a horizontális és vertikális sík irányában fekvő térerősség vektor végpontokkal. Valamint különbség van a jobb és balforgású polarizáció definíciójának esetében is [3].

Az irodalomban a hullámterjedés jellemzésére két tárgyalási mód létezik: az FSA-nak (Forward Scattering Alignment) és a BSA-nak (Backward Scattering Alignment)

nevezett módszerek. Az FSA a hullámterjedés polarizációs változásainak meghatározására alkalmas, a környező téren keresztül a megfigyelt célpontig és vissza. A tér polarimetrikus szóródási jellemzői egy Jones- vagy Müller-mátrixszal írhatók le. A BSA akkor alkalmazható, ha a vizsgált átvitel különböző polarizációjú antennák között történik, ahol az antennák között szóró objektum található. Ebben az esetben a Sinclair- és Kennaugh-mátrix alkalmas a polarizációs jellemzők leírására [5].

A polarizációnak két aspektusa létezik: egyrészt leírja a komplex harmonikus vektormező viselkedését, másrészt módot ad a különböző terjedési közegek szórás jellemzőinek leírására. Figyelembe vettük azonban, hogy a jellemzés során, a rádióhullámok terjedésének ezen tárgyalásánál nagyon fontos a precíz hullámterjedési modellek szerepe, mert a térerősségmérés során nem lehetséges a polarizáció teljes pontosságú mérése, mivel antennáink elektromos jellemzői, így iránykarakterisztikája is csak véges irányszög-felbontást tesz lehetővé.

A modellhez szükséges a polarizáció leírása, a komplex harmonikus vektortér definiálása és grafikus és numerikus reprezentációs készlet. Cikkünk következő szakasza erre a kérdéskörre világít rá.

### 3. A Stokes-paraméterek és a Poincare zóna

A Stokes-paraméterek és a Poincare-tér egy tetszőleges sík hullám polarizációs jellemezőit írja le [2,3].

A Stokes-paramétert a következőképpen definiáljuk:

$$\begin{aligned} s_0 &= a_1^2 + a_2^2 \\ s_1 &= a_1^2 - a_2^2 \\ s_2 &= 2a_1a_2 \cos \delta \\ s_3 &= 2a_1a_2 \sin \delta \end{aligned}$$

ahol

$a_1$  és  $a_2$  jelentik a térerősség két ortogonális vektor-komponensét, az egyik a vevő síkjában, míg a másik a vevő síkjára és a terjedés irányára merőleges sík.

A négy egyenlet csupán három független paramétert tartalmaz, ugyanis

$$s_0^2 = s_1^2 + s_2^2 + s_3^2.$$

A Stokes-paramétereket általában négyelemű vektor formájában írjuk fel, így

$$S = [s_0 \ s_1 \ s_2 \ s_3].$$

Lineáris horizontálisan polarizált síkhullámra tehát:

$$S = [1100]$$

Lineáris, 45 fokos szögben polarizált síkhullámra:

$$S = [1010]$$

Jobb forgású körösen polarizált síkhullámra:

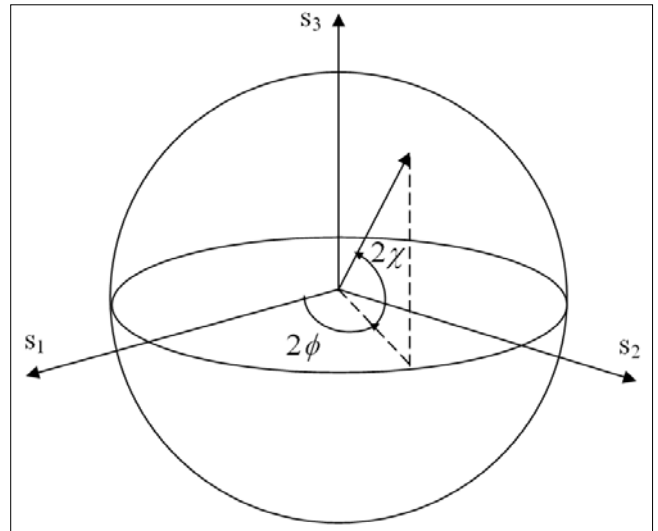
$$S = [1001]$$

Bal forgású körösen polarizált síkhullámra:

$$S = [100-1]$$

Polarizálatlan hullámra:

$$S = [1000]$$



1. ábra Stokes-paraméterek és Poincare-tér jellemzése

A hullám polarizációs állapotát a Poincare-térben poláris koordinátákkal is jellemezhetjük, mely ugyancsak három független paramétert jelent, ezeket  $\sqrt{s_0}, \chi, \phi$ -ként definiáljuk, ahol

$$\begin{aligned} \chi \\ \phi \end{aligned}$$

A kapcsolat köztük és a Stokes-paraméterek között az alábbi formában írható fel és ábrázolható (1. ábra):

$$\begin{aligned} s_1 &= s_0 \cos 2\chi \cos 2\phi \\ s_2 &= s_0 \cos 2\chi \sin 2\phi \\ s_3 &= s_0 \sin 2\chi \end{aligned}$$

### 4. A polarizációs ellipszis eloszlása és a nagy féltengely iránya

A Poincare-tér nagyon jó vizuális megjelenítési lehetőséget ad egy hullám polarizációs állapotairól: egy adott intenzitású  $s_0$ , sík monokromatikus hullám minden lehetséges polarizációs állapotának megfelel a tér egy pontja és fordítva.

Mindamellet, hogy egy komplex beltéri környezetben nincs állandó térintenzitás és a hullámok sem tekinthetők monokromatikusnak, a kialakuló térerősség vektorra nem értelmezhető terjedési irány, így polarizációs sík sem. Tehát a Poincare-tér nem alkalmas arra, hogy megfelelően leírjon egy komplex harmonikus vektormezőt.

Egy másik közelítési eljárást [3] alkalmaztunk a részletes leírásra, feltételezve, hogy forrásos az elektromágneses tér, amely áthatol az épületen és reflektálódik, transzmissziót és diffrakciót szenved, mégis harmonikus marad. Ezért a tér minden pontjában felvesszünk egy harmonikus vektort,  $\mathbf{V}$ -t, mely egy háromdimenziós függvénye az adott pont térintenzitásának:

$$\begin{aligned} V_x(r,t) &= a_x(r) \cos(\omega t - \varphi_x(r)) \\ V_y(r,t) &= a_y(r) \cos(\omega t - \varphi_y(r)) \\ V_z(r,t) &= a_z(r) \cos(\omega t - \varphi_z(r)) \end{aligned}$$

ahol például

$$\varphi_x(r) = k \cdot r - \delta_x$$

és így tovább, a vektormező skalár komponenseinek kezdeti értékét adja meg.

Bevezetjük a következő vektorokat:  $p(r)$  és  $q(r)$ , melyek a helyzetvektor következő függvényei:

$$p_x(r) = a_x(r) \cos \varphi_x(r), p_y(r) = a_y(r) \cos \varphi_y(r)$$

$$p_z(r) = a_z(r) \cos \varphi_z(r), q_x(r) = a_x(r) \sin \varphi_x(r)$$

$$q_x(r) = a_y(r) \sin \varphi_y(r), q_z(r) = a_z(r) \sin \varphi_z(r)$$

Mellyekkel felírható:

$$V(r, t) = p(r) \cos \omega t + q(r) \sin \omega t$$

A  $p$  és  $q$  vektorok közötti kapcsolat szerint ezek a polarizációs ellipszis konjugált féltengelyei. Ha választunk két másik vektort,  $s(r)$  és  $u(r)$  a következőképpen:

$$s = p \cos \alpha + q \sin \alpha$$

$$u = p \sin \alpha + q \cos \alpha$$

és ehhez  $\alpha$ -t úgy választjuk meg, hogy  $s$  és  $u$  merőlegesek legyenek,

$$\operatorname{tg} 2\alpha = \frac{2pq}{p^2 - q^2}$$

akkor  $s$  és  $u$  a polarizációs ellipszis fő- és melléktengelei lesznek.

Kifejezhetjük  $V$ -t  $s$  és  $u$  függvényében:

$$V = s \cos(\omega t - \alpha) + u \sin(\omega t - \alpha)$$

Mivel  $s$  és  $u$  merőlegesek egymásra, így egy új koordináta-rendszer választható  $x'$  és  $y'$  tengelyekkel,  $s$  és  $u$  mentén.

Az új koordináta-rendszerben a  $V$  vektortér komponensei a következőképpen adhatók meg:

$$V_{x'} = |s| \cos(\omega t - \alpha), V_{y'} = |u| \sin(\omega t - \alpha), V_z = 0$$

Melyből következik:

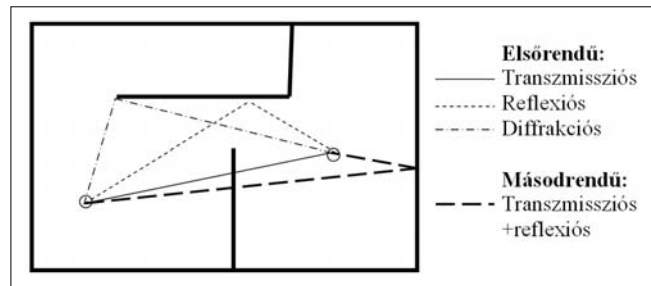
$$\frac{V_{x'}^2}{s^2} + \frac{V_{y'}^2}{u^2} = 1$$

tehát  $s = |s|$  és  $u = |u|$  lesznek egy ellipszis fő- és mellék-féltengelyei, melyek leírják a vektorteret ortogonális koordinátákban, melyeket ezek a vektorok definiálnak, tehát ez egy elliptikus polarizáció.

Általános esetben a polarizáció a tér minden pontján elliptikus, ám az ellipszis síkja, a tengelyek iránya és az ellipszis excentricitása változik. Könnyen belátható, amint  $\alpha$  változik,  $x'$  és  $y'$  is változik, valamint változik az ellipszis síkjának az iránya is.

Végeredményül a következő szemléletes értelmezést kívánjuk adni a polarizációs analízisre:

- a polarizációs ellipszis excentricitásának eloszlása megadja, hogy mennyire diffúz a tér, mely az épületen belül kialakul, figyelembe véve a különböző akadályokat és a különböző terjedési mechanizmusokat,
- az ellipszisek nagy féltengelyeinek kétdimenziós hisztogramja,  $\varphi$  és  $\theta$  eloszlása, mely a vevő antenna kívánatos elfordításáról ad információt.



2. ábra Sugárkövetés módszerének néhány lehetséges első és másodrendű összetevője

### 5. Szimulációs eredmények és analízis

Sugárkövetési eszközt alkalmazva [7,8], egy külső adó által (LEO műhold) az épületen belül előállított a rádióhullámok polarizációs jellemzőinek eloszlását szimuláltuk. Az egy- és többszörös reflexiókat és az objektumon keresztüli transzmissziókat vettük figyelembe, ám a diffrakciót és a falakon keletkező szóródást a modell egyelőre még nem tartalmazza.

Sugárkövetés (Ray Launching)	
<b>Jellemzők</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Frekvenciatartománybeli módszer</li> <li>• Keskenysávú, szinuszos gerjesztés</li> </ul>
<b>Előny</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• A feladat könnyen particionálható részfeladatra</li> </ul>
<b>Hátrány</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Bonyolult programozhatóság</li> <li>• Komplex (görbevonalú) geometria esetén a sugarak jelentős divergenciája</li> <li>• Az adatbázis felbontása szükséges független sokszögekre</li> </ul>

1. táblázat A sugárkövetés módszerének jellemzői

Az adó különböző polarizációjú hullámokat hoz létre, a 2,4 GHz-es frekvencián (ez a WARC'92-n LEO műholdak számára kijelölt downlink frekvencia sáv): a vizsgált polarizációk kör (jobb és balforgású) és lineáris.

A sugárkövetés elvű hullámterjedési modellek a teljes tartományú térmodellezés helyett a geometriai optikán alapulnak, a terjedő hullámokat véges térszögtartományokra bontva, az ezeken terjedő komponenseket függetlenül kezelve és a határfelületeket fellépő jelenségeket – reflexió, transzmisszió, diffrakció – érvényesítve a teljes megoldást ezen összetevők egyes vizsgálati pontokban kiszámított eredményeként állítják elő.

A sugárkövetés módszerét a gyakorlatban általában harmadrendű tetszőleges terjedési mechanizmus kombinációig terjesztik ki (a jelen szimulációnál hetedrendű kombinációt is figyelembe vettünk), vagy a követett hullámösszetevőt egy előzetesen megadott küszöbtererősség szint alá csökkenésig követik.

A továbbiakban alkalmazott sugárkövetés a sugár kibocsátás elvére épül, egy eredeti Luneberg-Klein [2] fejlesztés, nagyfrekvenciás közelítéssel kiegészítve, melyet geometriai optikának nevezünk.

A sugárkövetést esetünkben a következőképpen, fordított irányban alkalmaztuk: a hullámokat a beltéri vevő-

antenna irányából bocsátottuk ki, nyolc különböző szögben, mely irányokban a műholdról érkező jelek vehetők.

A hullámokat addig követtük, míg a falakon fellépő kölcsönhatási pontok egy adott számot el nem értek. Ez a szimulációban hét volt. Csupán azokat a hullámokat vettük figyelembe, melyek a műhold irányába terjedtek, vagyis alapvetően egy síkhullámot, mert a valódi hullám, mely a műholdtól az épület felé terjed: síknak tekinthető, figyelembe véve a nagy távolságot a műhold és az épületek között.

Szimulációs eredményeinket a 3.-6. ábrákon mutatjuk be a különböző polarizációkra, az épületek belső terében, az ablakoktól különböző távolságokra, a műhold különböző elevációs szögeinek megfelelően.

Az ábrák a polarizációs karakterisztikák szimulációs eredményeit mutatják: az épület két különböző belső területére: az egyik, mely az ablakon keresztül közvetlen megvilágítást (hullámösszetevőt) kap, a másik kissé távolabb az ablaktól, mely már nincs közvetlenül megvilágítva, a karakterisztikákat alacsony elevációra vetjük fel és két polarizáció esetére (kör, lineáris).

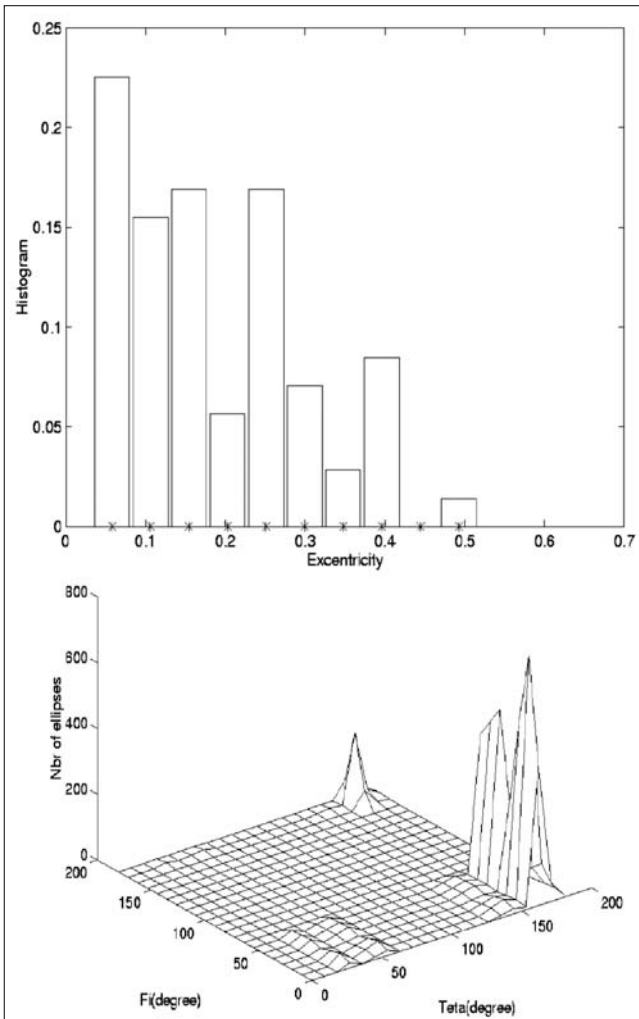
Magas eleváció esetén ( $45^\circ$  vagy afelett) az elsődleges behatolási mód az ablakon keresztüli diffrakció,

amint a kibocsátott hullám gyorsan reflektálódik a padló és a mennyezet között, erőteljes csillapítást szenved, ezért meglehetősen kis szintű jel érkezik meg a szoba hátsó régiójába, ezért ezekről a sugárzási szögekről, általános és megalapozott következtetést nem tudunk levonni. Figyelembe tudjuk venni az alacsony és közepes elevációs szögeket, noha itt is az alapvető behatolás az ablakon keresztül valósul meg.

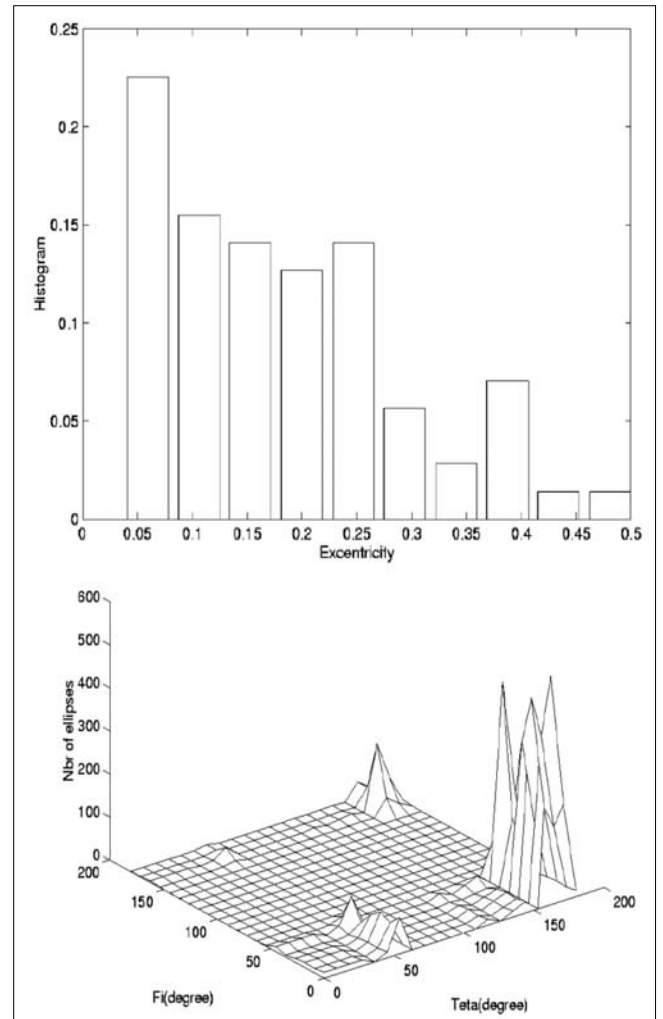
Az eredmények megmutatják, hogy a hullám tükröződő többitas reflexiót és transzmissziót szenved, megváltozik a polarizációs állapota, más szóval, a beeső síkhullám eredeti polarizációja csupán az ablak közelterében marad meg; másrésztől mindhárom vizsgált esetre, vagyis mikor a beeső hullám polarizációja lineáris, jobbforgású vagy balforgású körpolarizált, a helység távoli régióban a polarizációs ellipszis csaknem mindig szórt.

Vizsgálataink alapján tehát megállapíthatjuk, hogy nincs közvetlen kapcsolat a beeső hullám polarizációs állapota és a polarizációs ellipszis között az épület különböző pontjaiban. Azonban az eloszlásgörbéken megfigyelhető, hogy olyan szögnél csoportosulnak, mely szög alatt a hold látszik, vagy olyan iránynál mely egy reflexióval érhető el.

3. ábra  
 $25^\circ, 5^\circ$ , near zone, clockwise,  
 50% of points clockwise



4. ábra  
 $25^\circ, 5^\circ$ , near zone, counterclockwise,  
 48.5% of points clockwise



## 6. Szimulációs eredmények műhold és MIMO rendszer közötti csatornára

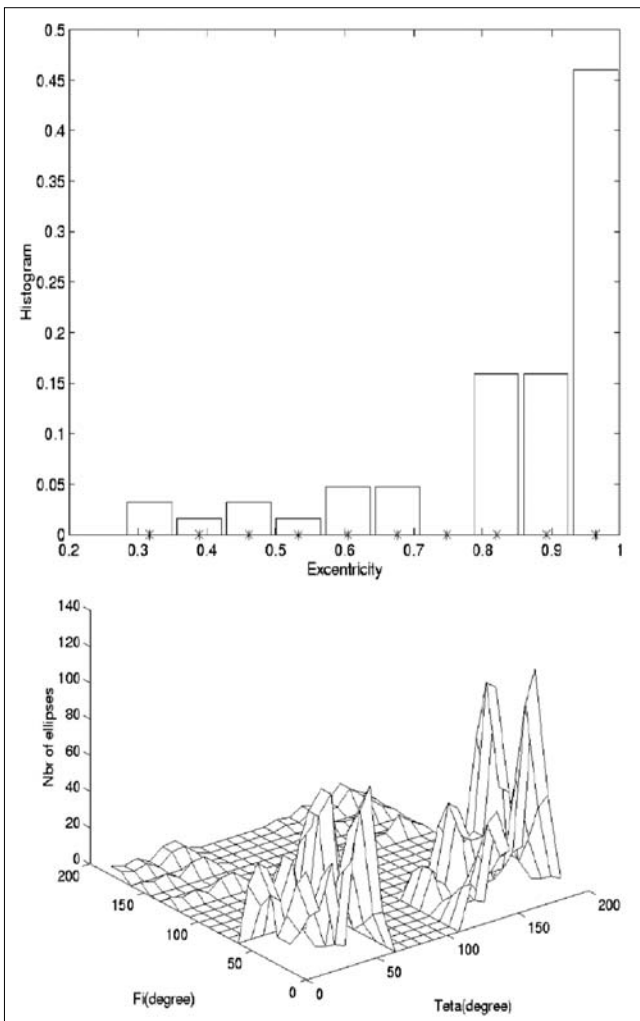
A szimuláció során azt vizsgáltuk, hogyan viselkedik egy MIMO-műhold csatorna, szórásos és nem szórásos környezetben.

A vevő oldalt egy háromelemű antennarendszer adta. Így a szimulált rendszer egy SIMO rendszer volt. Az antennákat a szimuláció során elforgattuk. Kezdetben a három vevőantenna egymással párhuzamos és a függőleges Z tengely irányába mutatnak (rotation angle  $0^\circ$ ). Ezután az antennákat kinyitottuk mint egy esernyőt, végállapotuk az X-Y síkon volt (rotation angle  $90^\circ$ ), ekkor egymással  $120^\circ$ -os szöget zártak be.

Szórásos környezet esetén egy olyan belső tér, ahol a tárgyak reflektálják, vagy szórják a műholdról beérkező hullámokat. A nem szórásos környezet egy referencia belső tér, ahol semmilyen zavarás nincs az adó és a vevő között.

A szimuláció eredményét a 7. ábra mutatja a következő oldalon. Folytonos vonal jelzi a szórásos környezet kapacitás változását, szaggatott vonal a tiszta, nem szórásos környezet kapacitás értékeit.

5. ábra  
25°, 5°, far zone, counterclockwise,  
45.1% of points clockwise



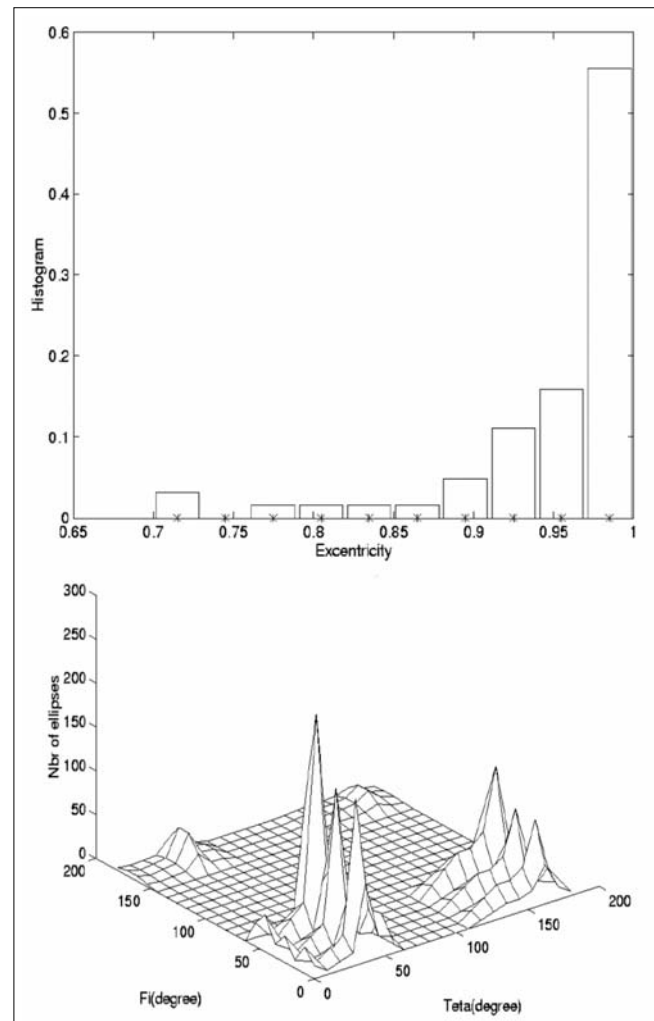
Függetlenül a mutual coupling hatásától (mely egyértelműen a vételi jelszint romlását okozza), látható hogy szórásos környezetben a csatorna kapacitása megközelítőleg egyenletes, míg „tisztá”, szórás nélküli környezet esetén a csatorna kapacitás a nullát éri el, merőleges adó/vevő antennák esetén. Tehát a szórásos környezet  $n \times m$ -es csatorna esetén kapacitásnövekedést okoz.

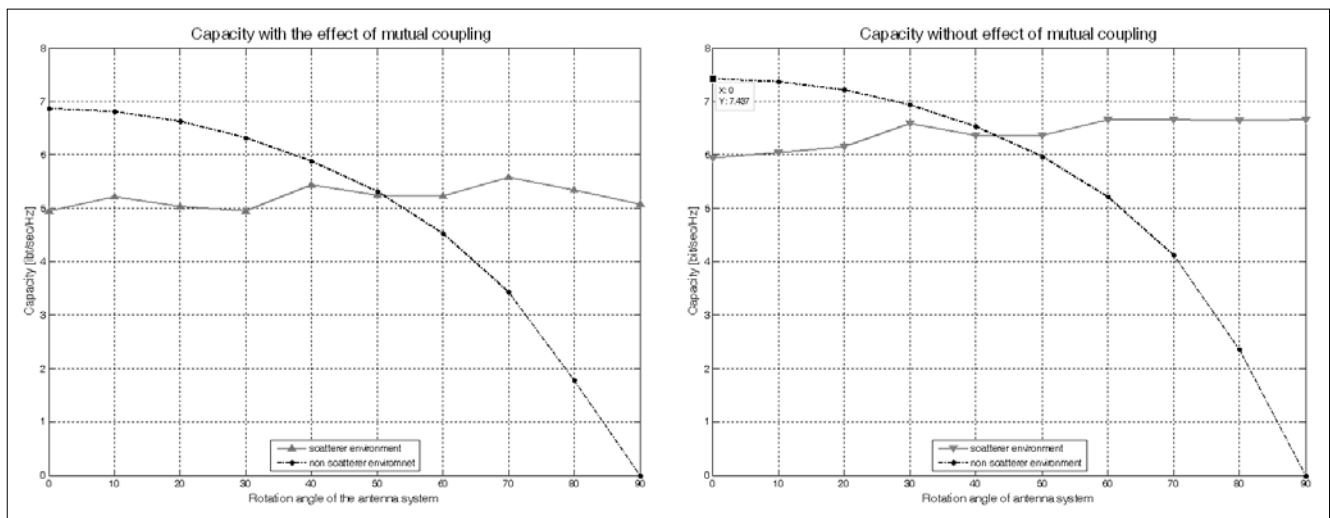
## 7. Összefoglalás

Munkánkban bemutattunk egy módszert a komplex harmonikus elektromágneses mező polarizációs állapotának leírására épület belterében, valamint egy grafikus reprezentációt, mely betekintést adott a rádióhullám komplex polarizációs jelenségére, többutas terjedésű környezet esetén, egy műhold -beltér közötti rádiócsatornás alkalmazásra.

Egy általános konklúzió az irodaépületekre, hogy a beeső síkhullám polarizációs állapotának nincs nagyobb hatása a komplex beltéri harmonikus mezőre. A hullám polarizációja nem marad meg az ablaktól távol eső ré-

6. ábra  
25°, 5°, far zone, linear,  
54.8% of points clockwise





7. ábra A kapacitás változása SIMO rendszerre, szórásos és nem szórásos környezetre

gióban. Más szóval a kör vagy lineárisan polarizált síkhullám létrehoz egy kör vagy lineárisan polarizált komplex harmonikus mezőt az épület belterében a behatolási ponthoz nagyon közel, egyébként a tér diffúz.

A következőkben tervezzük megvizsgálni a polarizációs ellipszis (azimuth és eleváció) beesésiszög-függését. A modellben vizsgálni kell a magasabb elevációs szögek esetén jelentkező ablakon keresztüli diffrakciót.

Továbbá, vizsgálni fogjuk a terjedés keskeny és szélessávú jellemzőit, a késleltetést, a Doppler-szóródást, és a szóró pontok eloszlásának hatását.

### Köszönetnyilvánítás

Köszönetünket szeretnénk kifejezni a Mobil Innovációs Központnak (MIK) a cikk megírásához nyújtott támogatásáért.

### Irodalom

- [1] IEEE Standard 145-1983, IEEE Standard Definitions of Terms for Antennas
- [2] C.E.Balanis, „Advanced Engineering, Electromagnetics”, Wiley&Sons, 1989, pp.154–173; 748–760.
- [3] M.Born, E.Wolf, „Principles of Optics”, Pergamon Press, 1975, pp.28–36.
- [4] Gary R.Olhoft, „Ground Penetrating Radar”, 1998. <http://www.g-p-r.com>
- [5] Z.H.Czyz, „Polarimetric Bistatic Scattering Transformations as seen from Two Different Points of View: Optical (Propagation) and Radar (Transmission) – The Poincaré Sphere Analysis”, U.R.S.I. General Assembly, 1999, p.359.
- [6] D.J. de Smet, „A Closer Look at Nulling Ellipsometry”, 1995. <http://www.tusc.net/~ddesmet>
- [7] Zoltán Sándor, Lajos Nagy, Zoltán Szabó, Tamás Csaba, „Propagation Modeling”, Microwave and Optics Conference (MIOP'97), Sindelfingen, Germany, 1997, pp.213–215.
- [8] Zoltán Sándor, Lajos Nagy, Zoltán Szabó, Tamás Csaba: „3D Ray-Launching and Moment Method for Indoor Radio Propagation Purposes”, The 8th Int. Symposium on Personal Indoor and Mobile Radio Communications (PIMRC'97), Helsinki, Finland, 1997, Vol.1, pp.130–134.
- [9] Adrian K. Fung, „Microwave Scattering and Emission Models and their Applications”, Artech House, 1994, pp.14–26.
- [10] B.G Molnár, I. Frigyes et.al., „Characterization of the Satellite-to-Indoor Channel based on Narrow-Band Scalar Measurements”, PIMRC'97, Helsinki, Finland, Vol.3, pp.1015–1018.
- [11] Raymond L. Pickholz, „Communications by means of Low Earth Orbiting Satellites”, Modern Radio Science, Oxford University Press, 1996, pp.133–151.

# Fedélzeti adatgyűjtő rendszer fejlesztése az SSETI ESMO programjához

BÜKKFEJES ANDRÁS, CSURGAI-HORVÁTH LÁSZLÓ, KOVÁCS ZOLTÁN GYÖRGY,  
KÖKÉNYESI TAMÁS, MAROSY G. ELEMÉR, SZABÓ ISTVÁN, VANCSIK JÁNOS, VARGA LAJOS

BME Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék  
bukkfejes@gmail.com

**Kulcsszavak:** diákműhold, műhold fedélzeti számítógép, tartalékolts rendszer, fedélzeti kommunikáció és telemetria

Cikkünkben az ESMO (European Student Moon Orbiter) fedélzeti adatgyűjtő rendszerének fejlesztését mutatjuk be. Ez a műhold az ESA (European Space Agency) által támogatott fejlesztés keretein belül készül egyetemi hallgatók önálló munkájaként. Az OBDH (Onboard Data Handling Computer) tervezését a tanszékünk diákjaiból álló fejlesztői csoport végzi az űrkutató csoport támogatásával. Bemutatjuk a rendszer főbb elemeit, a fejlesztés fázisait, és a megoldandó részfeladatokat.

## 1. Bevezetés

Az ESMO (European Student Moon Orbiter) az Európai Űrügynökség (ESA) oktatási programjának harmadik diákműholdja. A küldetés célja a Hold felszínének nagy felbontású fényképezése, a gravitációs mező tulajdonságainak mérése, illetve biológiai kísérletek végrehajtása. Az ESMO program 2006 márciusában került jóváhagyásra, melynek célja egy alacsony pályás, Hold körül keringő űreszköz pályára állítása 2011-ben.

A Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszékének Űrkutató Csoportja is részt vesz az SSETI (Student Space Exploration and Technology Initiative) programban. Ennek a programnak a keretében egyetemi hallgatók és doktoranduszok terveznek és építenek műholdakat szoros együttműködésben az ESA oktatási osztályával. Az OBDH (On-board Data Handling Computer) a műhold kulcsfontosságú eleme, melynek feladata a műholdon belüli kommunikáció és adatkezelés biztosítása (a szonda részegységeinek vezérlése, parancsdekódolás, képműrítés stb.).

Ezen feladatok ellátása egy nagy megbízhatóságú rendszert igényel. A feladat megvalósítása igen szerteágazó ismereteket kíván a hallgatók részéről. Meg kell ismerkedniük a műhold rendszertechnikai felépítésével ahhoz, hogy a központi adatgyűjtő rendszer interfész felületei megfelelően legyenek kialakítva. Ismerniük kell a tartalékolts rendszer felépítésének lehetséges módzatait és technikai megoldásának problémakörét.

Az OBDH digitális áramköreit ASIC vagy FPGA áramkörökkel kell megvalósítani az ESA ajánlásai alapján. Ezért meg kell ismerkedniük az FPGA fejlesztés folyamatával is, a digitális áramkörök tervezésével, a HDL programozással és az FPGA áramköri szimulációjával. Az OBDH része különféle analóg jelek mérése is, ehhez szenzoregységeket is integrálni kell a rendszerbe. A fedélzeti adatgyűjtő feladata a telemetria adatok kezelése, összeállítása és továbbítása is. Nagyméretű (több GB) fedélzeti memória illesztése szükséges az átmeneti adattároláshoz. Cikkünkben a fenti OBDH adatgyűjtő rendszer leírását, rendszertervét és a megvalósítási fázisok egyes lépéseit szeretnénk ismertetni.

## 2. Diákok az űrkutatásban

Az ESA oktatási osztálya 2000-ben indította el az SSETI elnevezésű kezdeményezését azzal a céllal, hogy segítse az ESA tagállamok és az együttműködő országok diákjainak az űrkutatásba való bekapcsolódását úgy, hogy megbíz európai hallgatói csoportokat egy műhold, az ESEO (European Student Earth Orbiter) megvalósításával. Az eltelt évek tapasztalatai alapján újabb projektek indítása mellett döntöttek, melyek az 1. ábrán láthatóak.

Az első ilyen az Express, ami egy kisméretű műhold (picosat) volt azzal a feladattal, hogy a lehető leghamarabb pályára álljon és demonstrálja a megvalósíthatóságot. Fellövése 2005-ben sikeresen megtörtént. Ugyan-



1. ábra  
SSETI projektek



ebben az évben kezdődött el az eddigi legkomolyabb küldetés, az ESMO fejlesztésének előkészítése is.

Magyar csapatok először 2006-ban kapcsolódtak be a programba. A BME Űrkutató csoportja már több alkalommal együttműködött az ESA-val, a csoport készítette el például a Rosetta űrszonda energiaellátó rendszerét. Ezek miatt keresték meg az egyetemet az ESEO műhold energiaellátó-rendszerének tervezési és megvalósítási feladataival. Ezzel egy időben az ESEO műhold egyik kísérletét, az LMP (Langmuir Probe, plazmamérő egység) kifejlesztését is elkezdték az egyetem mérnök-fizikus és villamosmérnök hallgatói.

### 3. Küldetésünk

A rendszermérnöki feladatokat ellátó szervezet vezetését is hallgatókra bízta, nem csak az egyes űreszközök megvalósítását. Így minden SSETI projektnek legfontosabb célja az utánpótlás nevelés, minden, az űrkutatás legfőbb területeit érintő témakörben. Amikor a legelső projekt elindult, a legfőbb problémát az okozta, hogy a műhold nem rendelkezett konkrét tudományos céllal. Viszonylag sokáig lehetett pályázni különböző kísérletekkel, ezek a műhold tényleges célját meghatározó eszközök, amelyek nem közvetlenül az űreszköz működéséhez szükségesek, hanem tudományos célúak.

Jól példázta ezt, hogy egy magyar csapat még 2006-ban is tudott csatlakozni a 2000-ben indult programhoz egy tudományos kísérlettel. Ez azonban komoly tervezési problémákat eredményezett, mivel a kísérletek részletes specifikációi nélkül nem lehetett érdemben a műhold működtetéséhez feltétlenül szükséges alrendszerket (adatkezelés, energiaellátás, hőszabályozás) megalkotni. Mikor fény derült ezekre a hiányosságokra, a projekt vezetői úgy határoztak, hogy a meglévő, diákok által készített tervek alapján a lehető leghamarabb összeállítanak egy kisebb műholdat, az Expresst. Ezzel teljesült az elsőként megjelölt cél, felkerült egy diákműhold a világűrbe. Meg kell említeni, hogy az űrmissziót végül sikeresnek könyvelték el annak ellenére, hogy több probléma is volt a túl rövid határidők miatt. Ebből adódóan az űreszköz mindössze néhány órányi korlátozott működésre volt képes, azután elvesztették vele a kapcsolatot. Az ESMO projekt vezetése már igyekszik elkerülni ezeket a hibákat. A nemrég lezárt megvalósíthatósági tanulmányok végére pontosan definiálták, hogy milyen tudományos feladatokat kell elvégezni.

Alapvetően két elsődleges kísérlet kerül fel a szondára. Az egyik a NAC (Narrow Angle Camera), azaz keskenylátószögű kamera, melynek segítségével naponta öt 1024x1024-es felbontású, 1 megapixeles kép készül majd a Hold felszínéről. Maga az optika fix fókusztávolsággal rendelkezik. A megoldás legnagyobb előnye az egyszerűség mellett az, hogy jobb mélységélességű és torzításmentesebb képek elkészítését teszi lehetővé, mint egy konfigurálható lencserendszer. Ez azonban azal a hátránnyal jár, hogy legfeljebb néhány km-es pontossággal tartani kell a 100 km-es távolságot a Hold fel-

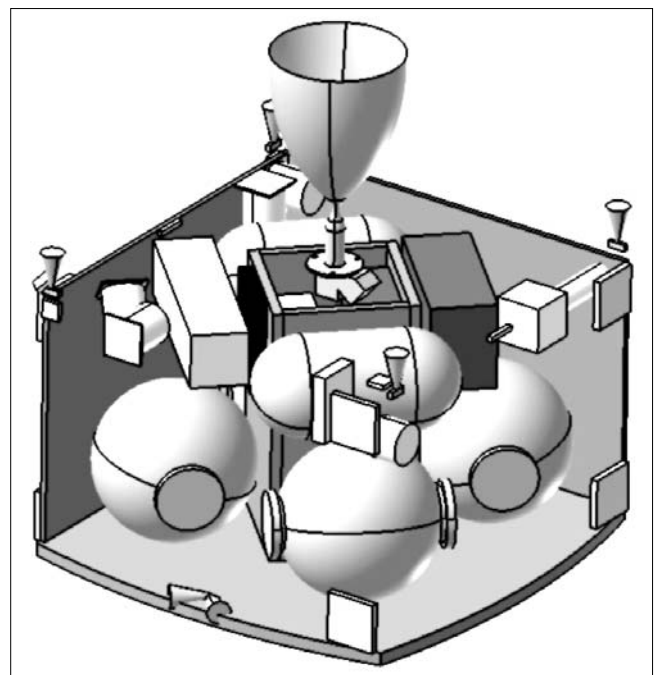
színe felett. Az OBDH feladata lesz a NAC által készített nyers képek tömörítése 1,25 Mbyte-ról ~125 kbyte-ra. A képeket a későbbiekben promóciós és oktatási célokra használnák fel.

A másik fő hasznos teher egy kanadai egyetemen már jórészt kifejlesztett kisebb szonda, a Lunette. Feladata a Hold gravitációs mezejének nagyfelbontású (<20 mGal) feltérképezése. Mikor Hold körüli pályára kerül az ESMO, útjára engedi a Lunette-t, majd radarral meghatározza a két eszköz egymáshoz viszonyított helyzetének a változását (radio range and range rate techniques). Az így nyert adatokból meghatározható a Hold gravitációs tere és ezekből következtethetünk az égitest geológiai felépítésére. Mivel ez a tér korántsem olyan homogén, mint a Földé, így a Lunette segítségével begyűjtött adatok egy esetleges későbbi küldetések során pontosabb kalkulációkat tesznek lehetővé a pálya meghatározásokra vonatkozóan.

Az előbb említett eszközökön kívül még két lehetséges kísérlet pályázik a fedélzetre. Meglepő, de az Apollo program óta nem jutott élő szervezet Hold körüli pályára. Egy BioLex nevű kísérlet vizsgálni kívánja a transzfer során fellépő mikrogravitációs környezet és sugárzás együttes hatását baktériumokra. Ezzel ellenőrizhetik azt az elméletet, amely szerint ilyen módon az élet magvai utazhatnak a világűrben (pánspermia elmélete). Maga a kísérlet felépítése igen egyszerű, egy kis víztartályt megvilágítanak, majd spektroszkópos vizsgálattal figyelik az edényben élő baktériumok fejlődését, vagy esetleges pusztulását.

További alapkutatási feladatot látna el a mikrohullámú radiométer (MWR). Ezzel 3- és 10 GHz-es frekvenciasávokon vizsgálnák a Holdról érkező sugárzást. Ezzel a közvetlenül a felszín hőmérsékleti képe rajzolható fel, ami egy esetleges későbbi Holdra szállás esetén értékes információkkal bírhat.

2. ábra Az ESMO szonda



Végezetül gazdasági szemmel vizsgálva az ESMO alacsony költségvetésű projektnek minősül, így is 5 millió euró nagyságrendű az a pénz, amit az ESA belefektet. Ennek a megtérülése közel sem olyan egyértelműen számolható, mint egy kereskedelmi hold esetén, mégis jól mutatja, mennyire fontos az Európai Űrügynökség számára az utánpótlás biztosítása

#### 4. A fedélzeti adatkezelés feladatai

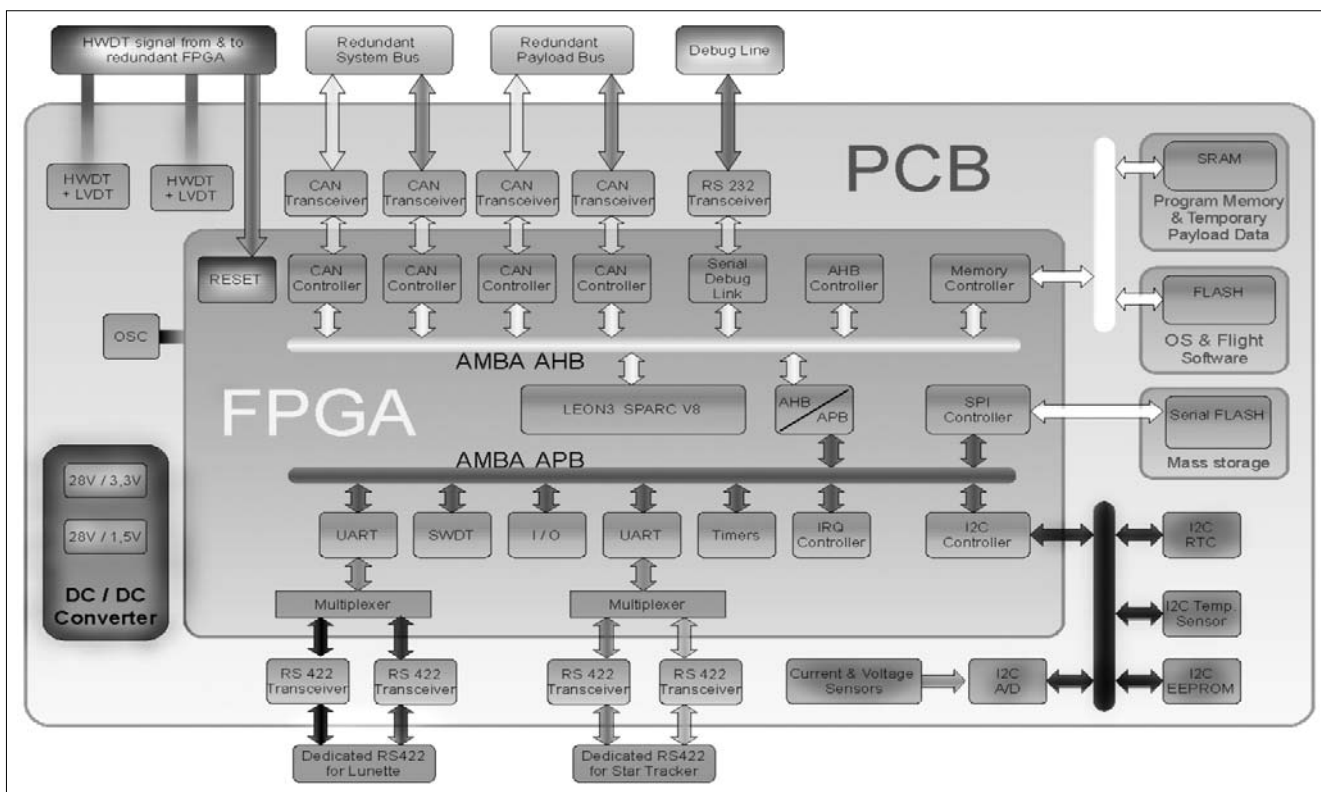
Az ESMO projektben a magyar diákok az OBDH egység megtervezését és megépítését vállalták, ezért néhány szót kell szólni a fedélzeti adatkezelő rendszerek általános felépítéséről és funkciójáról. A fedélzeti számítógép a műhold kulcsfontosságú eleme. Legfőbb feladata a fedélzeti kommunikáció irányítása, a Földre leküldendő adatok ideiglenes tárolása, feldolgozása és tömörítése. Természetesen képesnek kell lennie a Földről küldött és a űreszköz aleggységeitől (energiaellátó rendszer, különböző telemetriai szenzorok, navigációs rendszerek) származó parancsok, utasítások, jelzések feldolgozására, a többi aleggység megfelelő, ütemezett vezérlésére, a vészhelyzetek önálló megoldására. A jeleket analóg csatornákon, párhuzamos vagy soros vonalakon keresztül gyűjtheti be az OBDH. A bemeneti jelek között pontosan definiált prioritási sorrendnek kell lennie. A vett üzenetek feldolgozása során először meg kell győződni azok érvényességéről. Fontos a különböző hibaelenőrző- és javító kódolások például Hamming vagy CRC kód használata a digitális kommunikációs csatornákon.

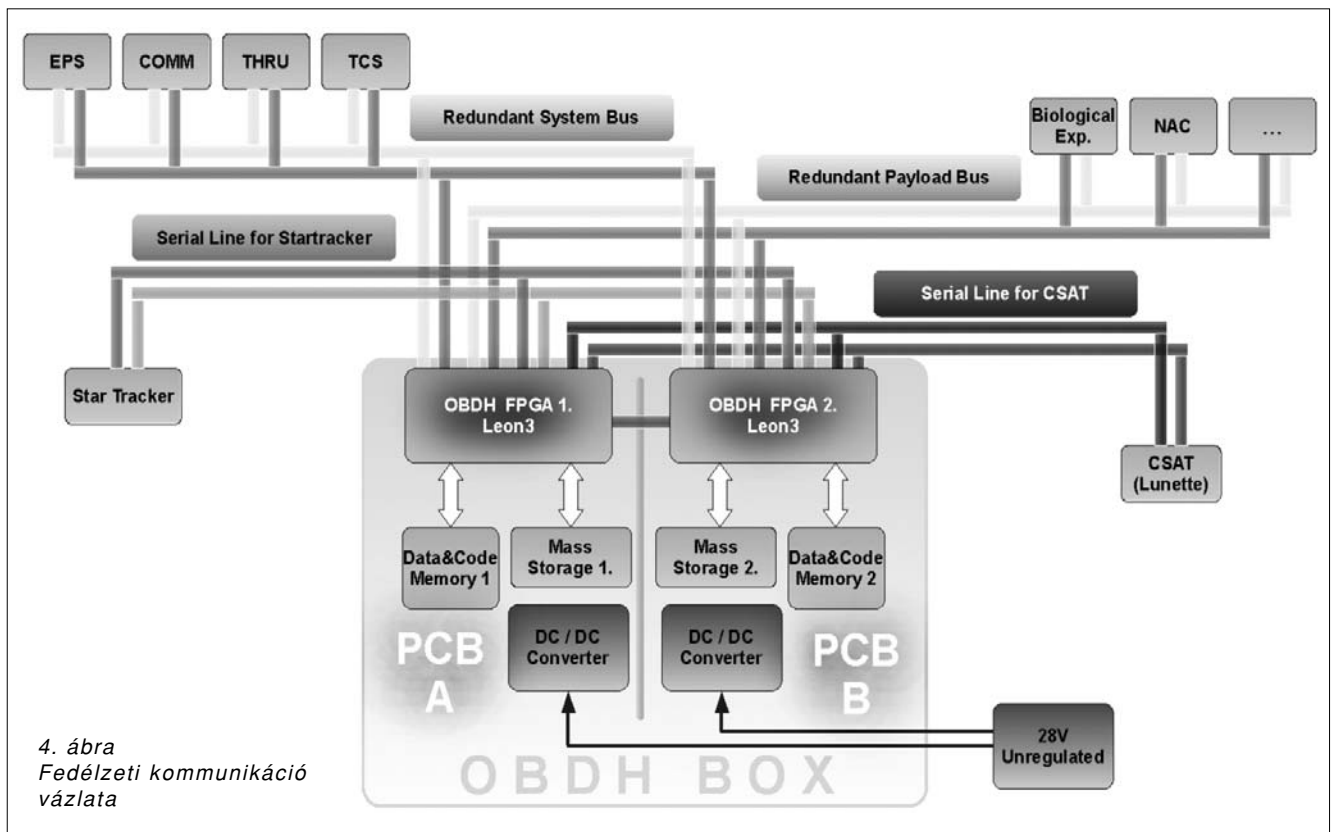
Minden sikeres vételt nyugtának kell követnie. Biztosítani kell az alrendszerek közti szinkronizációt is. A Földről a műhold egy külön kommunikációs egységen keresztül irányítható (COMM).

A rendszer architektúrája alapvetően kétféle lehet. A fedélzeti számítógép állhat a többi aleggységgel pont-pont kapcsolatban (SpaceWire, LVDS), így tulajdonképpen útválasztóként viselkedik, minden parancs és adat rajta megy keresztül. Ezzel szemben lehetnek a műhold aleggységei egy vagy több buszra (I2C, CAN stb.) felfűzve, így külön címezhetőek. A megoldás előnye a kevesebb vezeték mellett az, hogy a köztük folyó kommunikációhoz nem feltétlenül szükséges az OBDH közreműködése. Hátránya viszont, hogy egy vezeték hibája több egység kiesését okozza, ezért redundáns buszokat szoktak kialakítani.

Az adatkezelő rendszer négy fő komponense a CPU, a memóriák, a fedélzeti szoftver és a különböző telemetriai és biztonsági rendszerek. Alkalmazhatók általános célú, valamint beágyazott processzorok, de DSP-k és grafikus processzorok használata is elő szokott fordulni műholdas alkalmazásokban. Az általános célú processzorok hátránya nagy erőforrásigényük (fogyasztás, méret, külső memória), valamint, hogy kevés beépített perifériát tartalmaznak. A beágyazott processzorok ezzel szemben a fizikai valósággal történő kapcsolattartásra lettek tervezve, ennek megfelelően alacsonyabb az erőforrásigényük, több a perifériájuk, viszont kevésbé általánosak, számítási kapacitásuk kisebb. Alternatíva lehet az FPGA, ahol a processzormag és a szükséges perifériák egyedileg meghatározhatók. Az általunk preferált megvalósítás a 3. ábrán látható.

3. ábra A fedélzeti számítógép egyik moduljának blokkvázlata





4. ábra  
Fedélzeti kommunikáció  
vázlata

Általában az OBDH a processzoron kívül RAM-ot, ROM-ot, digitális I/O-vonalakat, kommunikációs interfészeket (soros, párhuzamos), valamint A/D és D/A konvertereket tartalmaz az analóg perifériák kezelésére. A nem felejtő ROM tárolja a minimális indító szoftvert. A mérete néhány száz kbyte-tól Mbyte-os nagyságrendig terjedhet, típusa EEPROM vagy FLASH. Az adat- és kódmemória általában SRAM vagy DRAM. Az EEPROM-mal szemben ezek érzékenyebbek a sugárzásra, ezért valamilyen hibavédelmet kell beépíteni (ECC, EDAC). Mindezekon kívül a rendszerhez külső háttértár hozzáépítése is szükséges, amelynek a kapacitása nagyobb a RAM-énál és nem felejt, ha a tápellátás megszűnik, vagy ha a rendszert valami miatt újra kell indítani. Többféle megoldás is lehetséges, például az SD-kártya, melynek nagy kapacitása és néhány Mbit/s soros adatátviteli sebessége van. Lehet FLASH alapú, IDE/ATA interfészű tároló, merevlemez, SPI, I2C, esetleg CAN buszra csatlakoztatható FLASH, SRAM vagy DRAM modul is.

További fontos rendszerkomponensek a valós idejű óra és a független watchdog áramkör. Utóbbi feladata a processzor egy dedikált jelének figyelése, majd, ha az nem érkezik meg megadott időn belül, a rendszer újraindítása. Az egész műhold egyébként egy speciális parancsral (Firecode) újraindítható. A működéshez speciális anyagok és tervezés szükségesek, ugyanakkor minimalizálni kell a fogyasztást, tömeget és a költségeket.

Több tényező optimális egyensúlyát kell tehát megtalálni, úgy, hogy ez ne menjen a megbízhatóság rovására. Először meg kell határozni az OBDH által megvalósítandó funkciókat és azok bonyolultságát (műveletvégzési sebesség, csatornák száma, tárolandó adat mennyisége), majd a főbb követelményeket, mint például a fogyasztás, méret, tömeg, sugárzás, élettartam, megbízhatóság, kommunikációs és interfészbeli kötöttségek. Ezután becsülhető a szükséges rendszer bonyolultsága, kiválasztható a megfelelő processzor-típus majd pontosítható az egyes komponensek paraméterei. Végül elkészíthető a rendszerterv és a további dokumentációk. A fedélzeti számítógép gyakran az utoljára megtervezett alegysége a műholdnak. A fent említett alternatívák vizsgálatát követően a következő megoldásra jutottunk.

nyisége), majd a főbb követelményeket, mint például a fogyasztás, méret, tömeg, sugárzás, élettartam, megbízhatóság, kommunikációs és interfészbeli kötöttségek. Ezután becsülhető a szükséges rendszer bonyolultsága, kiválasztható a megfelelő processzor-típus majd pontosítható az egyes komponensek paraméterei. Végül elkészíthető a rendszerterv és a további dokumentációk. A fedélzeti számítógép gyakran az utoljára megtervezett alegysége a műholdnak. A fent említett alternatívák vizsgálatát követően a következő megoldásra jutottunk.

## 5. Rendszerterv

Az általunk javasolt fedélzeti kommunikáció megvalósításának bemutatása a 4. ábrán látható.

System-On-Chip rendszert terveztünk, így minimalizálva a diszkrét alkatrészek és a hibaforrások számát. A rendszer lelke egy kis fogyasztású, de nagy megbízhatóságú és kapacitású FPGA, ebbe implementáljuk többek között a Sparc V8 processzort, a memória vezérlőket és a periféria illesztőket. Az FPGA-n kívül a tápegység, a memóriák, a szenzorok és a szintillesztők lesznek csak diszkrét hardverelemként megvalósítva. Az FPGA működéséhez és felügyeletéhez szükséges még a Real Time Clock modul, Watchdog Timer és egy oszcillátor.

Az ESA követelményei alapján a rendszert egy pont meghibásodásának tolerálására kellett tervezni. Az ilyen szintű redundancia biztosításához két, teljesen megegyező, de független és egymással kommunikáló OBDH panel megvalósítása mellett döntöttünk. A két számítógép

gép hidegtartalékolt rendszert alkot, vagyis az egyik számítógép „alszik” és csak abban az esetben lép működésbe, ha a másikkal probléma van, illetve a biztonsági mentés idejére.

## 6. Jelenlegi állapot, és a jövőbeni terveink

A tervezési folyamat során nagy hangsúlyt kell fektetni a többi csapattal való együttműködésre. Ez az OBDH esetén különösen kritikus, hiszen a fedélzeti számítógép a műhold szinte minden alegységével kapcsolatban áll, megfelelő működése a küldetés sikerességének szempontjából elengedhetetlen. Minden egyes alegység készítőjével tisztázni kellett a kapcsolódási interfészt, a használni kívánt protokollt és az adatátvitel során igényelt minőségi jellemzőket, például: időegységenként elküldött adatmennyiség, burst vagy folyamatos átvitel, redundanciával kapcsolatos igények.

Sajnos gyakran előfordul az, hogy a specifikációk már az egyeztetések lezárása után módosításra kerülnek, ezzel esetenként sok fejlesztői óra megy veszendőbe. Jelenleg is zajlanak egyeztetések a többi csapattal online, fél évente 1-2 alkalommal pedig 1 hetes workshop keretein belül személyesen. A workshopok a hollandiai Noordwijkban, az ESA kutatási és technológiai központjában (ESTEC) kerülnek megrendezésre. A tervezés egyik legfontosabb alapköve a megfelelő minőségű dokumentálás.

Mint a hosszú távú projekteknél általában, ezzel az üresközzel kapcsolatos munkák is több fázisban zajlanak. Az első az „A-fázis”, ami egy megvalósíthatósági tanulmány. A csapat már elkészítette e fázist lezáró dokumentációt, a jelenlegi specifikációk és körülmények között a tervezési feladatokat erre a fázisra befejeztük. A dokumentációval kapcsolatban az ESA mérnökeinek visszajelzéseit megkaptuk, amik alapján leadtuk a végleges, az egész első fázist lezáró dokumentációkat.

Most kezdődött meg a „B1” fázis, melynek során konkretizálódnak az alegységek specifikációi, illetve az első prototípusok megépülnek. Az első deszkamodellt még az év első felében tervezzük megvalósítani. Azért van szükség legalább egy ilyen szintű hardver mielőbbi realizálására, hogy az OBDH hardverén futó fedélzeti adatgyűjtő szoftvert készítő, szintén BME-hallgatókból álló OBDH szoftver-csapat a lehető leghamarabb el tudja kezdeni az érdemi munkát.

## Köszönetnyilvánítás

Az OBDH csapat ezúton mond köszönetet a BME Űrkutató csoportjának, külön kiemelve dr. Szabó Józsefet, aki sok hasznos tanáccsal segítette a csoport munkáját, valamint a BME Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszékének, amely biztosítja a laborhozzáférést és segíti a pályázati tevékenységeket.

## A szerzőkről

**Bükkfejes András** harmadéves BSc villamosmérnök hallgató, csapatkoordinátor, szervezési kérdések mellett a tesztkörnyezet kialakításában vesz részt.

**Csurgai-Horváth László** a tanszék űrkutató csoportjának mérnöke, rendszeres konzultációival segíti a fejlesztői csoportot.

**Kovács Zoltán György** végzős villamosmérnök hallgató, ESMO OBDH rendszer-mérnök és a rendszerkonceptió megalkotásában vesz részt.

**Kökényesi Tamás** harmadéves BSc villamosmérnök hallgató, technológiai kérdésekkel (környezet, alkatrészválasztás, nyomtatott áramkör stb.) foglalkozik.

**Marosy Gábor Elemér** végzős villamosmérnök hallgató, az ESMO OBDH rendszertervének kialakításán dolgozik.

**Szabó István** végzős villamosmérnök hallgató, a technológiai kérdések vizsgálatával foglalkozik.

**Vancsik János** harmadéves BSc villamosmérnök hallgató, a kommunikációs protokollok kialakításán dolgozik.

**Varga Lajos** harmadéves BSc villamosmérnök hallgató, a tesztkörnyezet kialakításában vesz részt.

## Irodalom

Az SSETI hivatalos honlapja:  
<http://www.sseti.net/>

# Kisműholdak megbízhatóság és hatásfok szerint optimalizált energiaellátó rendszere

KOCSIS GÁBOR, SZIMLER ANDRÁS

BME Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék, Űrkutató Csoport  
{gabor.kocsis, szimler}@mht.bme.hu

**Kulcsszavak:** energiaellátó rendszer, megbízhatóság, hatásfok, napelem

A nagyméretű műholdak fedélzetén a költséghatékonyság, illetve a tervezés és kivitelezés egyszerűsítése céljából alkalmazott (és sokszor standardként kezelt) rendszertechnikai, áramköri és technológiai megoldások gyakran nem adoptálhatók a kisműholdas missziókba. Ennek oka főként az erősen korlátozott rendelkezésre álló teljesítmény és a szigorú méretkorlát. Ezért a kisméretű űreszközök esetén elengedhetetlen a küldetésorientált tervezési szemlélet. Különös tekintettel igaz ez az alaprendszerekre, melyek meghibásodása esetén az egész misszió veszélybe kerül, illetve kudarcba fulladhat. Minden űreszköz egyik legkritikusabb alrendszer az energiaellátó rendszer. A cikk két konkrét példán keresztül tárgyalja a kisműholdak tápellátó rendszereinek fő tervezési szempontjait, valamint ismerteti a két különböző specifikációnak megfelelő rendszer tervezése során felmerült optimalizálási szempontokat.

## 1. Bevezetés

A két bemutatott műhold egyike egy 120 kg tömegű, 600 mm átmérőjű kisműhold, melynek fejlesztése jelenleg is zajlik. Az ESEO (European Student Earth Orbiter) az Európai Űrügynökség (ESA, European Space Agency) által koordinált program, melynek keretében európai egyetemista diákcsoportok egymással kooperálva fejlesztenek ki egy kisműholdat. A programban 12 ország több mint 20 egyeteme vesz részt és minden egységet külön-külön csoport fejleszt. A műhold energiaellátó rendszerét az Űrkutató Csoport által támogatott diákcsoport fejleszti, továbbá két tudományos műszer is a BME-n készül. Az űreszköz tudományos célja sugárzás mérése a Van-Allen övekben, új alkatrészek és egységek tesztelése, fényképek készítése a Földről és a Holdról, valamint egy plazmadiagnosztikai mérőműszer is helyet kap rajta. Az ESEO műhold látványterve és strukturális felépítése az 1. ábrán látható.

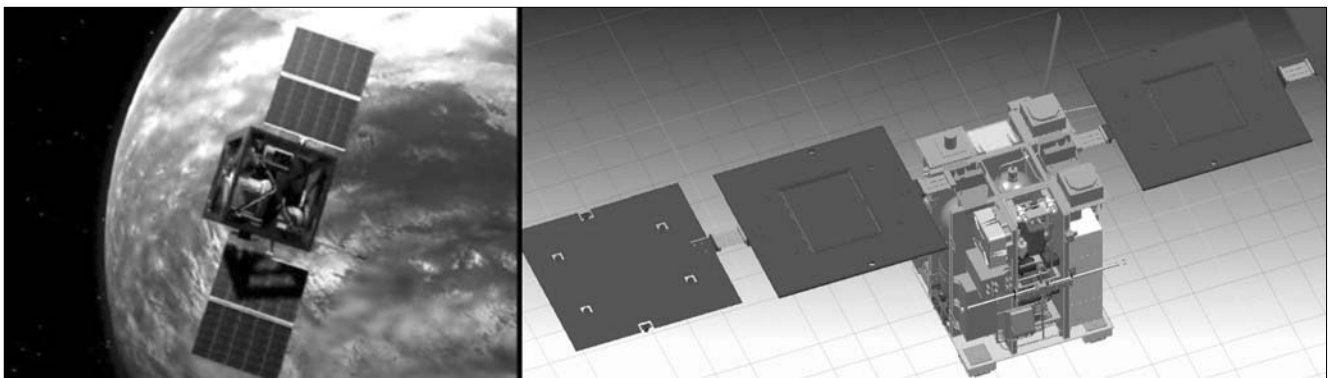
A másik, szintén az Űrkutató Csoport által kifejlesztett rendszer egy mindössze 1 dm<sup>3</sup> térfogatú, úgynevezett nanoműhold egyetemi hallgatói mérés számára elkészített modelljének energiaellátó rendszere. A speci-

fikáció alapján jól szemléltethető, hogy az igen alacsony költségvetésű programokban a misszió szempontjából kritikus egységek tervezésénél milyen kompromisszumokra kényszerül a tervező. Ezen felül a mindössze maximum néhány centiméteres oldalhosszúságú műholdak esetén a költségvetés mellett két másik kulcsfontosságú paraméter határozza meg a tervezést: a szigorú méret és teljesítmény korlát. Mint később látni fogjuk, az imént felsorolt paraméterek egymással is összefüggnek.

## 2. Energiaforrások

Az ESEO esetében részben a sokféle fedélzeti kísérlet miatt, részben pedig amiatt, hogy egy diákműholdról van szó, az energiaellátó rendszernek a műhold méretét tekintetbe véve viszonylag nagy, 250 W körüli teljesítményt kell kezelnie. A műhold két kinyitható napelemtáblája a pálya napos szakaszán folyamatosan a napsugárzás maximális beesési szögének irányába lesz vezérelve, így megfelelő számú napelem cellával a két panel képes biztosítani a műholdfedélzeti egységek név-

1. ábra Az ESEO műhold



leges energiaigényét. Az ESEO geostacionárius átmeneti pályára (GTO, Geostationary Transfer Orbit) kerül, ahol az árnyékos szakasz várható maximális hossza 2 óra. Ezen időszak alatt a műhold teljes energiaellátásáért két, egyenként 7 darab 6.8 Ah kapacitású cellából álló Li-ion akkumulátor felel. Ezen felül a napszakaszon fellépő nagy teljesítményigényű folyamatok (mint például a misszió pályamódosítási fázisában a fűvókák működése) esetén a napelemek mellett az akkumulátor szolgál másodlagos energiaforrásként. Általánosan elmondható, hogy az akkumulátor a műholdak egyik legkritikusabb egysége, meghibásodása már számos misszió kényszerű befejeződéséhez vezetett. Ezért a megfelelő, ürkörülmények között is használható típus kiválasztásán túl igen fontos az akkumulátor védelme, valamint aktuális állapotának ismerete.

Az ESEO energiaellátó rendszerében két független akkumulátorvédelem található: a szélsőséges hőmérsékleti viszonyok, valamint a túltöltés, illetve mélykisülés elleni védelem. A passzív hőmérsékletszabályozással rendelkező ESEO fedélzetén a termál szimulációk alapján a minimális hőmérséklet  $-45...-50^{\circ}\text{C}$  is lehet, ezért az akkumulátor melegítése céljából az akkumulátor dobozának falára kapton szigetelésű fólia ellenállások kerülnek. Az ezekre folytatott áram szolgál az akkumulátor fűtésére. A másik szélsőség a  $+80...+90^{\circ}\text{C}$ -os hőmérséklet. Ebben az esetben a hőelvezető réteg, valamint a fölösleges hő eldisszpálása jelenti a megoldást.

Az akkumulátor túltöltésének, illetve túlzott kisütésének megakadályozását megbízható analóg elektronika végzi. Ezen kívül az akkumulátor állapotának folyamatos figyelését egy akkumulátorfeszültséget monitorozó áramkör végzi, mely külön méri minden egyes cella feszültségét és a mérési eredményeket telemetria adatként szolgáltatja a fedélzeti számítógép számára.

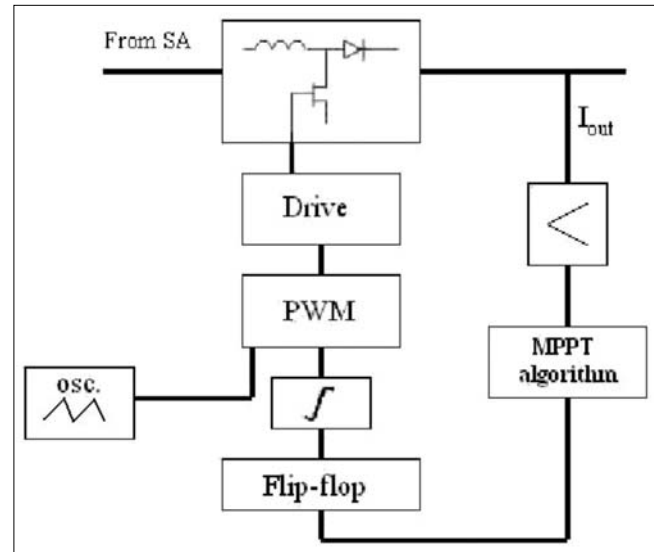
A nanoműhold esetén részben hasonló, részben viszont eltérő az alapkonceptió. A primer energiaforrást a műhold mind a hat oldalára rögzített napelemtáblák biztosítják, míg a szekunder energiaforrás két párhuzamosan kötött Li-polimer akkumulátor cella. A rendkívül kis méret, továbbá az ebből adódó igen korlátozott teljesítmény miatt csak a legszükségesebb védelmi áramkörök (alul- és túlfeszültség, valamint hőmérsékleti védelem) kerülhetnek a rendszerbe.

### 3. A maximális teljesítmény kinyerése

Mindkét energiaellátó rendszer fontos része az MPPT (Maximum Power Point Tracker) egység. Ennek feladata, hogy a hozzá kapcsolódó napelemet folyamatosan annak maximális teljesítményű munkapontjában tartsa, illetve kimozdítsa onnan abban az esetben, ha a rendelkezésre álló energia meghaladja a műholdfedélzeti egységek által igényelt és az akkumulátor töltéséhez szükséges energiamennyiség összegét.

A két különböző rendszer MPPT áramkörei ugyanazon az alapelven működnek: kimeneti teljesítményük maximalizálása érdekében bemeneti feszültségüket, vagyis

a napelem feszültséget változtatják. Az egyszerűsített MPPT blokkvázlat a 2. ábrán látható. Itt egyből szembeűnik, hogy a kimeneti teljesítmény helyett a visszacsatolt szabályzási paraméter a kimeneti áram, ami azon a feltételezésen alapszik, hogy a kimeneti feszültség állandónak tekinthető. Ez jogos feltevés, mivel a kimeneti feszültség maga a buszfeszültség, amit a rákapcsolódó akkumulátor feszültsége határoz meg. Ez utóbbi pedig az MPPT szabályzó körének 20 kHz nagyságrendű frekvenciájával összevetve valóban olyan lassan változik, hogy egy szabályozási ciklus alatt konstansnak tekinthető.



2. ábra MPPT blokkdiagram

Az alapelv tehát megegyezik, az áramköri realizáció viszont eltérő az ESEO, illetve a nanoműhold esetében. Ennek oka a megbízhatóság és a fogyasztás közti optimalizációban keresendő. Az ESEO esetében rendelkezésre álló napenergia elegendő ahhoz, hogy egy picit nagyobb fogyasztású, azonban nagy megbízhatóságú, teljesen analóg auto-oszcillációs MPPT kerülhetett az energiaellátó rendszerbe. Ezzel szemben a nanoműholdon az analóg IC-k több száz mikroamperes fogyasztása is már gondot okoz. LEO (Low Earth Orbit, vagyis Földközeli) pályákon a napsugárzás felületi teljesítménysűrűsége nagyjából  $1400\text{ W/m}^2$ . Ez azt jelenti, hogy a 10 cm-es oldalhosszúságú nanoműhold modell teljes bemenő teljesítménye a legoptimistább közelítés mellett is csak maximum 2-3 W (háromrétegű, 28%-os konverziós határfokkal rendelkező napelem cellákat feltételezve és szem előtt tartva, hogy a Nap egyszerre csak legfeljebb 3 oldalát világítja meg a műholdnak, azokat sem  $90^{\circ}$ -os beesési szög mellett).

Ebből az igen kis teljesítményből kell megoldani az összes fedélzeti egység (kommunikáció, fedélzeti számítógép, kísérletek, esetleg aktív stabilizálás) táplálását. Ezért a fogyasztás csökkentésének itt nagyobb szerepe van, mint az ESEO esetén, még akkor is, ha ez a megbízhatóság rovására megy. A nanoműholdas MPPT modelláramköre ezért az MPPT algoritmust alacsony fogyasztású mikrokontrollerben valósítja meg.

A redundancia azonban mindkét rendszerben hasonló filozófián alapszik: minden egyes napelemre külön MPPT csatlakozik, melyek kimenetei – a visszatáplálást elkerülendő – diódával közösítve kapcsolódnak a buszra. Ez látható a 3. ábrán, mely az ESEO rendszertervét mutatja be. (Az ábrán feltüntetett többi egység a későbbiekben kerül ismertetésre.)

Ez a megoldás egyfajta melegtartalékot biztosít, magában foglalva természetesen azt a lehetőséget, hogy az egyik MPPT meghibásodása miatt a hozzá kapcsolódó napelem is használhatatlanná válik. További tartalékegységek beiktatása azonban az energiaellátó rendszer méretének megengedhetetlen mértékű növekedését eredményezné. Az ESEO-n két napelem van, ezért a fent említett melegtartalékolás racionális megoldásnak bizonyul.

Felmerülhet azonban a kérdés, hogy az egyébként is igen kis méretű nanoműholdra miért kell minden egyes oldalhoz külön MPPT-nek kapcsolódnia, hiszen a szemben lévő napelemeket egyidejűleg soha nem éri közvetlen napsugárzás, így ezek dolgozhatnának közös MPPT-re. Azonban éppen a kis méret miatti rendkívül kis bemeneti teljesítmény okán merült fel annak gondolata, hogy az albedo-jelenséget, vagyis a Földről visszavert napsugárzást is felhasználjuk energianyerésre. Ez LEO pályákon átlagosan a közvetlen sugárzás teljesítménysűrűségének 30%-ára tehető, ami közel sem elhanyagolható. Így a közvetlenül megvilágított és a visszavert sugárzást kapó napelemek külön-külön MPPT-re dolgoznak, melyek így minden egyes napelemből a tényleges maximálisan kivethető teljesítményt juttatják a buszra.

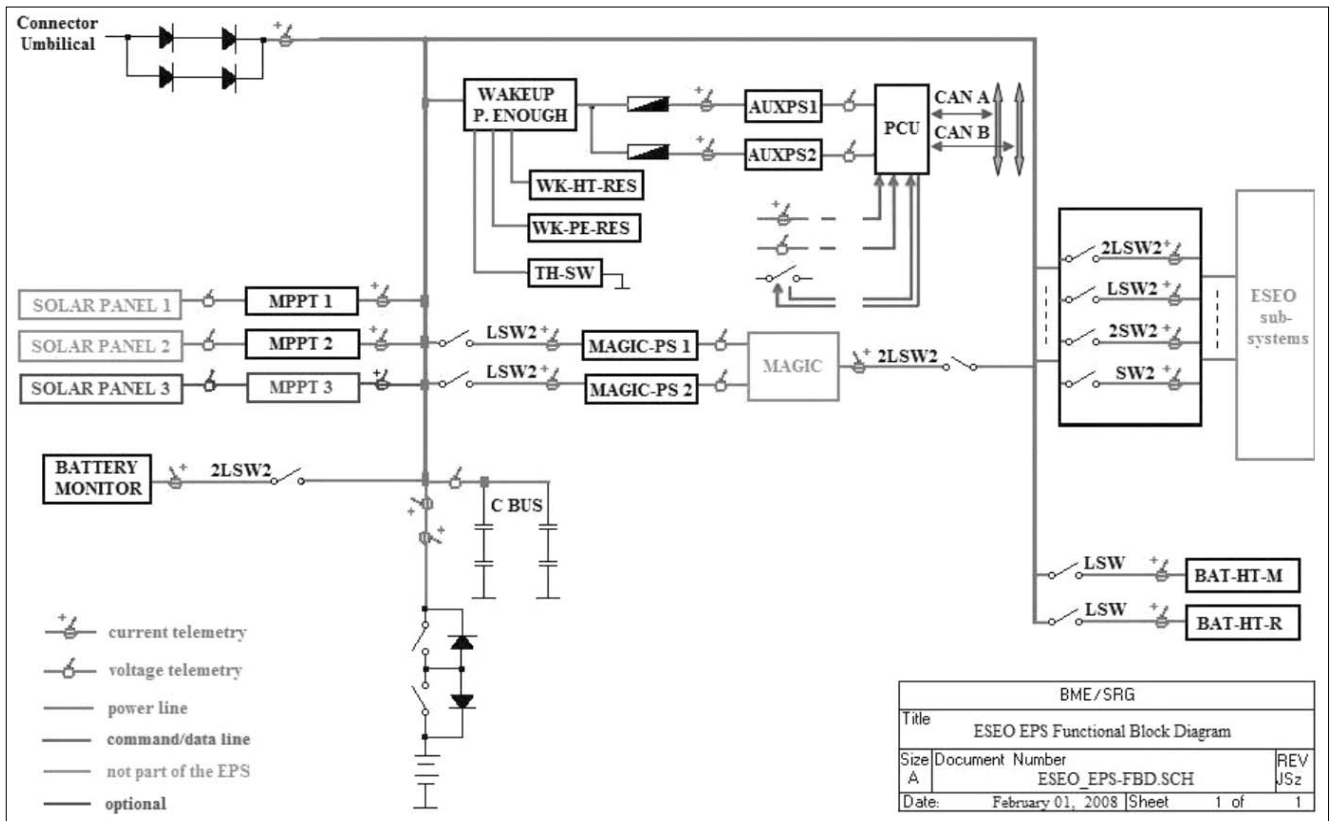
### 4. Energiaelosztás

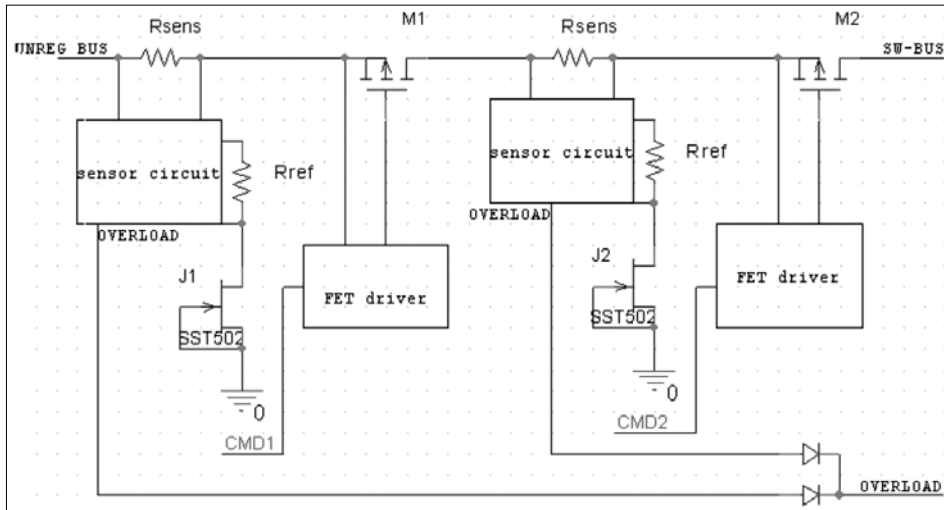
Mindkét rendszer szabályozatlan buszfeszültségű architektúrára épül. Ez azt jelenti, hogy a napelemeket az MPPT konverterek illesztik a buszra és a buszfeszültség az akkumulátor aktuális feszültsége határozza meg. Egy buszra kapcsolódó egység meghibásodásából adódó esetleges túláram a buszra kapcsolódó többi egység meghibásodásához vezethetne. Ezért minden egység áramlimitált kapcsolókkal választható le, amint egy meghatározott időnél (10 ms) hosszabb ideig a küszöbértéknél nagyobb áramot vesz fel. Ez az áramküszöb természetesen minden egység esetén más és más, az adott egység névleges és maximális teljesítményfelvételéhez igazított érték.

A 4. ábra a limiter kapcsolók működését szemlélteti. A kapcsoló FET a központi vezérlőegységtől érkező parancs jellel (CMD) kapcsolható be és ki. Ha az érzékelő ellenálláson ( $R_{sens}$ ) mért áram meghaladja az előre beállított küszöbértéket, akkor a kapcsoló automatikusan limitálja az átfolyó áramot és az áramkör overload jelzést generál a központi vezérlő egység számára, ami 10 ms múlva lekapcsolja a terhelést a buszról.

A 4. ábrán két soros kapcsoló látható. Ez a 3. ábra rendszertervében jobb oldalt látható négyféle kapcsoló közül az LSW2 jelzésűnek felel meg. A négy kapcsoló közül a kapcsolt egység típusától függően kell választani. Ha az egység nem redundáns, akkor a szakadás és a rövidzár elleni védelem céljából két párhuzamos kapcsoló ágon keresztül csatlakozik a buszra és mindkét ág két soros kapcsolót tartalmaz (2LSW2).

3. ábra Az ESEO műhold energiaellátó rendszerének blokkvázlata





4. ábra Limiter kapcsolók

A fent bemutatott LSW2 a redundáns egységek kapcsolására szolgál. A további két kapcsoló típus (2SW2, SW2) a rezisztívnek tekinthető nem redundáns, illetve redundáns terheléseket kapcsolja. Ezeknél az egységeknél nem áll fenn rövidzár veszélye, jellegükből adódik az áramkorlátozás, így külön védelmi áramkörre nincs szükség. Ilyen rezisztívnek tekinthető terhelés például az akkumulátor fűtőellenállása.

## 5. Vezérlés

Az ESEO műhold energiaellátó rendszerének blokkvázlatán látható a PCU (Power Control Unit) nevű egység, mely két, egymással hideg redundanciában működő FPGA-n alapul. A PCU feladata a fent ismertetett kapcsolók vezérlése, valamint telemetriai adatok begyűjtése és CAN buszon való továbbítása a műhold fedélzeti számítógépe számára. A telemetria adatok a napelemek és az akkumulátor áramát, feszültségét és hőmérsékletét, valamint a buszra kapcsolódó további alrendszerek által felvett áramokat tartalmazzák. A PCU két FPGA-ja egy-egy segéd tápegységen (AUX-PS) keresztül kapja a működéséhez szükséges 5V-ot. Az ESEO PCU egységének köszönhetően az energiaellátó rendszer a fedélzeti számítógéptől függetlenül képes működni.

Belátható, hogy a nanoműhold esetében a fenti megoldás méretéből adódóan nem valósítható meg, ezért az energiaellátó rendszer vezérlését a redundáns fedélzeti számítógépre kell bízni. Szintén a helykorlát miatt nem kerül be a rendszerbe az a kiegészítő áramkör, ami az ESEO energiaellátó rendszerében a túlzott lehűlés esetén az összes egység lekapcsolásáért, az energiaellátó rendszer dobozának felfűtéséért, majd az egységek oszcilláció-mentes bekapcsolásáért felel (Wakeup áramkör).

## 6. Alkatrészválasztás

Mivel az űrminősítésű alkatrészek ára igen magas (használatukat sokszor nagyobb költségvetésű programok-

ban is kerülik), ezért az ESEO tápellátó rendszerében lehetőség szerint hétköznapi, azonban az űrben tapasztalható sugárzásnak és szélsőséges hőmérsékleti viszonyoknak ellenálló alkatrészek kerülnek. Fontos a megfelelő tokozás kiválasztása, mely nem csak a széles hőmérsékleti ingadozásokkal, hanem a vákuummal szembeni védelmet is szolgálja. A kritikus alkatrészek, mint például az FPGA-k ipari változata kerül a repülő példányba.

Nanoműholdas modell esetén minden egység COST (Commercial Off-The Shelf) alkatrészekből épül fel. Ennek nem az az oka, hogy a modell csak földi alkalmazásra (nevezetesen hallgatói mérésre) készült, mivel elkészítésénél a teljes mértékű hitelességre törekedtünk. Az ilyen kis műholdaknál az általában igen alacsony költségvetés miatt a repülő példányokba is közönséges alkatrészek kerülnek. Ezt valamelyest kompenzálhatja a rendelkezésre álló hely függvényében beépített redundancia.

## 7. Összefoglalás

A cikk két konkrét példán keresztül tárgyalta a kisméretű műholdak alrendszereit érintő rendszertechnikai kérdéseket és áramköri megoldásokat. A két megvalósított energiaellátó rendszer felépítését bemutatva rávilágított a kisműholdas alrendszerek missziótól függő tervezési szempontjaira, továbbá szemléltette a két legfontosabb paraméter, a megbízhatóság és a határfok szerinti optimalizáció jelentőségét.

### Köszönetnyilvánítás

A szerzők ezúton fejezik ki köszönetüket a Magyar Űrkutatói Irodának a két energiaellátó rendszer megvalósításához nyújtott támogatásért.

### A szerzőkről

**Szimler András** 1989-ben szerzett diplomát a Budapesti Műszaki Egyetem (BME) Villamosmérnöki Karán. Azóta a BME Szélessávú Hírközlés és Villamoságtan Tanszék Űrkutató Csoportjában dolgozik. Szakterülete a műhold fedélzeti tápellátó rendszerekben belül a napelemes energiaellátás témaköre. Részt vett több űreszköz energiaellátó rendszerének fejlesztésében, gyártásában és integrálásában.

**Kocsis Gábor** 2006-ban diplomázott a BME Szélessávú Hírközlés és Villamoságtan Tanszékén. 2005-ben kapcsolódott be a tanszéken működő Űrkutató Csoport munkájába, ahol jelenleg doktorandusz hallgatóként több műholdas energiaellátó rendszer fejlesztésében is részt vesz.



### **Main areas of international and Hungarian space research**

*Keywords: space research, space activity, satellites*

Space research or more exactly, space activity is a very wide area. In this thematic issue of „Infocommunications”, some Hungarian results are presented. In order to enable our readers to position these efforts within the whole area of space activity, this paper attempts to present a general picture of the space activity worldwide and in Hungary. We cannot provide a complete picture within a single article even for Hungary, not to speak about the many developments and applications worldwide.

### **Space research and astrobiology**

*Keywords: simulation facilities, UV-radiation, ISS, solar spectrum, DNA damage due to UV*

The authors present astrobiology as a newly developed branch of the space research. Astrobiology is interested in the evolution of the living systems on the Earth, in the possibilities of the life in several parts of the Universe. In the experiments two main approaches are applied: terrestrial models/simulation chambers of high technical quality, there are performed in situ investigations in specific places of the Universe. In the paper the simple biological systems, bacteriophage T7 and uracil molecules are presented as the samples of the investigations.

### **Testing of the SAS2 ULF-VLF electromagnetic wave analyzer in the space – on board of the „Kompas” satellite**

*Keywords: VLF, whistler, electromagnetic monitoring, electromagnetic wave propagation, space weather*

The paper presents electromagnetic phenomena observed by the SAS2 electromagnetic wave analyser installed on board of „Kompas-2” satellite. Phenomena identified include Whistler couples, originally observed by the first SAS instrument in 1989, Spiky Whistler (SpW), originally identified by processing the data delivered by satellite Demeter. Moreover, guided mode Whistler signals were first time identified. Theoretical solution for ultra-wideband signals was also given.

### **Data collection and control system for the BepiColombo mission**

*Keywords: space probe, data handling, data bus, embedded system, SpaceWire*

The BepiColombo mission to Mercury, with Hungarian participation, is explained briefly. A new onboard communication bus named SpaceWire has been implemented on this spacecraft. This article presents the benefits and provides a summary of this standard.

### **Passive space dosimetry with Hungarian participation**

*Keywords: dosimetry, cosmic radiation, ISS, solid state nuclear track detector*

This article presents two currently running space research projects: the MATROSHKA and the BIOPAN programs which are going on with international collaboration (also with Hungarian participation) under the aegis of the European Space Agency and the Institute for Biomedical Problems, Moscow. The MATROSHKA project studies the dose distribution of the cosmic rays inside an anthropomorphic phantom. The BIOPAN experiments aimed at monitoring the exo-

biological investigations supported by radiation dosimetry on a returning satellite near the ISS. Passive solid state nuclear track and thermoluminescent detectors are applied in our experiments.

### **Programming techniques for the Electrical Ground Support Equipment**

*Keywords: space research, ground support equipments, distributed data acquisition systems, embedded systems*

The fundamental task of an Electrical Ground Support Equipment (EGSE) used in the field of space research is to aid the testing and simulation of the spacecraft interfaces in the different phases of development. Our research group has spent two decades in the field of EGSE system implementation. This article reports on the essential questions and the cumulated experiences of the implementation of EGSE systems.

### **Satellite-to-indoor radio wave propagation channel model**

*Keywords: propagation channel, ray tracing, satellite communications*

We have proposed to simulate the propagation characteristics of the satellite-to-indoor propagation channel. Our first goal has been to find a proper description of the polarization state of the received indoor wave. As far as our first investigations showed, the polarization state of the indoor wave basically changes as we move further away from the windows, i.e. the secondary source of radiation. First we investigate how the polarization state of a complex harmonic field can be described, then results regarding our first simulations of the polarization state are presented.

### **Development of On-board Data Handling Computer for the SSETI ESMO project**

*Keywords: student satellite, on-board computer, redundant system, on-board communication and telemetry*

In this paper we introduce the development process of the ESMO (European Student Moon Orbiter) on-board data handling system. This is a student-built satellite within the framework of an European Space Agency programme. The OBDH (Onboard Data Handling Computer) is designed by a student development group supervised by our department. We will introduce the main elements of the system, the development phases and the major milestones of the research.

### **Reliability and efficiency based optimization of small satellite power systems**

*Keywords: electrical power system, reliability, efficiency, solar array*

In the last few decades many cost-efficient system, circuit and component level solution have been developed for space applications, with the aim of simplifying the design and construction processes of big satellites. Some of these solutions even became international standard. However, in many cases the power and size restrictions of small satellite missions do not allow these standards to be applied. In these cases unique solutions and a mission oriented design approach are needed. Special attention must be taken especially when designing the core subsystems of the satellite. This paper discusses the main design considerations of solar energy based electrical power systems of small satellites.

# Contents

<i>SPACE RESEARCH AS THE ENGINE OF TECHNOLOGY DEVELOPMENT</i>	1
<b>Előd Both</b> Main areas of international and Hungarian space research	3
<b>Györgyi Rontó, Attila Bérces</b> Space research and astrobiology	10
<b>Csaba Ferencz, János Lichtenberger, Orsolya E. Ferencz, Dániel Hamar, László Bodnár, Péter Steinbach, Korepanov Valery, Mikhajlova Galina, Mikhajlov Yuri, D. Kuznetsov Vladimir</b> Testing of the SAS2: ULF-VLF electromagnetic wave analyzer in the space – on board of the „Kompas” satellite	15
<b>János Sulyán, Lajos Szalai, Csaba Lipusz, Sándor Szalai</b> Data collection and control system for the BepiColombo mission	24
<b>Beáta Dudás, Julianna Szabó, József Pálfalvi</b> Passive space dosimetry with Hungarian participation	30
<b>Kálmán Balajthy, Csaba Lipusz, Bálint Sódor, Sándor Szalai</b> Programming techniques for the Electrical Ground Support Equipment	35
<b>Andrea Farkasvölgyi, Lóránt Farkas, Lajos Nagy</b> Satellite-to-indoor radio wave propagation channel model	41
<b>András Bükkfejes, László Csurgai-Horváth, Zoltán György Kovács, Tamás Kökényesi, Gábor Elemér Marosy, István Szabó, János Vancsik, Lajos Varga</b> Development of On-board Data Handling Computer for the SSETI ESMO project	47
<b>Gábor Kocsis, András Szimler</b> Reliability and efficiency based optimization of small satellite power systems	52

Cover: *The International Space Station*

---

## Szerkesztőség

HTE Budapest V., Kossuth L. tér 6-8.  
Tel.: 353-1027, Fax: 353-0451, e-mail: info@hte.hu

## Hirdetési árak

*Belív 1/1* (205x290 mm) FF, 120.000 Ft + áfa  
*Borító II-III* (205x290mm) 4C, 180.000 Ft + áfa  
*Borító IV* (205x290mm) 4C, 240.000 Ft + áfa

## Cikkek eljuttathatók az alábbi címre is

Szabó A. Csaba, BME Híradástechnikai Tanszék  
Tel.: 463-3261, Fax: 463-3263  
e-mail: szabo@hit.bme.hu

## Előfizetés

HTE Budapest V., Kossuth L. tér 6-8.  
Tel.: 353-1027, Fax: 353-0451  
e-mail: info@hte.hu

## 2008-as előfizetési díjak

*Közületi előfizetők részére:* bruttó 32.130 Ft/év  
*Hazai egyéni előfizetők részére:* bruttó 7.140 Ft/év  
*HTE egyéni tagok részére:* bruttó 3.570 Ft/év

## Subscription rates for foreign subscribers:

12 issues 150 USD,  
single copies 15 USD

www.hte.hu

Felelős kiadó: NAGY PÉTER  
Lapmenedzser: DANKÓ ANDRÁS

---

HU ISSN 0018-2028

Layout: MATT DTP Bt. • Printed by: Regiszter Kft.