

MAGYAR ŰRKUTATÁSI FÓRUM 2021

VÁLOGATOTT KÖZLEMÉNYEK

BUDAPEST, 2021. SZEPTEMBER 29. – OKTÓBER 1.

Magyar Őrkutatási Fórum 2021
Budapest, 2021. szeptember 29. – október 1.
Válogatott közlemények

ISBN: 978-963-7367-31-1

Szerkesztette: Bacsárdi László, Hirn Attila

Programbizottság

Almár Iván
Bacsárdi László (társelnök)
Csurgai-Horváth László
Földváry Lóránt
Hirn Attila (társelnök)
Horvai Ferenc
Kiss László
Lichtenberger János
Németh Zoltán
Szűcs Eszter
Wesztergom Viktor (társelnök)

Helyi szervezőbizottság

Hirn Attila (koordinátor)
Baranyai Anna
Katona Viktória
Kovács Zsuzsanna (EK)
Kovács Zsuzsanna (REMRED Kft).
Makkai Hunor
Strádi Andrea

Kiadja:

a Magyar Asztronautikai Társaság

1044 Budapest, Ipari park u. 10.

www.mant.hu

Budapest, 2023

Felelős kiadó:

Arnócz István főtktár

Minden jog fenntartva.

Borítókép: ESA/A. Baker, CC BY-SA 3.0 IGO

A Magyar Űrkutatási Fórum 2021 konferencia közleményeinek kiadványa az elektronikus kiadványok formátumához igazodva a kéziratokat oldalszámozás nélkül, cikk számmal ellátva közli, amely az oldalszámozáshoz hasonlóan alkalmas a közlemények bibliográfiai adatbázisokban való azonosításra

Köszöntő

A Magyar Űrkutatási Fórum, korábbi nevén Ionoszféra- és Magnetoszférafizikai Szeminárium a legrégebbi hagyományokkal rendelkező hazai űrkutatási szakmai-tudományos rendezvénysorozat. A 1972 óta rendszeresen megrendezésre kerülő konferencia lehetőséget biztosít a magyar űrkutatás és az űripar szereplőit, egyetemi hallgatók, doktoranduszok számára az űrfizika, napfizika, geofizika, légkörfizika, űrgeodézia, planetológia és az űrkutatáshoz kapcsolódó más tudományterületeken, műszaki fejlesztésekben elért friss eredményeik magyar nyelven történő bemutatására, megvitatására, valamint a meglévő szakmai kapcsolatok erősítésére és új együttműködések kialakítására a hazai űrkutató közösségen belül.

A Magyar Asztronautikai Társaság, az ELKH Energiatudományi Kutatóközpont (EK) és az ELKH Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet közös kezdeményezésére 2021. szeptember 29. és október 1. között Budapesten megrendezett **Magyar Űrkutatási Fórum 2021** konferencia több szempontból is különlegesnek bizonyult. A COVID-19 járvány sorozatos hullámai miatt a rendezvény első alkalommal került hibrid formában megrendezésre; házigazdája az Energiatudományi Kutatóközpont volt. A konferencia előtt bő egy hónappal fogadta el a Kormány Magyarország űrstratégiáját, amely meghatározó jelentőségű a szakterület jövője, fejlődési irányai szempontjából. Ennek apropóján Ferencz Orsolya, a Külgazdasági és Külügyminisztérium űrkutatásért felelős miniszteri biztosa tartotta a rendezvény kiemelt nyitóelőadását, akihez a résztvevők kérdéseket is intézhettek. A rendezvényt a három meghívott keynote, a 25 plenáris és 11 poszterelőadás mellett egy-egy kerekasztal-beszélgetés is színesítette: a magyar űrhajósprogram tudományos kísérleteiről, valamint a következő éves űripari kihívásairól.

Az előadásokból összesen 13 konferenciaközlemény született, melyet jelen kiadványban változatlan formában közlünk. A témák rendkívül sokszínűek: hazai űrműszer-fejlesztések bolygóközi űrszondákra, a Föld körüli térség és a felsőlégkör fizikája, műholdas földmegfigyelés, bolygó kutatás, kvantumkommunikáció, valamint űrtechnológia- és módszerfejlesztés. Ezúton is köszönjük az előadóknak, társszerzőknek, témavezetőknek, segítőknek és valamennyi résztvevőnek a befektetett időt és energiát! A rendezvény támogatói a Külgazdasági és Külügyminisztérium és a REMRED Kft. voltak.

Bacsárdi László és Hirn Attila

Tartalomjegyzék

Facskó Gábor, David Sibeck, Ilja Honkonen, Bór József, German Farinas Perez, Tímár Anikó, Yuri Shprits, Pyry Peitso, Laura Degener, Eija Tanskanen, Chandrasekhar Anekallu, Szalai Sándor, Kis Árpád, Wesztergom Viktor, Madár Ákos, Biró Nikolett, Kobán Gergely és Illyés András

A földi magnetoszféra egy év hosszú magnetohidrodinamikai szimulációjának összehasonlítása Cluster mérésekkel

MÚF2021-K-01

Buzás Attila, Bozóki Tamás és Bór József

A nagycenki Széchenyi István Geofizikai Observatóriumban folyó, hat évtizednyi légköri elektromos térerősség mérések bemutatása

MÚF2021-K-02

Solymos Balázs és Bacsárdi László

Statisztikai eszközök úrbéli kvantum véletlenszám-generátorokhoz

MÚF2021-K-03

Pál Bernadett és Kereszturi Ákos

Magyar közreműködés az MMX-űrszonda előkészítésében

MÚF2021-K-04

Makara Árpád László, Reichardt András és Csurgai-Horváth László

Ionnyaláb 3D vezérlése gépi tanulással

MÚF2021-K-05

Nagy János, Hevesi László, Vizi Pál Gábor, Szalai Lajos, Horváth István, Szalai Sándor

Magyar részvétel az ESA JUICE projektjében, tápegység fejlesztése a Jupiter Jeges holdjai kutatásában

MÚF2021-K-06

Gergácza Mira Anna

Tavaszi jégfoltok keresése a Mars déli féltekéjén

MÚF2021-K-07

Vizi Pál Gábor és Sipos Attila
Mars Rover Modell verseny – A Pandémia Kihívás

MÚF2021-K-08

Bór József, Szabóné André Karolina, Novák Attila, Bozóki Tamás, Janusz Mlynarczyk,
Steinbach Péter és Lemperger István
ELF-viharok ég fölött és föld alatt

MÚF2021-K-09

Novák Roland
Geotechnikai paraméterek elemzése a holdi regolit fúrásos mintavételéhez

MÚF2021-K-10

Magyar Bálint és Horváth Roland
Kárpátalja regionális léptékű felszín deformációjának monitorozása InSAR technológiával

MÚF2021-K-11

Bebesi Zsófia, Erdős Géza és Juhász Antal
A Naprendszer különböző bolygóinak környezetében észlelt SLAMS események összehasonlító vizsgálata

MÚF2021-K-12

Kereszturi Ákos, Gross Péter, Gutay Gergely, Sódor Bálint és Tróznai Gábor
Comet Interceptor – módszer és technológia az ismeretlen üstökös vizsgálatára

MÚF2021-K-13

A földi magnetoszféra egy év hosszú magnetohidrodinamikai szimulációjának összehasonlítása Cluster mérésekkel

FACSKÓ Gábor^{*,1,2}, SIBECK David³, HONKONEN Ilja⁴, BÓR József⁵,
FARINAS PEREZ German⁶, TIMÁR Anikó¹, SHPRITS Yuri^{7,8},
DEGENER Laura⁴, TANSKANEN Eija^{9,10}, PEITSO Pyry¹⁰,
ANEKALLU Chandrasekhar Reddy¹¹, SZALAI Sándor^{5,12}, KIS Árpád⁵,
WESZTERGOM Viktor⁵, MADÁR Ákos^{1,13}, BIRÓ Nikolett^{1,13},
KOBÁN Gergely^{1,13}, ILLYÉS András¹, LKHAGVADORJ Munkhjargal^{1,14}

¹Wigner Fizikai Kutatóközpont, Űrfizikai és Űrtechnikai Osztály, Budapest

²Milton Friedman Egyetem, Informatika Tanszék, Budapest

³NASA Goddard Space Flight Center, Greenbelt, MD, USA

⁴Finnish Meteorological Institute, Helsinki, Finland

⁵Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet (ELKH FI), Sopron

⁶University of Miami, Electrical and Computer Engineering Department, Miami, Florida, USA

⁷Helmholtz Centre Potsdam, GFZ German Research Centre for Geosciences, Potsdam, Germany

⁸Institute for Physics and Astronomy, University of Potsdam, Potsdam, Germany

⁹Sodankylä Geophysical Observatory, University of Oulu, Sodankylä, Finland

¹⁰Department of Electronics and Nanoengineering, Aalto University, Espoo, Finland

¹¹UCL Department of Space & Climate Physics, Mullard Space Science Laboratory, Dorking, UK

¹²Miskolci Egyetem, Geofizika Tanszék, Miskolc

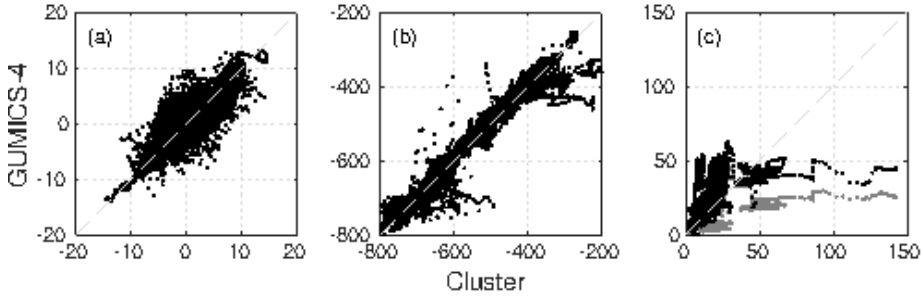
¹³Eötvös Loránd Tudományegyetem, Fizika Doktori Iskola, Budapest

¹⁴Eötvös Loránd Tudományegyetem, Természettudományi Kar, Budapest

Kivonat

Korábban a 2002. január 29. és 2003. február 2. közötti időszak napszéladatait felhasználva egy év hosszúságú időszakra globális magnetohidrodinamikai szimulációt készítettünk a GUMICS-4 kóddal. Ebben a tanulmányban összehasonlítjuk a modellt a földi magnetoszféra és a napszél kölcsönhatásának a tekintetében a Cluster SC3 méréseivel. A szimulációból kapott megfelelő adatokat hasonlítjuk össze a magnetométer által észlelt bolygóközi mágneses tér észak-déli komponensével, az ion plazma műszerrel mért Nap-Föld egyenessel párhuzamos napszélsebességgel és az ion plazma sűrűséggel, továbbá az elektromos teret mérő műszer által szolgáltatott szonda potenciálból számolt elektron sűrűséggel. Meghatározzuk a lökéshullám, a magnetopauza és a semleges lepel koordinátáit az űrszonda méréseiből és a szimulációkból, majd összehasonlítjuk a helyzetüket. Olyan időszakaszokat választunk a napszélben, a mágneses burokból és a magnetoszférában, ahol a fenti műszerek jó minőségű adatokat biztosítanak és ahol modell szerint is abban a régióban tartózkodott a szonda, ahol a valóságban. A GUMICS-4 kód eredményei jól egyeznek a mérésekkel a napszélben, de a pontosság csökken a mágneses burokból. A magnetoszférában a szimuláció eredményei nem valósághűek. A lökéshullám helyzetét jól adja vissza a modell, azonban a magnetopauza helyzete kevésbé pontos. A semleges lepel helyzete annak köszönhetően valósághű, hogy a bolygóközi mágneses tér B_y komponense kicsi volt ebben az időszokban.

*Levelező szerző: Facskó Gábor (facsko.gabor@wigner.hu, gabor.i.facsko@gmail.com)



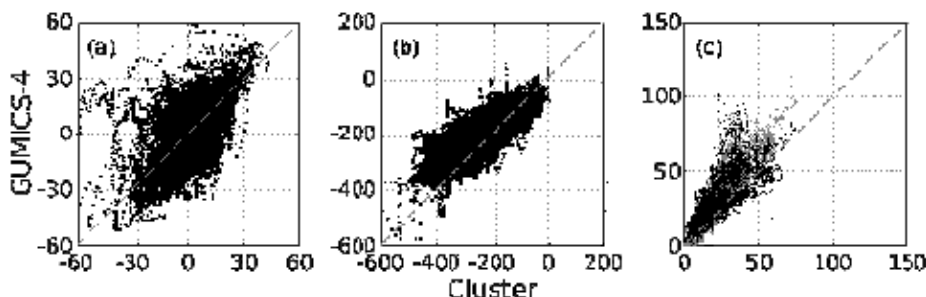
1. ábra. A Cluster SC3 mérések és a GUMICS–4 szimulációk összehasonlító ábrái az összes vizsgált intervallumra a napszélben. A szaggatott vonal az $y=x$ függvény. (a) A mágneses tér Z komponense GSE koordináta-rendszerben. (b) A napszél sebesség X komponense GSE koordináta-rendszerben. (c) A CIS HIA műszer által mért ion plazma (szürke) és az űrhajó potenciálból számolt elektron sűrűség (fekete).

Bevezetés

Az egyik legköltséghatékonyabb módszer a napszél és a bolygók magnetoszférájának a tanulmányozásához és a Föld-közelí űr tulajdonságainak előjelzéséhez a komplex rendszer magnetohidrodinamikai (MHD) modellezése. Korábban több ilyen kódot fejlesztettek, amelyeket a Föld-közelí űr viszonyainak előrejelzésére használtak [5]. A szimulációk eredményeinek az összehasonlítása űrszondás, vagy földi mérésekkel létfontosságú a fejlesztett kódok tulajdonságainak megértése szempontjából. Korábban egy év hosszú MHD szimulációt futtattunk le a GUMICS–4 kóddal 2002. január 29. és 2003. február 2. közötti OMNI napszél adatokat használva bemenetként [4]. Ezt hasonlítjuk össze az Európai Űrügynökség (European Space Agency, ESA) Cluster-II missziójának méréseivel, amelyet 2000-ben bocsátottak fel a Föld közeli űr tanulmányozására [3]. A mágneses mezőt a FluxGate Magnetometer (FGM) [1], a plazma ion adatokat a Cluster Ion Spectrometry (CIS) műszer Hot Ion Analyser (HIA) alműszere méri [10]. A CIS HIA műszert a Cluster fedélzetén található Waves of High frequency Sounder for Probing the Electron density by Relaxation (WHISPER) elektrosztatikus hullámműszerrel kalibrálják [11, 2]. Az Electric Field and Wave Experiment (EFW) műszer [7] által szolgáltatott űrhajó potenciál segítségével határozzuk meg a elektronok sűrűségét az $n_{EFW} = 200(V_{sc})^{-1.85}$ empirikus sűrűségformula segítségével, ahol n_{EFW} a számolt sűrűség és V_{sc} a Cluster EFW űrhajó potenciál [11, 12]. Ez a cikk a Cluster SC3 méréseit közvetlenül veti össze az egy év hosszú GUMICS–4 szimulációkkal a napszélben, a mágneses burookban és a magnetoszférában a referencia szonda pályája mentén [4]. A vizsgált paraméterek a mágneses tér északi/déli komponense GSE koordinátákban (B_z), a napszél sebesség GSE Nap-Föld egyenessel párhuzamos komponense (V_x) és a napszél ion plazma (n_{CIS}) és számolt elektron sűrűsége (n_{EFW}). Összehasonlítottuk továbbá a jósolt és megfigyelt helyzetét a lökeshullámnak, a magnetopauzának és a semleges lepelnek. Ezeket a paramétereket azért választottuk, mert B_z kontrollálja a napszél-magnetoszféra kölcsönhatást, a V_x a napszél fő sebesség komponense és az n_{CIS} ion plazma momentumot a legegyszerűbb kiszámolni, továbbá több műszer is képes mérni ezt a mennyiséget.

Mérések és szimulációk összehasonlítása

A GUMICS–4 szimulációból a Cluster SC3 pályája mentén elmentett paramétereket és a szonda mágneses, napszél sebesség és sűrűség méréseit hasonlítjuk össze a napszélben,

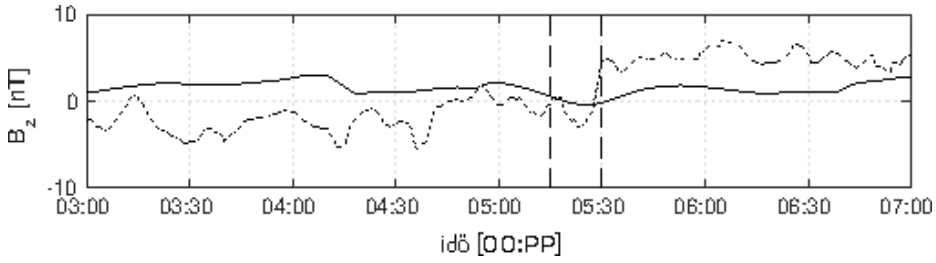


2. ábra. A Cluster SC3 mérések és a GUMICS–4 szimulációk összehasonlító ábrái az összes vizsgált intervallumra a mágneses burokból. A szaggatott vonal az $y=x$ függvény. (a) A mágneses tér Z komponense GSE koordináta-rendszerben. (b) A napszél sebesség X komponense GSE koordináta-rendszerben. (c) A CIS HIA műszer által mért (szürke) és az űrhajó potenciálból számolt sűrűség (fekete).

a mágneses burokból és magnetoszférában keresztkorrelációs számításokkal. A szimulált adatok időfelbontása öt perc [4]. Az analízishez a különböző időfelbontású adatsorok összehasonlíthatósága érdekében egy perces felbontásra interpoláljuk az eredményeket. Az adathiányokat lineáris interpolációval töltöttük fel, illetve extrapolációval, ha az adathiány a kiválasztott intervallum elején, vagy végén található. A négy másodperces felbontású mágneses tér méréseket öt perces felbontásúra átlagoltuk, majd egy perces felbontásúra interpoláltuk, hogy el tudjuk végezni a korrelációs számításokat. A kiválasztott intervallumokban a paraméterek nem változnak sokat, továbbá semmilyen határfelületet nem keresztesz sem a Cluster SC3, sem a virtuális szonda a szimulációban.

Az OMNI adatbázis bolygóközi mágneses mező, sebesség, sűrűség és hőmérséklet adatait adtuk meg a szimuláció bementi adatainak [4]. Összesen csak 17 megfelelő intervallumot használunk fel a tanulmányban [5]. A B_z , V_x és n_{EFW} nagyon jól egyezik a napszélben a szimulációkkal (1a, 1b, 1c ábra, fekete). Az n_{CIS} nem egyezik olyan jól (1c. ábra, szürke), ami várható volt, mivel a CIS műszernek sok üzemmódja van a plazma paramétereinek a mérésére és folyamatos kalibrációra van szüksége, ezért a mindenki által hozzáférhető adatai sokszor pontatlanok. A napszélben V_x , n_{CIS} és n_{EFW} paraméterek korrelációja a megegyező GUMICS szimulációs paraméterekkel nagyobb 0.9-nél, azaz kitűnő [5]. A B_z korrelációja nagyobb 0.8-nál, vagyis nagyon jó [5]. Az időeltolódás kb. öt perc a mágneses térre és a CIS adatokra [5]. A GUMICS–4 szimulációs terének upstream határa $32 R_{Föld}$ -nál van [8], a Föld lökéshullámának az orra pedig kb. $20 R_{Föld}$ -nél. Ha napszél sebessége 400 km/s , akkor ez a távolság kevesebb, mint öt perc késést okoz, amelynek nem lenne szabad látszódnia a keresztkorreláció eredményében. Az EFW származtatott adataira az időeltolódás kevésbé kifejezett [5].

A Cluster SC3 minden keringés során elmerül a mágneses burokból 2002. decembere és a 2003. májusa között, ennél fogva 74 intervallumot sikerült kiválasztani [5]. A mágneses mező, a napszélsebesség és sűrűségek összehasonlító ábráin a paraméterek jól egyeznek, de nagyobb variációval, mint a napszélben (2a, 2b, 2c ábra). A szimuláció és az észlelések jól egyeznek a mágneses mező esetén [5] és nagyon jól egyeznek a ion plazma momentumok és a származtatott sűrűség esetén [5]. Míg a paraméterek korreláltak, a szórás nagyobb. Ennek oka az lehet, hogy a mágneses burok erősen turbulens, amely megmagyarázza, hogy a B_z mágneses mező nagyobb változékonyságát a 2a ábrán. A napszélbeli V_x , n_{CIS} és n_{EFW} jobban egyezik a mágneses mező komponensénél (2b, 2c ábra), azonban a korreláció még mindig jó [5]. A többi paraméter korrelációja nagyobb (0.9), de az időeltolódás rosszabbnak tűnik [5]. Ennek oka az, hogy az idősorok igen simák a mág-



3. ábra. A mágneses tér B_z komponense a GUMICS–4 szimulációk eredményeiben (folytonos vonal) és a Cluster SC3 méréseiben (szaggatott vonal) 2002. szeptember 28. 03:00-tól 07:00-ig (UT) GSE koordinátákban a geomágneses csóvában. 05:15-től 05:30-ig a két függőleges szaggatott vonal között a Cluster SC3 és a virtuális szonda többször keresztezi a semleges leplet.

neses burokbán, így nincs elég pont, hogy egy éles csúcsot alkosson a korrelációs függvény. A maximum és a minimum közötti különbség kicsi, a számítás hibájával összehasonlítva. A maximum, az időeltolódás bárhol lehet és a korreláció vs. időeltolódás függvény gyakran nem szimmetrikus, továbbá nem csak egy lokális maximuma van. Ennélfogva a korreláció számítás nagyobb időeltolódásokat eredményez az ionplazma paraméterekben, mint a n_{EFW} -ben [5]. A GUMICS–4 kevésbé pontos a mágneses burokbán, mint a napszélben, továbbá a modellezett mágneses mező jobban egyezik a mérésekkel, mint a modellezett plazma paraméterek. A számított EFW sűrűség (n_{EFW}) jobban egyezik a szimulációkkal a CIS HIA sűrűségénél (n_{CIS}) [5].

132 intervallumot sikerült találni, amikor a Cluster SC3 és a virtuális szonda is magnetoszférában tartózkodik [5]. A magnetoszférában egyetlen kiválasztott paraméter sem egyezik a mérésekben és a szimulációkban. Pl. a napszél sebessége nem csökken zérusra a magnetoszférában, ehelyett a napszél behatol a geomágneses csóvába. A napszélben a CIS HIA által mért és a EFW űrszonda potenciálból származtatott sűrűségek növekednek, ahogy a Földhöz közelítünk (plazmaszféra), míg a GUMICS–4 sűrűség egyszerűen csak alacsony. A GUMICS–4 egy dipólus modellt használ a Föld mágneses mezejének a leírására [8]. A modell mágneses tér levonása után a Cluster SC3 mágneses tér mérései és a szimulációk továbbra is igen kicsi korrelációt mutatnak az időeltolódás is irreális. Ennélfogva a dipólus modell elégtelen leírása a belső magnetoszféra mágneses mezejének. Ezen felül sem a plazma momentumok, sem a n_{EFW} nem illeszkedik. Az egy folyadékos ideális MHD nem írja le jól a belső magnetoszférát, ennélfogva a szimulációbeli V_x és az n nem egyezik jól a Cluster SC3 által mért adatokkal [5].

77 intervallumot sikerült kiválasztani, amikor a Cluster SC3 a földi lökéshullámon egyszer, vagy többször áthalad [5]. A virtuális szonda lökéshullám átmenetei lassabbak és simábbak, ezen felül a GUMICS–4 nem mutatja a többszörös keresztezéseket. A kód lassan reagál a hirtelen változásokra a napszélben. A mágneses mező jobban illeszkedik a mérésekhez, mint a plazma momentumok. A CIS HIA és az EFW sűrűség ugrások eltolódtak a szimulációkhoz képest. A sűrűség és sebesség a szimulációkban kevésbé pontos, mint a mágneses mező [5]. 54 intervallumot sikerült kiválasztani magnetopauza áthaladások körül [5]. A magnetopauza helyzete jól meghatározott a Cluster SC3 mérésekben, de nagyon nehéz azonosítani a szimulációkban. Az esetek többségében (92%) nem látható a magnetopauza a szimulációkban, továbbá egyáltalán nem látható V_x -ben és n -ben. Ez a megfigyelés független a bolygóközi mágneses mező irányától. Sokszor, amikor az átmenet a mérésekben és a szimulációkban is látható, az esemény térben és időben eltolódva látható a szimulációkban és a mérésekben. A magnetopauza helyzetét a modell kevésbé pontosan határozza meg, mint a lökéshullámét. Ez az eltérés a pozíciókban jól egyezik

a korábbi eredményekkel [6, 4], amikor szintetikus GUMICS futtatásokat hasonlítottak össze empirikus magnetopauza formulákkal [6] és egy év hosszú OMNI adatokat használó GUMICS szimuláció [4] megerősítette ezt a következtetést [5]. Kilenc semleges lepel keresztvezést sikerült találni a Cluster SC3 adataiban [5]. Öt esetben a GUMICS–4 szintén B_z előjelváltozást mutat a simított görbékben, azaz a semleges lepel látható mind a szimulációban, mind a mérésekben (3. ábra; folytonos vonal). Ez kiemelkedő eredmény, mert a GUMICS–4 szimulációban a geomágneses csóva jelentősen rövidebb, mint a valóságban [6, 4]; továbbá a napszél általában az MHD szimulációkban behatol a csóvába [9]. Azonban ebben az esetben a bolygóközi térnek nincsen nagy B_y komponense és korábbi munkákból tudjuk, hogy ebben az esetben a GUMICS geomágneses csóvája (vagy éjszakai magnetoszférája) normális hosszúságú [4, 5]. A GUMICS kód képes visszaadni a lökéshullám átmeneteket. A magnetopauza és a semleges lepel esetén a helyzet sokkal komplexebb.

Összegzés

Korábban készített egy év hosszú GUMICS–4 szimulációk eredményét hasonlítottuk össze a Cluster SC3 szonda mágneses mező, napszél sebesség és sűrűség méréseivel a műhold pályája mentén. Olyan intervallumokat választunk ki, amikor a műhold és a virtuális szonda egyszerre tartózkodik a napszélben, a mágneses burokból és a magnetoszférában, majd keresztkorrelációt számolunk ezek között az idősorok között. Lökéshullám, magnetopauza és a semleges lepel áthaladásokat vizsgálunk és összehasonlítjuk az észlelhetőségüket, továbbá az egymáshoz viszonyított helyzetüket. A vizsgálat a következő eredménnyel zárult:

1. A napszélben a B_z korrelációja nagyobb, mint 0.8. A V_x , az n_{EFW} és az n_{CIS} korrelációja pedig nagyobb 0.9-nál. A B_z , a V_x , és a n_{EFW} nagyon jól egyezik, továbbá a n_{CIS} egyezése is jó.
2. A mágneses burokból a B_z korrelációs együtthatója nagyobb, mint 0.6. A V_x , az n_{EFW} és az n_{CIS} korrelációja pedig nagyobb 0.9-nál. A mágneses mező komponens, az ion plazma momentumok és a számított empirikus sűrűség egyezése egy kicsit gyengébb, mint a napszélben. A mágneses burokból a V_x , az n_{EFW} és az n_{CIS} jobban illeszkedik, mint a B_z komponens. Ez az egyezés még mindig nagyon jó. A nagyobb eltérés oka a lelassult, felhevült és turbulens napszél a lökéshullám után, amely látszik a Cluster SC3 méréseiben, de a szimulációkban nem.
3. Sem a nappali, sem az éjszakai oldali magnetoszférában nem képes a GUMICS–4 realisztikus eredményeket produkálni, azaz a szimulációk kimenete és az űrszondás mérések még csak nem is hasonlítanak egymásra ebben a régióban. Ennek az az oka, hogy a GUMICS–4-ben nincsen belső magnetoszféra modell.
4. Ebben a tanulmányban a lökéshullám és a semleges lepel pozíciója jól egyezik a szimulációkban és a Cluster SC3 mágneses mező, ion plazma momentum és származtatott elektron sűrűség méréseiben. A magnetopauza helyzete nem illeszkedik ennyire jól.

A GUMICS–4-nek tudományos és stratégiai jelentősége van az európai űridőjárás előrejelző és tudományos közössége számára. Ez a Finn Meteorológiai Intézetben fejlesztett kód a legfejlettebb, legjobban tesztelt és a legszélesebb körben használt eszköz a Föld kozmikus környezetének modellezésére Európában. A szimulációk pontosságának növelésére a jelenlegi kódhoz az ionoszférához és a magnetohidrodinamikai tartományhoz egyaránt csatolt belső magnetoszféra modellt kellene hozzáadni.

Köszönetnyilvánítás Az OMNI adatok a GSFC/SPDF OMNIWeb NASA adatbázisból (<http://omniweb.gsfc.nasa.gov>) származnak. A szerzők köszönik az FGM (PI: C. Carr), a CIS (PI: I. Dandouras), a WHISPER (PI: J.-L. Rauch) és az EFW (PI: M. Andre) műszer csapatoknak, továbbá a Cluster Science Archive adatbázisnak az FGM mágneses mező, a CIS HIA ion plazma és a WHISPER elektron sűrűség méréseket. Az adatok elemzését részben a QSAS tudományos elemző rendszerrel végeztük, amelyet a United Kingdom Cluster Science Centre (Imperial College London and Queen Mary, University of London) fejlesztett a Science and Technology Facilities Council (STFC) támogatásával. TANSKANEN Eija nagyon köszöni a Finn Akadémia anyagi támogatását a ReSoLVE Centre of Excellence (No. 272157) projekthez. A szerzők rendkívül hálásak JANHUNEN Pekának a GUMICS-4 kód kifejlesztésért; továbbá, PALMROTH Minának, OPITZ Andreának, KALMÁR Jánosnak és VÖRÖS Zoltánnak a hasznos tanácsokért. FACS-KÓ Gábor munkáját a Van Allen Probes misszió, az Amerikai Geofizikai Unió, és az ELKH Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet, Sopron támogatta. LKHAGVADORJ Munkhjargal munkáját a Stipendium Hungaricum ösztöndíj támogatta. Ezt a tanulmányt részben a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal (NKFIH) FK128548 támogatása finanszírozta.

Hivatkozások

- [1] Balogh, A., Carr, C. M., Acuña, M. H., et al. 2001, *Annales Geophysicae*, 19, 1207
- [2] Blagau, A., Dandouras, I., Barthe, A., et al. 2014, *Geoscientific Instrumentation, Methods and Data Systems*, 3, 49
- [3] Escoubet, C. P., Fehringer, M., & Goldstein, M. 2001, *Annales Geophysicae*, 19, 1197
- [4] Facskó, G., Honkonen, I., Živković, T., et al. 2016, *Space Weather*, 14, 351
- [5] Facskó, G., Sibeck, D. G., Honkonen, I., et al. 2021, *Space Weather*
- [6] Gordeev, E., Facskó, G., Sergeev, V., et al. 2013, *Journal of Geophysical Research (Space Physics)*, 118, 3138
- [7] Gustafsson, G., André, M., Carozzi, T., et al. 2001, *Annales Geophysicae*, 19, 1219
- [8] Janhunen, P., Palmroth, M., Laitinen, T., et al. 2012, *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 80, 48
- [9] Kallio, E. & Facskó, G. 2015, *Planetary and Space Science*, 115, 69
- [10] Rème, H., Aoustin, C., Bosqued, J. M., et al. 2001, *Annales Geophysicae*, 19, 1303
- [11] Trotignon, J. G., Décréau, P. M. E., Rauch, J. L., et al. 2010, *Astrophysics and Space Science Proceedings*, 11, 185
- [12] Trotignon, J.-G., Vallières, & the WHISPER team. 2011, Calibration Report of the WHISPER Measurements in the Cluster Active Archive (CAA), Tech. rep., LPC2E CNRS, caa-est-cr-why

A nagyecenki Széchenyi István Geofizikai Observatóriumban folyó, hat évtizednyi légköri elektromos térerősség mérések bemutatása

Buzás Attila^{1,2*}, Bozóki Tamás^{1,3}, Bór József¹

¹ Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet (ELKH FI), Sopron

² Földtudományi Doktori Iskola, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest

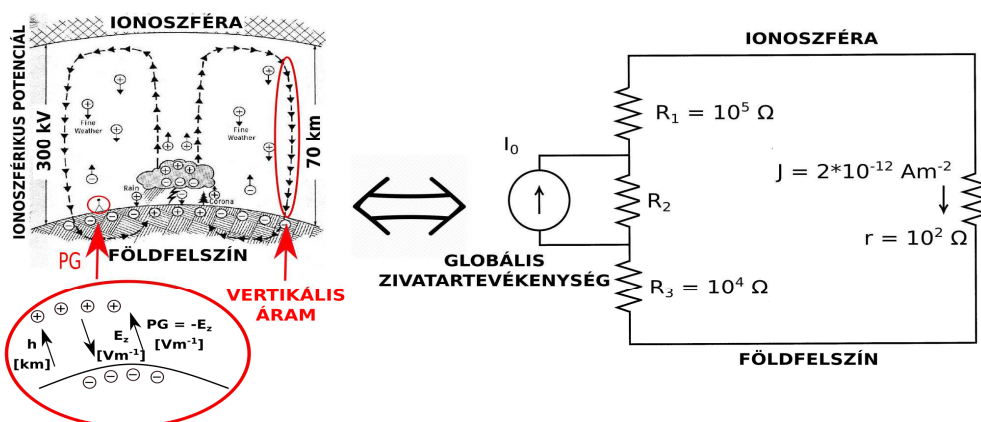
³ Környezettudományi Doktori Iskola, Szegedi Tudományegyetem, Szeged

* buzas.attila@epss.hu

Tanulmányunk célja a nagyecenki Széchenyi István Geofizikai Observatóriumban 1961 óta kvázi-folyamatosan mért légköri elektromos potenciál gradiens (PG) adatok bemutatása. Az ilyen hosszú mérési rekordok világviszonylatban is ritkának számítanak, elemzésükkel vizsgálhatók a földi légköri elektromos környezeti rendszerben lezajló hosszú távú változások és hatások. Tanulmányunkban bemutatjuk a nagyecenki PG idősorok hosszú távú változását (1962-2020). 1962 és 1985 között növekvő, 1986 és 1997 között stagnáló vagy növekvő, míg 1997 és 2009 között csökkenő trendeket azonosítottunk. 2009 és 2016 között egy ugrásszerű emelkedés történt, majd 2016 után újra csökkenés tapasztalható. A PG adatok spektrális analízisével azonosítjuk a különböző időskálájú periodikus variációkat, amelyek közül az egynapos, valamint fél, egy, 11, 14 és 28 éves periódusok bizonyultak szignifikánsnak. Végül az adatokat különböző napszakok és évszakok szerinti bontásban is vizsgáltuk, a globális változások szempontjából reprezentatív időszakok kiválasztásának céljából. Megállapítottuk, hogy a téli adatok globálisan reprezentatívabbnak tekinthetők, míg a nyári PG értékek esetében számottevőek a lokális és regionális zavaró hatások.

Bevezetés

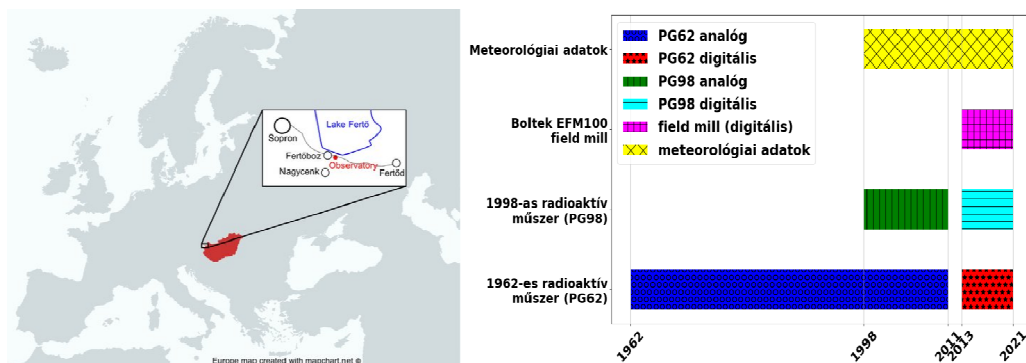
A földi légkörben a különböző időskálákon zajló, változatos térbeli kiterjedésű környezeti folyamatok jelentős részének van közvetlen vagy közvetett elektromos vonatkozása. A légkör elektromos tulajdonságainak megfigyelése és a mérhető paraméterek változásának a követése ezáltal viszonylag egyszerű és költséghatékony módon teszi lehetővé az ilyen folyamatok tanulmányozását. A légköri elektromosság ezen folyamatokat magában foglaló és magyarázó általános keretrendszere az ún. Globális Légköri Elektromos Áramkör (GLEK), ami az alsó ionoszférát (D-réteg, kb. 60-70 km magasságban) a földfelszínnel összekötő elektromos áramok globális rendszere, amit a globális villámtevékenység tart fenn (1. ábra). A globális zivatartevékenység által táplált töltésszállító folyamatok eredményeképpen a földfelszín negatív, míg a felsőlégkör ionizáló sugárzások hatására kialakuló vezető rétege pozitív többlettöltést kap. A két elektromosan vezető felület között a légkör nem zivataros területein folyó kis áramsűrűségű vertikális áramok zárják az áramkört [1]. A GLEK egyik leggyakrabban, világszerte mért kvázi-egyenáramú paramétere a légköri elektromos potenciál gradiens (PG), amely a vertikális elektromos térerősség ellentettje. Folytonos monitorozásával ideális esetben képet kaphatunk a földi elektromos környezetben lezajló globális éghajlati változásokról, hiszen a légköri elektromos tér fenntartója a globális villámaktivitás, amelynek intenzitása a hőmérséklet függvényében változik [2]. Emellett a PG információt hordoz különböző extraterresztrikus hatásokról (pl.: galaktikus kozmikus sugárzás, naptevékenységhez köthető tranziens jelenségek stb.) [3], valamint földrengés prekursoraként való felhasználhatósága is aktív kutatási területet képez [4].



1. ábra. A Globális Légköri Elektromos Áramkör sematikus vázlata (balra) és egyszerűsített ekvivalens áramköri képe (jobbra). Ábra adaptálva [5] (bal oldali blokk) és [1] (jobb oldali blokk) alapján.

A Széchenyi István Geofizikai Obszervatóriumban folyó potenciál gradiens mérések

A nagyecenki Széchenyi István Geofizikai Obszervatóriumban (NCK, É 47°38', K 16°43') 1961 óta kvázi-folyamatosan folyik a PG monitorozása [6]. Bár a mérések 1961-ben kezdődtek, csak 1962-től állnak rendelkezésre PG adatok. A PG-t kezdetben egy helyi fejlesztésű, az érzékelő feletti 1 m magas légréteget ionizáló, radioaktív anyagot tartalmazó az ún. potenciálkiegyenlítés elvén működő műszerrel mérték (PG62), majd ezt a műszert egészítette ki 1998-ban egy újabb helyi fejlesztésű, szintén hasonló elven működő műszer (PG98) [6]. Végül 2013-ban telepítésre került egy modern technológiával működő, 2 Hz-es mintavételezésre képes ún. field mill (2. ábra).



2. ábra. A nagyecenki obszervatórium földrajzi elhelyezkedése (balra, [6] alapján) és az elérhető, három különböző műszerrel mért PG adatok időbeli kiterjedése (jobbra).

A továbbiakban a két radioaktív műszer (PG62 és PG98), órás felbontásban rendelkezésre álló adatait használtuk fel. Az 1962 és 2011 közötti időszakban a régebbi, 1961-ben telepített műszer 1962-től elérhető adataival dolgoztunk (PG62), míg a 2013-2020-as időszakban az 1998-as műszer adatait használtuk fel (PG98). 2012-ből nincsen elérhető adat, az adathiány oka a mérés modernizációjából adódó kimaradás volt, ugyanis ekkor történtek meg azok a fejlesztések, amelyek segítségével az analóg (fotópapírra történő) regisztrálást felváltotta a PG adatok digitális regisztrálása (2. ábra).

A PG adatok feldolgozása során egy fontos lépés az ún. „szép idő” adatok kiválogatása. A szép idő szelekció célja a helyi időjárási folyamatok által befolyásolt PG adatok elvetése és a globális változásokat jobban tükröző adatok megtartása [7]. A jelen tanulmányban alkalmazott szép idő szelekció során első lépésben elvetettük a negatív előjelű PG értékeket, majd minden évben meghatároztuk a pozitív PG adatok eloszlása alapján az ún. medián abszolút eltérést (MAD: Median Absolute Deviation), ami itt a PG adatok mediánjuktól való eltéréseiből képzett eloszlás mediánja. A szép idő szelekció felső határát minden évben az adott MAD érték ötszöröse jelentette [8]. A PG adatok feldolgozásának egy további lépése volt egy mérőhely-specifikus hatás, az obszervatóriumban található közeli fák időfüggő, elektrosztatikus árnyékoló hatásának az eltávolítása. Ez az időben erősödő árnyékoló hatás az évtizedek alatt a PG értékek erős csökkenésében nyilvánul meg, ami, ha nem vesszük figyelembe, elfedi a globális változásokat tükröző valós trendeket az adatsorban [9].

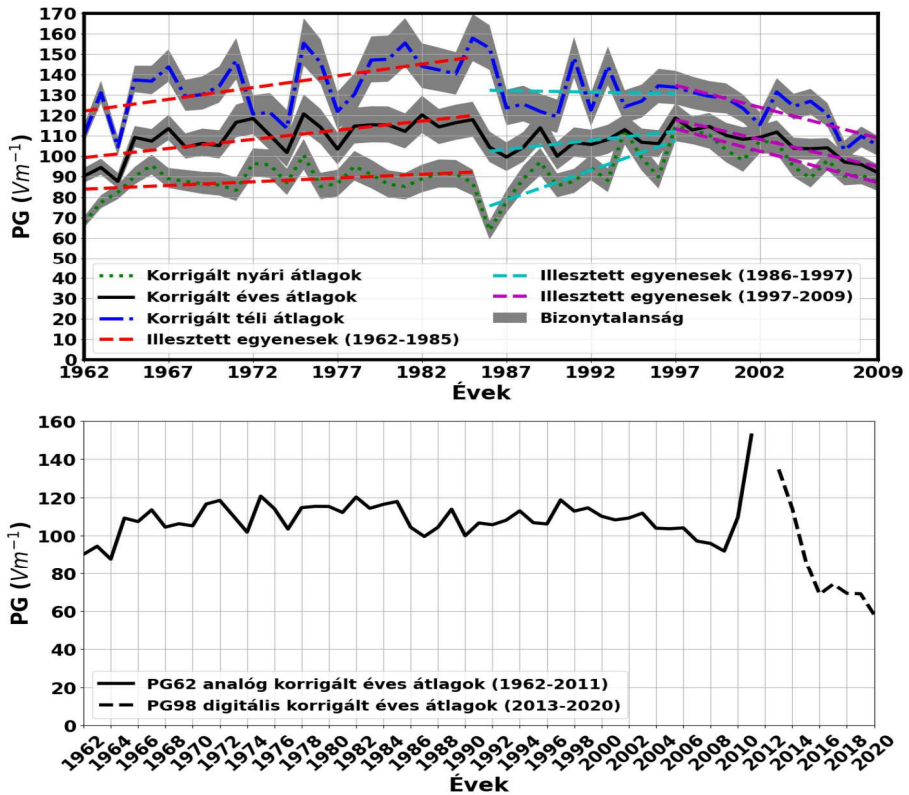
Eredmények

A szép idő adatok kiválogatása és a közeli fák elektrosztatikus árnyékoló hatásának eltávolítása után vizsgálható a nagycenki PG hosszú távú változása (3. ábra) [9]. 1962 és 2009 között három fő trend különíthető el:

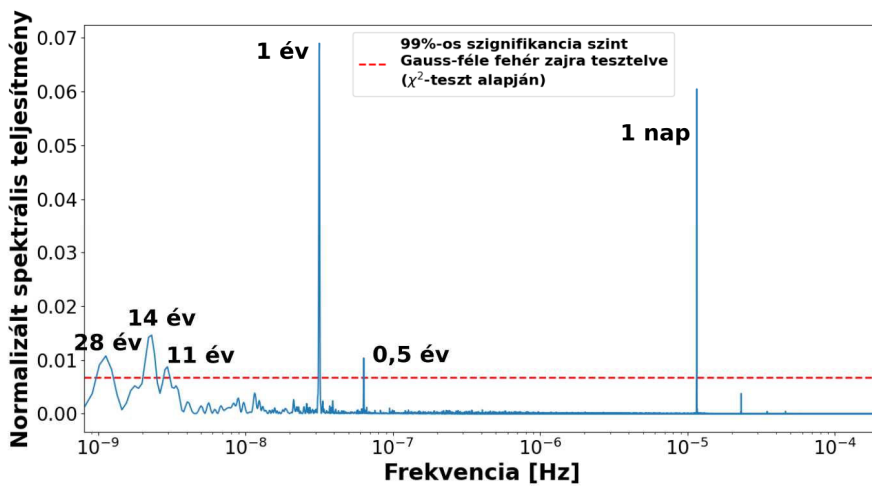
- 1962 és 1985 között mind az éves, mind a téli és nyári hónapok éves átlagaiban tapasztalható egy növekvő trend (3. ábra).
- 1986 és 1997 között ez a növekedés bizonytalanná válik, csak a nyári hónapok átlagaiban marad meg egyértelműen. A téli és az éves átlagokban inkább stagnálás mutatkozik (3. ábra).
- Majd végül 1997 és 2009 között mindhárom idősorban erőteljes csökkenés jelentkezik (3. ábra).

2010-ben erőteljesen megfordulni látszik a csökkenés és az előző éves (2009) értékhez képest 19%-kal magasabb PG érték figyelhető meg. A növekedés még inkább szembetűnő 2011-ben, ekkor az előző évi (2010-es) értékhez képest 39%-os növekedés tapasztalható (3. ábra). Ezen hirtelen változások eredete nem ismert. Ezt követően 2016-ra a PG egy olyan értékre csökken, ami jól illeszkedik az 1997-től tapasztalható csökkenő trendbe. A csökkenés tovább folytatódik egészen 2020-ig (3. ábra).

Az 1962 és 2020 között mért, 1961-es (PG62) és az 1998-as (PG98) műszerek órás felbontású PG adatainak a Lomb-Scargle-periodogramját [10] elkészítve meghatározhatók a nagycenki PG-ben jelen lévő szignifikáns periodikus változások (4. ábra). Gauss-féle fehér zajra χ^2 -teszt alapján, 99%-os szignifikancia szint mellett az alábbi periódusokat azonosítottuk: egy nap, valamint fél, egy, 11, 14 és 28 év (4. ábra). A féléves, éves és a napi periódus jól ismert, általánosan tapasztalható jelenség a PG mérésekben. Ezeket a globális zivatartevékenység ugyanilyen periódusú változásai okozzák [11]. A hosszabb periódusok között megjelenik az átlagosan 11 éves napciklushoz köthető periódus is (4. ábra). A 14 és 28 éves periódusok eredetéről egyelőre nincs információnk.

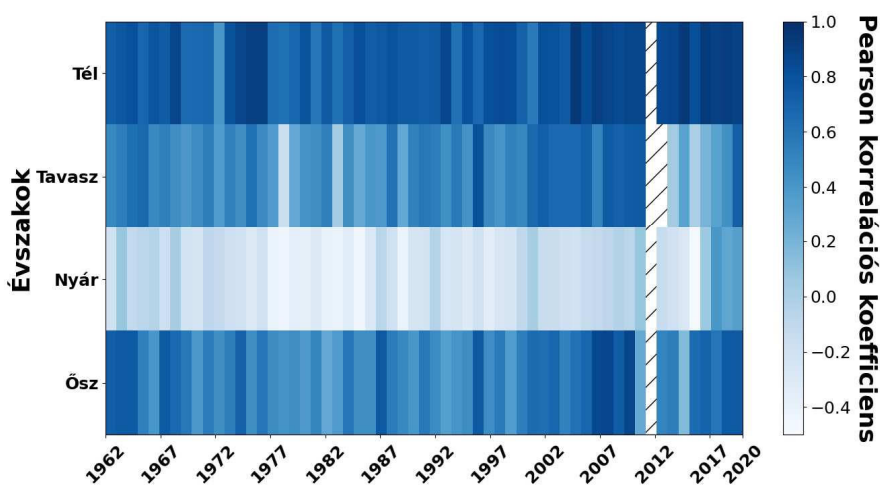


3. ábra. A nagycenki PG adatok hosszú távú változása 1962 és 2009 (fent, [9] alapján), valamint 1962 és 2020 között (lent).



4. ábra. A nagycenki PG adatok Lomb-Scargle-periodogramja [10]. Felhasznált adatok: órás felbontású PG adatok 1962 és 2020 között (lásd 2. ábra).

Egy adott állomáson mért PG adatok globális reprezentativitásának megállapítására elterjedt módszer a PG különböző évszakokból származtatott átlagos napi meneteinek összehasonlítása a GLEK változását tükröző ún. Carnegie-görbével [12]. A Carnegie-görbe a Carnegie geofizikai kutatóhajó XX. század elején, a világtengeren végzett PG méréseinek sok éves átlagából származtatott napi menete, amely kiváló egyezést mutat a globális zivatartevékenység és ezáltal a GLEK intenzitásának napi variációjával [12]. A nagycenki PG adatok esetében megállapítható, hogy az adott évszakra jellemző átlagos napi PG menet és az adott évszakra jellemző Carnegie-görbe közötti korreláció télen a legerősebb, míg nyáron a leggyengébb (5. ábra). Ez az eredmény jó egyezést mutat kontinentális állomások szakirodalomban bemutatott általános jellemzőivel, miszerint a szárazföldön mért PG esetében nyáron a legerősebbek a helyi zavaró hatások (pl.: a lokális zivatartevékenység, légköri turbulencia és konvekció) [11].



5. ábra. A nagycenki PG adatok adott évszakos átlagos napi menete és az adott évszakra jellemző Carnegie-görbe [12] közti Pearson-féle korrelációs együttható. A ferde vonalas terület adathiányt jelez.

Konklúziók

A nagycenki PG idősorokban az 1962-2009-es időszakban három hosszú távú trend figyelhető meg (3. ábra) [9]:

- 1962-1985: növekvő trend,
- 1986-1997: stagnáló vagy növekvő trend,
- 1997-2009: csökkenő trend.

A 2010 és 2016 közötti erőteljes változások eredete nem egyértelmű (természetes változás vagy műszeres hiba). 2016-tól az adatsorok menete jól illeszthető a 2010 előtti értékekhez és láthatóan folytatódik a csökkenés (3. ábra).

A nagycenki PG szignifikáns periodikus változásai a következők: a zivatartevékenység változásait leképező éves, fél éves és napos variáció, a naptevékenységhez köthető 11 éves variáció, valamint hosszabb periódusú 14 éves és 28 éves variációk, amelyek eredete még tisztázatlan.

A nagycenki PG adatok hasonlóan más szárazföldi állomásokhoz télen globálisan

reprezentatívabbak, míg nyáron az erőteljesebb lokális és regionális hatások csökkentik a globális reprezentativitás mértékét (5. ábra).

Irodalom

- [6] Bór J., Sátori G., Barta, V., et al. (2020), *History of Geo-and Space Sciences*, 11(1), 53-70
- [9] Buzás A., Barta V., Horváth T., et al. (2021), *Ann. Geophys.*, 39, 627–640
- [11] Chalmers J. A. (1967), *Atmospheric electricity*, 2nd edition, Pergamon Press, 515 p.
- [12] Harrison R. G. (2013), *Surveys in Geophysics*, 34(2), 209-232
- [7] Harrison R. G., and Nicoll K. A. (2018), *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 179, 239-250
- [5] <http://www.xearththeory.com/images/weather-fronts-clouds/global-electric-circuitweather-image.jpg> (utoljára megtekintve: 2021.10.05.)
- [8] Lucas G. M., J. P. Thayer, and W. Deierling (2017), *Journal of Geophysical Research Atmosphere*, 122, 1158–1174
- [3] Nicoll K. A. (2014), *Weather*, 69(9), 238-241
- [1] Rycroft M. J., Israelsson S., and Price C. (2000), *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 62, 1563-1576
- [4] Silva H. G., Bezzeghoud M., Reis A. H., et al. (2011), *Natural Hazards and Earth System Sciences*, 11, 987-991
- [10] VanderPlas J. T. (2018), *The Astrophysical Journal Supplement Series*, 236(1), 16
- [2] Williams E. R. (1992), *Science*, 256(5060), 1184-1187

Statisztikai eszközök űrbéli kvantum véletlenszám-generátorokhoz

Solymos Balázs* és Bacsárdi László

Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem, Villamosmérnöki és Informatikai Kar,
Hálózati Rendszerek és Szolgáltatások Tanszék, 1111 Budapest, Műegyetem rkp. 3.

*solymosb@hit.bme.hu

Jó minőségű véletlen számokra az elterjedtebb hagyományos biztonságtechnikai és szimulációs alkalmazásokon túl az űrszektorban is szükség lehet különböző kommunikációs célokra, így akár műholdas környezetben működő biztonságos entrópiaforrásokra is. Kvantum véletlenszám-generátorok vonzó megoldást kínálnak, különösen biztonságkritikus helyzetekben, hiszen működésük alapjául a fizika törvényei által bizonyítottan véletlen kvantummechanikai folyamatokat használnak. A kvantum optika fejlődésével ezen eszközök egyre elérhetőbbé válnak. Előnyük, hogy gyakran technológiában, illetve felhasznált építőelemekben más kvantumos kísérleti technológiákkal is osztoznak (pl.: kvantum kulcsszétosztás), emiatt potenciálisan könnyebb az egyes építőelemek űrbéli viselkedéséről az adatgyűjtés, valamint lehetőség nyílna küldetések tervezésére melyek során egy adott eszközkészlet több kísérletet is meg tud valósítani. Ez utóbbi különösen előnyös a manapság népszerű Cubesat küldetésformátumnál, a korlátozott méret miatt.

A valós gyakorlati megvalósítás tökéletlenségei, valamint az űrbéli környezet természetesen ezeket az új kvantumos eszközöket is terhelik. Műholdakon tapasztalható jelenségek, mint a megnövekedett sugárzás vagy hőmérséklet ingadozás építőelemekre gyakorolt hatása nem elhanyagolható, így az ezekből származó esetleges hibás működést érzékelni és javítani kell.

Jellegeből adódóan a véletlen működést nem lehet teljes biztonsággal ellenszrizni, azonban léteznek statisztikai módszerek, amikhez ilyen helyzetekben is megfelelő megoldást nyújthatnak. Elérhetőek kifejezetten generátorok tesztelésére készített statisztikai csomagok, azonban futtatásuk erőforrásigényes, űrbéli alkalmazhatóságuk korlátozott, mivel műholdas környezetben ezen igény kielégítése költséges.

Teljes csomagok használata így sokszor nem költséghatékony, azonban az ezekben található módszerek egy megfelelően kiválasztott optimalizált alhalmaza ilyen esetekben is megoldást nyújthat. Ehhez a csomagok és a bennük alkalmazott módszerek alaposabb vizsgálata szükséges. Ezt mi a tanszéki optikai kvantum véletlenszám-generátorhoz készült keretrendszer segítségével végeztük, hogy felderítsük milyen statisztikai módszerek adhatnak űrbéli környezetben is használható megoldásokat. Az eredmények továbbá általános véletlen kimenet esetén is alkalmazhatóak.

Bevezetés

Kvantummechanikai jelenségeket kihasználó véletlenszám generátorok [1] előnye, hogy a működésük alapjául szolgáló jelenségek fizika törvényei által bizonyítottan véletlen viselkedésűek, így ezek az eszközök megfelelő gyakorlati megvalósításai nagy megbízhatóságú entrópia előállítására képesek. Kvantumkommunikációs technológiák közül [2] továbbá az egyik legkiforrottabbnak számítanak, hisz már piacon megvásárolható megoldásokkal is rendelkeznek [3]. Egyre elérhetőbb árú műholdfelbocsátások utat nyitnak sok új, köztük kvantumos űrkísérletnek [4] is. Ebbe a trendbe szépen illeszkednek a véletlenszám-generátorok mivel sokuk, különösen egyes optikai megvalósítások [5], osztozik más kísérletekhez is szükséges építőelemeken, valamint egyes architektúrák chipbe történő miniatürizálása már

megkezdődött [6]. Bár az űr jelterjedés szempontjából előnyös környezet, elektronikai eszközök számára a földihez képest számos új kihívást rejt. Sugárzás roncsoló hatása már évtizedek óta ismert [7-9], valamint a keringési ciklus során fellépő hőingadozások hatása sem elhanyagolható [10] egyéb más űr által támasztott új kihívás mellett. Emiatt természetesen lehetséges meghibásodásokkal is számolni kell, amiket célszerű detektálni is. Véletlen kimenet ellenőrzése statisztikai eszközökkel lehetséges, melyek futtatása erőforrásigényes, így korlátozott környezetekben, mint amilyenek jellemzően a kisműholdak, ezek elvégzése problémát jelenthet. Emiatt egyes módszerek erőforrásigényeinek, valamint ezek csökkentésére rendelkezésre álló lehetőségek pontosabb vizsgálata célszerű.

Statisztikai tesztek

Véletlen jelleg ellenőrzését hipotézises teszteléssel tehetjük, ahol a kiinduló feltételezésünk, hogy az adatsor véletlen, az alternatív pedig, hogy nem az. A vizsgálat során az alternatív hipotézisre keresünk bizonyítékot azzal a céllal, hogy így a kezdeti feltételezésünk (adat véletlen) cáfolhassuk. Ennek megfelelően egyes tesztek különböző nem véletlen mintákat keresnek, egy generátor pedig akkor jó, ha nem bukik meg egyik ilyen se. Emiatt tesztek jellemzően csoportosan, gyűjtemények részeként szokás használni. A legismertebb ilyenek [11-14]:

- NIST STS: Az amerikai NIST (National Institute of Standards and Technology) által kibocsájtott standardizált teszteset (STS – Statistical Test Suite), amely 15 tesztet tartalmaz.
- Dieharder: 26 teszt, köztük az eredeti 1995-ös Diehard tesztek is.
- TestU01: Eredetileg pszeudo véletlenszám-generátorok tesztelésére készített szoftverkönyvtár, ami tartalmaz statisztikai próbákat is.
- ENT: Entrópia és más statisztikai jellemzők számolására használható program.

Egy-egy ilyen kollekció (esetenként akár több órás) futtatási idejéhez természetesen nagyban hozzájárulnak a bennük tartalmazott tesztek. Két fő lehetőség az erőforrásigény csökkentésére így vagy egyes tesztek egyenkénti optimalizálása, vagy a választott tesztkollekció optimalisabb összeválogatása.

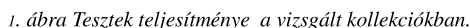
Egy adott teszt általános lépései a következők: A tesztelendő adatsort valamilyen ismert referenciaeloszlású formára hozzuk, majd ebből egy erre jellemző statisztikát számolunk. Ezt a számolt statisztikát ezután összehasonlíthatjuk a referenciaeloszlás alapján elvárt értékkel, így döntést hozva.

Ennek a folyamatnak az első lépései tesztenként egyediek, így általános optimalizált megoldást adni nehéz. A másik lehetőség, hogy olyan tesztek válogatunk az általunk használni kívánt gyűjteménybe, amelyek erőforrásigénye kedvező, természetesen ügyelve, hogy az ellenőrzés minősége megfelelő maradjon. Ehhez szükséges az egyes tesztek teljesítményének alaposabb ismerete, ami vizsgálatunk fő tárgya.

Vizsgálat és eredmények

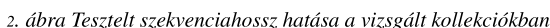
A már említett négy legismertebb tesztkollekció vizsgálatát egy Core i5-2320@3.00Ghz processzort tartalmazó Linux rendszeren végeztük a ``perf`` [15] teljesítmény felügyelő szoftverrel, melynek előnye, hogy közvetlen a kernelből tud egy adott feladról jellemző információkat, mint eltöltött ciklusok, instrukciók, eltelt idő gyűjteni. Ezen leírókon túl továbbá pontosan számoltuk a tesztelt bitek számát is. Ehhez a programokon kisebb módosításokat kellett végrehajtani, azonban ezek a tesztek tényleges elvégzéséért felelős algoritmusokra nem voltak hatással. Ez az STS esetén egy módosított, parancssorból is paraméterezhető felületet, Dieharder esetén egy fejlesztői debug flag újraaktiválását, a TestU01 könyvtár esetén pedig egy statisztikai függvényeket megfelelően meghívó keretprogram

Általánosan megfigyelhető, hogy egyes tesztek erőforrásigénye meglehetősen eltérő lehet (lásd 1. ábra). Ez ahhoz vezethet, hogy egy-egy lassabban működő teszt az egész kollekció végrehajtási sebességét ronthatja. Amennyiben lehetséges, célszerű az ilyenek optimalizálása először, vagy kollekcióból való teljes kiváltása. Tesztelt szekvenciahossz változtatásának csak esetenként volt észlelhető hatása (lásd 2. ábra).



Szembetűnő az egyszerűbb (Frequency, Longest Runs) és komplexebb tesztek közti jelentős sebességkülönbség. A két lelassabb teszt a "Template" és "Linear Complexity" a maguk ~0.00017 és ~0.0001 bit/ciklus értékeivel a teljes futási idő túlnyomó részéért felelősek. Tesztelt szekvenciahossznak csak néhány tesztnél (pl.: DFT - Discrete Fourier Transform) van hatása és akkor sem meghatározó.

Az eredmények hasonlóak az előző esethez abban, hogy itt is nagy eltérés figyelhető meg gyorsabban és lassabban működő egyes tartalmazott tesztek között. Mivel a kollektíót folyamatos beérkező bitfolyam tesztelésére tervezték, így fájl méret helyett egy állítható ``m'' paraméter változtatásával vizsgáltuk az egyszerre tesztelt adatmennyiség hatását. Ebből adódó jelentős teljesítményváltozást itt nem tapasztaltunk.



TestU01 eredmények:

A könyvtár sok, gyakran szabadon paraméterezhető tesztfüggvényt tartalmaz, valamint számos előre összeállított tesztkollekciót is. Ezekből mi a kifejezetten hardveres forrásokhoz ajánlott ``Alphabit" és a rövidebb, általános ``SmallCrush" kollekciók tesztjeit vizsgáltuk. Egyes algoritmusok közti jelentős sebességkülönbségek itt is megfigyelhetők, valamint különböző tesztparaméterezések hatására is látunk példát. Míg bizonyos esetekben (RandomWalk 64-es és 320-as paraméterezése) a választott paraméter hatása elhanyagolható, egyes tesztekre (HammingInd) ez már nem mondható el. Szekvenciahossz változtatásával továbbá bizonyos esetekben (Birthday és MaxOft) kiugró különbségeket tapasztaltunk rövidebb szekvenciák esetén.

ENT eredmények:

A program több különböző statisztikát is számol, azonban mivel ezek egyedi kiválasztására alapértelmezetten nincs lehetőség, így vizsgálati szempontból egy tesztként tekintettünk a teljes programra. Egyedül a bemenet bitként vagy bájtként történő értelmezésének változtatása lehetséges. Ennek megfelelően a két tesztelt esetünk a bites bemenet ~0.0033 bit/ciklus eredménnyel és az ennél láthatóan gyorsabb bájtos bemenet ~0.0137 bit/ciklus eredménnyel. Szekvenciahossz változtatása ebben az esetben nem vezetett jelentős eltérésekhez.

Összegzés

Megmutattuk, hogy az egyes gyűjtemények által tartalmazott tesztek teljesítménye között jelentős eltérések lehetnek, ezek megfelelő összeválogatása az elért teljesítményre is nagy hatást tud gyakorolni. Egyszerre tesztelt szekvenciahossz, valamint esetenkénti egyedi paraméterezés nem mutatott általános hatást, azonban bizonyos teszteknel jelentős eltérésekhez vezetett, így potenciálisan vizsgálandó tényezőnek tekinthető. Megemlíthető továbbá, hogy valós rendszereknél egyéb helyzetspecifikus tényezők figyelembe vétele is erősen ajánlott, mint például az adott hardverre jellemző karakterisztikus hibák és előfordulási gyakoriságuk, valamint tesztelés célja, gyakorisága és mintavételi stratégia is.

Bár a vizsgálat motivációjaként leendő úrbéli kvantumoz eszközök szolgáltak, a kimenet általánossága miatt (egyenletesen véletlen bitsorozat ellenőrzése) eredményeink más véletlen viselkedés vizsgálatát kívánó helyzetekben is használhatóak.

Köszönetnyilvánítás

A kutatást az Innovációs és Technológiai Minisztérium és a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal támogatta a Kvantuminformatika Nemzeti Laboratórium keretében. Bacsárdi László kutatását a Magyar Tudományos Akadémia Bolyai János Kutatási Ösztöndíja támogatja.

Függelék

A vizsgálat eredményei és használt programok a ["https://github.com/S0lymi/statbenchmarks"](https://github.com/S0lymi/statbenchmarks) oldalon elérhetőek.

Irodalom

- [1] Herrero-Collantes, M. & Garcia-Escartin, J. C. 2017, Reviews of Modern Physics, 89, 015004
- [2] Imre, S. & Balázs, F. 2004, Quantum Computing and Communications (John Wiley & Sons Ltd.,)
- [3] ID Quantique Quantis QRNG chip, <https://www.idquantique.com/random-number->

[generation/products/quantis-qrng-chip/](#) , (Utolsó látogatás dátuma: 2021/10/04)

[4] Sidhu, J. S., Joshi, S. K., Gundogan, M., et al. 2021, arXiv preprint arXiv:2103.12749

[5] Schranz, Á. & Udvary, E. 2020, Optical Engineering, 59, 1

[6] Crypta Labs to develop Quantum Random Number Generators for space. SPRINT project., <https://www.sprint.ac.uk/news-stories/crypta-labs-to-develop-quantum-random-number-generators-for-space/>, (Utolsó látogatás dátuma: 2021/10/04)

[7] Srouf, J. & McGarrity, J. 1988, Proceedings of the IEEE, 76, 1443

[8] Fleetwood, D. M., Winokur, P. S., & Dodd, P. E. 2000, Microelectronics Reliability, 40, 17

[9] Moscatelli, F., Marisaldi, M., Maccagnani, P., et al. 2013, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, 711, 65

[10] Li, Y., Fei, Y., Wang, W., et al. 2021, The European Physical Journal D, 75, 1

[11] “NIST SP 800-22: Documentation and Software” <https://csrc.nist.gov/projects/random-bit-generation/documentation-and-software> (Utolsó látogatás dátuma: 2021/10/04)

[12] “Robert G. Brown, Dieharder: A Random Number Test Suite”, <https://webhome.phy.duke.edu/~rgb/General/dieharder.php> (Utolsó látogatás dátuma: 2021/10/04)

[13] L'ecuyer, P., & Simard, R. (2007). ACM Transactions on Mathematical Software (TOMS), 33(4), 1-40.

[14] “ENT: A Pseudorandom Number Sequence Test Program”, <https://www.fourmilab.ch/random/> (Utolsó látogatás dátuma: 2021/10/04)

[15] “perf: Linux profiling with performance counters”, https://perf.wiki.kernel.org/index.php/Main_Page, (Utolsó látogatás dátuma: 2021/10/04)

Magyar közreműködés az MMX-űrszonda előkészítésében

PÁL Bernadett^{1,2,*} and KERESZTURI Ákos¹

¹ELKH Csillagászati és Földtudományi Kutatóközpont, Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet, Budapest *

²Eötvös Loránd Tudományegyetem, Fizika Doktori Iskola, Budapest

Kivonat

A Mars holdjaihoz induló japán *Martian Moons eXploration* (MMX) űrszonda első alkalommal tervez leszállni és mintát venni a Phobosról. A mintavételhez ismerni kell a célpont felszínét borító regolit fizikai jellemzőit, melynek egyik fontos tulajdonsága a hőtehetetlenség. A Tempus Közalapítvány Campus Mundi pályázatának segítségével kapcsolódó kísérleteket végeztünk a JAXA/ISAS Sagami-hara városában található laboratóriumában a Tokyo University fejlesztette UTPS-TB Phobos regolitszimulánssal. A mintát ultrahangos szitával kétféle szemcseméret-tartományra válogattuk, $<500\ \mu\text{m}$, illetve $<106\ \mu\text{m}$ -re. A mérés során vonal-hőforrás módszerével határoztuk meg a hőtehetetlenséget. A kísérletet termosztatikus vákuumkamrában végeztük, közel vákuumban négyféle különböző hőmérsékleten. Az eredmények alapján az $500\ \mu\text{m}$ és annál kisebb szemcseméretű minta hőtehetetlensége a Phobos és a Hold felszíni regolit takarójára jellemző értékek körül mozog, míg a $106\ \mu\text{m}$ és kisebb szemcseméretű inkább a Hold felszíntakarójához hasonlít. Ebből következhet az, hogy a Phobos (és várhatóan a Deimos) holdakat borító törmelék takaró szemcsemérete nagyobb a kísérletben vizsgálnál; de az is okozhatja az eltérést, hogy az ottani regolit sűrűsége nagyobb. A japán kutató kollégák üvegyöngyökkel folytatták a kísérleteket, a különböző sűrűségek hatásainak mérése céljából. A Phobos regolitja kis mennyiségben tartalmaz marsfelszíni törmeléket, amelynek jelenléte módosíthatja pl. a hőtani viselkedést. Ennek hazai laborokban történő vizsgálata bekapcsolódási lehetőséget biztosítana az MMX küldetésbe.

Bevezetés

A kutatás fő célja a Phobos és Deimos felszínét borító regolit viselkedésének megismerése és modellezése az MMX-űrszonda (*Martian Moons eXploration*) támogatására, valamint az így szerzett tudás alkalmazása más, a témához kapcsolódó kutatásokban. A munka keretein belül Pál Bernadett 2019 tavaszán 1 hónapot töltött Tokióban, ahol Hideaki Miyamoto professzor vezetésével dolgozták ki az UTPS-TB regolitszimuláns hőtehetetlenségére vonatkozó kísérletet. Az MMX-űrszonda [8, 16] a Japán Űrügynökség (angol rövidítése JAXA) harmadik kozmikus mintagyűjtő küldetése lesz, amely a sikeres Hayabusa [4] és Hayabusa-2 [17] űreszközöket követi a sorban. A Phobos és a Deimos marholdak

*Levelező szerző: Pál Bernadett, pal.bernadett@csfk.org

kialakulása még mindig jelentős vita tárgyát képezi, melynek legvalószínűbb magyarázatai, hogy 1) befogott aszteroidák lehetnek (például [5], [6]), vagy 2) helyben alakultak ki, vagy közös akkrécióval [10], avagy pedig egy óriási becsapódási esemény következtében (például [9], [7]). Bármelyik eset is legyen igaz, a marsi holdakról hozott minták mindenképpen fontos alapot fognak szolgáltatni a fenti elméletek leteszteléséhez, amellet, hogy lehetőséget adnak a holdak alkotóelemeinek közvetlen vizsgálatára [15]. Korábban azonosítottak marsi anyagot a Phoboson (ahova a Marsról becsapódásoktól robbant ki), amely sokkal könnyebben érhető el, mintha a vörös bolygó felszínéről hoznák a Földre. A Phobosról, a Deimosról és a Marsról így nyert új ismereteink kulcsfontosságúak lehetnek abban is, hogy meg lehessen válaszolni, hogyan került víz és különböző szerves anyagok a Naprendszer belső kőzetbolygóra.

Kutatásunkban a Phobos törmeléktakarójának potenciális viselkedését egy úgynevezett regolithszimulánssal vizsgáljuk. Ezek olyan mesterségesen kevert anyagok, melyek a lehető legjobban adják vissza az adott égitestre jellemző tulajdonságokat. A Phobos regolit mechanikai jellemzői kevéssé ismertek, a szemcseméret, szemcseméret-eloszlás, a regolit sűrűségének és más sűrűdési paramétereinek meghatározása ugyanis igen nehéz. A takaró hőtehetetlenségéből arra következtethetünk, hogy a legtöbb területen főleg 2 milliméternél kisebb átmérőjű szemcsék lehetnek. Viszont a Ryugu és a Bennu aszteroidák esetében is az előzetes szemcseméret becslések jóval eltértek a később tapasztaltaktól (nagyobbak voltak a kőtömbök, mint számítottak rá). Jelen ismereteink alapján arra következtethetünk, hogy a Phobos felszíntakarója három rétegből állhat; 1) vékony felső réteg (< 3 centiméter mély) mikrométer méretskálájú, extrém alacsony sűrűségű finom porból, 2) 10 centiméter és 3 méter mélység között egy relatíve magasabb porozitású, felgyűlt regolit réteg, 3) több, mint 10 méteres mélységtől kisebb porozitású regolit réteg.

Módszer

A Phobos regolitjának vizsgálatához a Tokiói Egyetem Tagish Lake meteorit alapú szimulánsát használtuk (UTPS-TB, University of Tokyo Phobos Simulant – Tagish Lake-based). Ennek előállításához magnéziumban gazdag filoszilikátokat (azbeszttől mentes szerpentin), magnéziumban gazdag olivint, magnetitet, vas-szén-magnézium karbonátokat, vas-nikkel szulfidokat törtek össze finom porrá, majd keverték össze szén nanorészecskével és szerves polimer anyagokkal. A keverés még nedves körülmények közt történt, az elegyet ezután sütőben szárították ki. A kísérletek első felében ebből az anyagból ultrahangos szita segítségével kétféle, szemcseméret szerint szétválogatott ($< 500 \mu\text{m}$, valamint $< 106 \mu\text{m}$) mintát készítettem, melyet ismételten 24 órán keresztül 100°C -os sütőben szárítottunk. A laboratóriumi méréseket ezután a JAXA Sagamihara-i telephelyén végeztük Naoya Sakatani professzor segítségével.



1. ábra. A kísérletben használt eszközök és anyagok. Bal: UTPS-TB minta szitálás után; Közép: Termosztatikus vákuumkamra; Jobb: a kísérletben használt mintatartó

A hőtehetetlenség meghatározásához a vonal-hőforrás módszerét (*line heat source method*) használtuk [1], melyet gyakran használnak különböző porított anyagok vizsgálatára (például [2], [3], [13], [12]). A módszer lényege, hogy a minta hővezetési képessége meghatározható egy nem-egyensúlyi hőmérséklet-változás folyamán, mely a mintába helyezett fűtőszállal kivitelezhető. Megfelelően hosszú fűtési idő eltelte után analitikus módszerekből meghatározható, hogy a hőmérséklet és az idő természetes alapú logaritmusai közötti kapcsolat lineáris:

$$T = s \cdot \ln(t) + b$$

ahol T jelöli a fűtőszál hőmérsékletét t fűtési időnél, s a meredekség, b pedig egy konstans mennyiség. Az s meredekség az öt körülvevő anyag k hővezetési együtthatójával függ össze a következőképpen:

$$k = \frac{q}{4\pi s}$$

ahol q a fűtőszál egységnyi hosszúságra eső fűtési teljesítménye. Fűtőszálnak 180 mikrométer átmérőjű nikróm vezetékét használtunk.

A fűtőszál egységnyi hosszára viszonyított fűtés, q meghatározható:

$$q = R \cdot I^2$$

ahol R a nikróm vezeték elektromos ellenállása ($42,35 \Omega m^{-1}$), I pedig a nikróm vezetékben indukált konstans áram (0,020 A). I és k között további összefüggés állítható fel:

$$I = \sqrt{k \cdot \rho \cdot c}$$

ahol ρ a minta sűrűsége (1140 kgm^{-3} a $< 500 \mu\text{m}$ tartományon, valamint 927 kgm^{-3} a $< 106 \mu\text{m}$ tartományon), c pedig a hőkapacitás. Ennek értékét a szakirodalomból vettük (Sakatani et al., 2018):

$$c_p = -23173 + 2,217T + 1,5009 \cdot 10^{-2}T^2 - 7,3699 \cdot 10^{-5}T^3 + 9,6552 \cdot 10^{-8}T^4$$

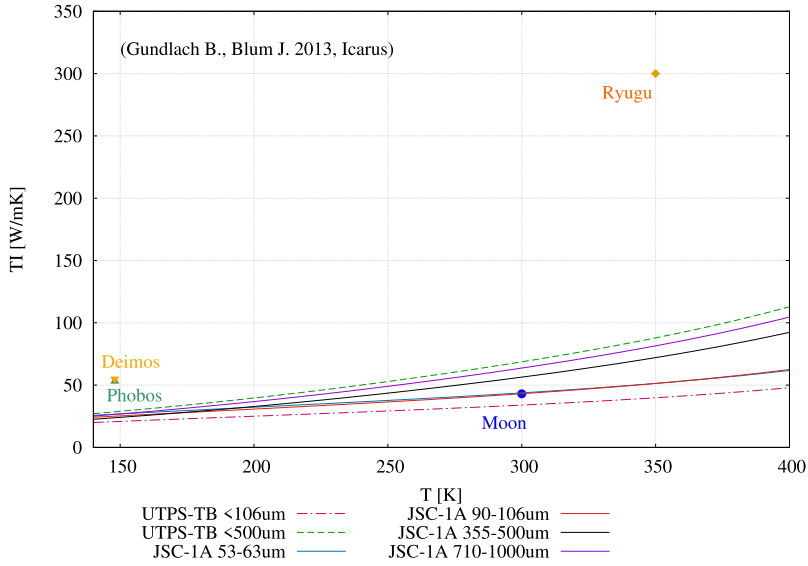
A végső illesztéshez az alábbi képletet használtam fel:

$$k(T) = A + B \cdot T^3$$

ahol A hőmérséklettől független, dimenziótlan konstans, B pedig a szilárd és radiatív vezetőképességet képviselő konstans, melynek dimenziója $\text{W m}^{-1} \text{K}^1$.

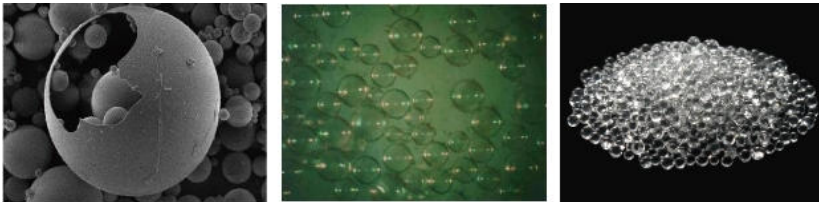
Eredmények

A laboratóriumi mérés során termosztatikus kamrában levő vákuumkamrába helyeztük a mintákat, egy téglatest alakú mintatartóba, benne a nikróm fűtőszállal. A kétféle szemcseméretű mintát egyszerre, külön-külön tartókban vizsgáltuk, behelyezéskor pedig nem lapítottuk le őket a mintatartóban, megakadályozandó a porozitás művi csökkentését. A kívánt vákuum beállta után (ezzel szimulálva a légkör nélküli Phoboszhoz hasonló körülményeket) a mintát -70°C , -25°C , 15°C és 60°C hőmérsékletekre hűtöttük / fűtöttük, ehhez átlagosan 2 napot kellett várni. A kísérleti eredmények a 2. ábrán láthatók.



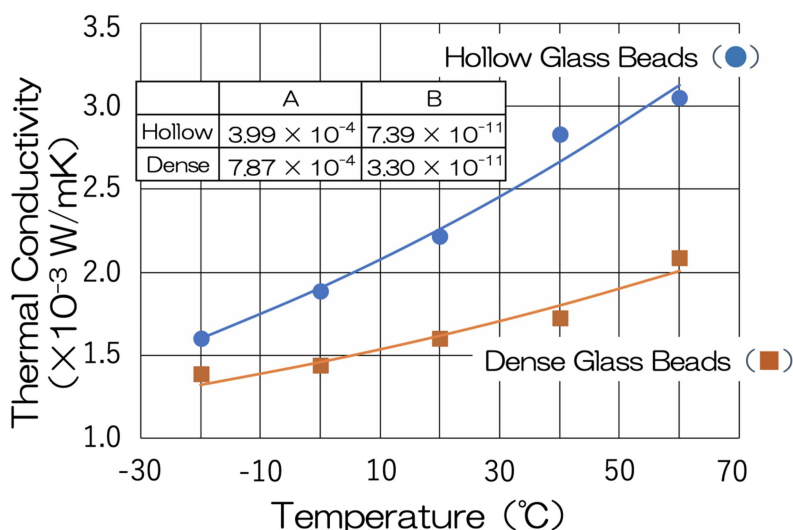
2. ábra. Az UTPS-TB kétféle szemcseméret-tartományú mintájával végzett kísérletek eredménye, holdi JSC-1A szimulánssal, valamint a Phobos, a Deimos, a Föld Holdja (Moon) és a Ryugu mérési adataival összevetve.

Megfigyelhető, hogy az $500 \mu\text{m}$, azaz kisebb szemcseméretű minta hőtehetetlensége a Hold és a Phobos regolit takarójára jellemző értékei közé esik, míg a $106 \mu\text{m}$ és annál kisebb tartományba eső minta viselkedése inkább a holdi regolithhoz hasonlatos. Referenciaképpen az ábrán látható a Phobos és a Deimos, valamint a Ryugu mérési adatai, továbbá a JSC-1A holdi regolithszimuláns hasonló kísérletekből származó adatai [11]. Az, hogy mérési eredményeink nem illeszkednek a Phobos értékre, több tényező eredménye is lehet, melyek pontos meghatározása a kutatás ezen pontján még nem lehetséges, a kísérleti adataink limitáltak. Következtethetünk arra, hogy a Phoboson (és várhatóan a Deimoson is) nagyobb a felszíntakaró szemcsemérete, mint az általunk vizsgált tartomány; jelentheti viszont azt is, hogy az ottani regolit sűrűsége nagyobb a mienknél. Mivel a hőtehetetlenség és a szemcseméret pontos kapcsolata még nem ismert, az eltérés fakadhat valamilyen eddig ismeretlen okból is.



3. ábra. A kísérlet folytatásában használt üreges és tömör üvegyöngyökről készített felvételek.

A megkezdett kísérletet Sakatani professzor vezetésével Amiko Takano folytatta tovább [14]. A kísérlet folytatásaként az UTPS-TB szimulánson túl üvegyöngyökkel is kísérleteztek, mellyel a porozitást hatékonyabban lehet befolyásolni (ld. 3. ábra). A kísérlet ugyanabban a felállásban zajlott, a mintákat $+60^\circ\text{C}$ és -20°C közötti hőmérsékleteken vizsgálták.



4. ábra. Az üvegyöngyökkel végzett kísérletek első eredményei. Az ábrán feltüntetett A és B változók a módszertani részben leírt A és B konstansokkal egyeznek meg.

Az üvegyöngyökkel végzett kísérletek első eredményei a 4. ábrán láthatók. A 90%-os szabad térfogati hányaddal rendelkező üreges üvegyöngyök hővezetési képessége magasabb, mint a szorosabb rácsban elhelyezkedő, 40%-os szabad térfogati hányadú tömör üvegyöngyöké. A kísérleti eredmény, hogy a tömör üvegyöngyök hővezetési együtthatója magasabb, felborítja a por hővezetéséről alkotott megszokott vélekedést. Az üreges gyöngyök A együtthatója alacsonyabb, míg B együtthatója magasabb, mint a tömör gyöngyöké – a hővezetés fizikája tehát mindenképpen eltérő. Klasszikus hővezetési modellekben a hosszt az üregek térfogatával szokás jellemezni, az üreges gyöngyök esetében pedig ez nagyobb. Elképzelhető tehát, hogy a hővezetés is nagyobb érték lesz.

Összefoglalás

Az UTPS-TB minta, valamint tömör és üreges üvegyöngyök hővezetési képességeit vizsgáljuk termosztatikus vákuumkamrában, amelyből meghatározott hőtehetetlenségből a szemcseméretekre is lehet következtetni, ennek elemzése segít ugyanis a Phobos felszínének várható viselkedését előre jelezni. A kísérlet során a vonal-hőforrás módszerével határoztuk meg a hőtehetetlenséget.

1. A $<500 \mu\text{m}$ és $<106 \mu\text{m}$ minták a marsi holdak, illetve a Föld Holdjának hőtehetetlensége közt helyezkednek el.
2. A porozitási kísérlet eredménye szerint az üreges üvegyöngyök hővezetési együtthatója magasabb, mint a tömöré.

Köszönetnyilvánítás A kutatást a Tempus Közalapítvány Campus Mundi 303538 számú ösztöndíja, valamint az ÚNKP-19-3-I-ELTE-186 ösztöndíja támogatta.

Hivatkozások

- [1] Carslaw, H. S., Jaeger, J. C., & Feshbach, H. 1962, *Physics Today*, 15, 74
- [2] Cremers, C. J., Birkebak, R. C., & Dawson, J. P. 1970, *Geochimica et Cosmochimica Acta Supplement*, 1, 2045
- [3] Fountain, J. A. & West, E. A. 1970, *J. Geophys. Res.*, 75, 4063
- [4] Fujiwara, A., Kawaguchi, J., Yeomans, D. K., et al. 2006, *Science*, 312, 1330
- [5] Hartmann, W. K. 1990, *Icarus*, 87, 236
- [6] Higuchi, A. & Ida, S. 2017, *Astrophys. J.*, 153, 155
- [7] Hyodo, R., Genda, H., Charnoz, S., & Rosenblatt, P. 2017, *Astrophys. J.*, 845, 125
- [8] Kuramoto, K., Kawakatsu, Y., Fujimoto, M., et al. 2018, in 49th Annual Lunar and Planetary Science Conference, Lunar and Planetary Science Conference, 2143
- [9] Rosenblatt, P., Charnoz, S., Dunseath, K. M., et al. 2016, *Nature Geoscience*, 9, 581
- [10] Safronov, V. S., Pechernikova, G. V., Ruskol, E. L., & Vitiazev, A. V. 1986, *Proto-satellite swarms.*, ed. J. A. Burns & M. S. Matthews, 89–116
- [11] Sakatani, N., Ogawa, K., Arakawa, M., & Tanaka, S. 2018, *Icarus*, 309, 13
- [12] Sakatani, N., Ogawa, K., Iijima, Y.-i., Arakawa, M., & Tanaka, S. 2016, *Icarus*, 267, 1
- [13] Sakatani, N., Ogawa, K., Iijima, Y.-i., Honda, R., & Tanaka, S. 2012, *Icarus*, 221, 1180
- [14] Takano, A., Sakatani, N., Miyamoto, H., et al. 2020, *JpGU AGU Meeting*
- [15] Usui, T., Bajo, K.-i., Fujiya, W., et al. 2020, *Space Sci Rev*, 216, 49
- [16] Usui, T., Kuramoto, K., & Kawakatsu, Y. 2018, in 42nd COSPAR Scientific Assembly, Vol. 42, B4.2–7–18
- [17] Watanabe, S., Hirabayashi, M., Hirata, N., et al. 2019, *Science*, 364, 268

Ionnyaláb 3D vezérlése gépi tanulással

MAKARA Árpád László*, REICHARDT András¹, and
CSURGAI-HORVÁTH László¹

¹BME-VIK, Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszék, Budapest*

Kivonat

Az ionhajtóművekben a felgyorsított ionok mozgási energiáját használjuk fel az űreszköz előre hajtására. Ebben a cikkben az ionnyaláb mozgásának előre megadott tartományon történő áthaladását vizsgáljuk meg.

A hajtómű fúvókáján elhelyezett elektródák és a gyorsító rács felső része közötti feszültségkülönbség hatására az ionok pályája módosítható. Az alapfeladat szerint az elektróda potenciálok változtatásával kell az előre megadott pályán végig haladni a töltött részecskének. A változtatható paraméterek az elektróda potenciálok, amelyek értékét felügyelt gépi tanulás alkalmazásával határozzuk meg.

Bevezetés

Az ionhajtóművek elektromos és néhány esetben mágneses térrel gyorsított ionok mozgásából származó erők által működtetett hajtóművek. Működési elvükből kifolyólag csupán ritka közegben használhatóak, ugyanakkor jól szabályozhatóak és tartós működésre képesek. Kisméretű műholdak pályakorrekciós feladatainak elvégzésére kiválóan alkalmasak.

Korábbi kutatásunkban kétdimenziós elrendezés esetén vizsgáltuk, hogyan befolyásolja az elektródák száma az ionok útját, illetve gépi tanulás segítségével az ionok pályája hogyan alakítható. Mostani munkánk során az elsődleges cél az eljárás átültetése háromdimenziós esetre, mely már jobban lefedi a valós felhasználási problémák körét.

A cikk szerkezete a következő: először tömören összefoglaljuk a hajtóművekről szükséges tudnivalókat, majd bemutatjuk a fizikai modellt az elektrosztatikus ionhajtóműre. Ezután rövid leírás olvasható a felügyelt gépi tanulás általunk történt megvalósításáról, majd eredményeinket összegezzük.

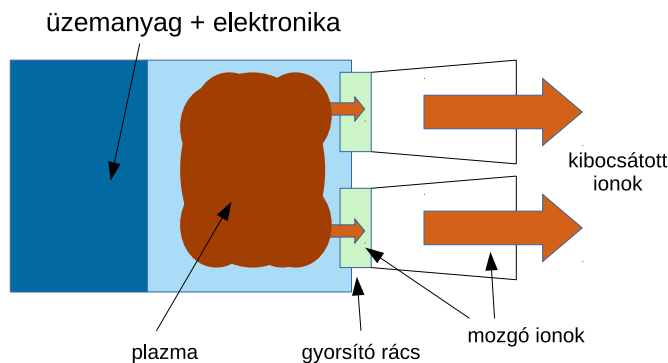
Űreszközök hajtóművei

A hajtóművek többsége meglehetősen egyszerű alapelven működik: a felhasznált üzemanyag, mely távozik az űreszközből tolóerőt fejt ki Newton 3. törvénye alapján, mely kiáramló anyaggal ellentétes irányba mozgatja az objektumot. A felhasznált üzemanyagtól függően különböző meghajtási módokat (szilárd, folyékony vagy egyéb) lehet megkülönböztetni. A nagyon nagy illetve közepes tolóerő elérésére nagy mennyiségű üzemanyagot elegendő hajtóműveket alkalmazunk. A kis tolóerőt igénylő esetekben (pl. pályastabilizálás, forgatás) egyéb meghajtási módok is lehetségesek.

*Levelező szerző: Árpád Makara, makara.arpadlaszlo@edu.bme.hu

Ionhajtóművek esetében a szükséges pályamódosítás (például fordulás) a felgyorsított részecskék pályájának módosításával érhető el. Ez megvalósulhat akár fizikai tereléssel is, végső soron a távozó anyag által keltett eredő erő iránya a mérvadó. Elektrosztatikus hajtómű esetén az üzemanyag az ion, melynek mozgása elektromos térrel befolyásolható [2]. Az ilyen ionhajtóművel felszerelt űreszközök nem igényelnek mechanikusan mozgó alkatrészeket ahhoz, hogy pályakorrekciót végezzenek el. Ezzel csökken a mozgó elemek által okozott hibalehetőségek száma.

Az ionhajtóművek további előnyei a precízen szabályozható kibocsátás és a jó hatásfok. Hátránya, hogy csak ritka közegben képes működni (tipikusan űr körülmények) mert a létrehozott tolóerő nagyon kicsi. Az ionokból képzett ionnyalábok tolóereje kicsi, szokásos méretek esetében μN - mN . Ugyanakkor változatlan gyorsító elektródák mellett az űreszköz tartósan tudja a gyorsítást tartani, ezzel nagy sebességet is elérhetővé téve (pl. Deep Space-1 küldetés[7]).



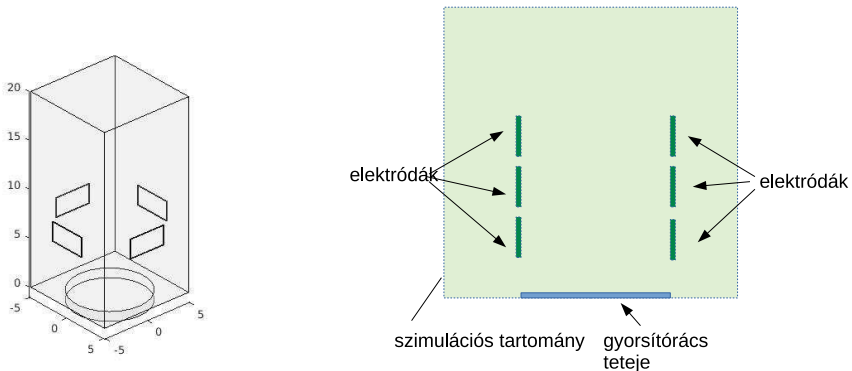
1. ábra. Vizsgált ionhajtómű vázlatos felépítése.

Az általunk vizsgált ionhajtómű egy CubeSat [5] méretű meghajtó egység, amelynek modellje látható az 1. ábrán. A belső részen helyezkedik el a vezérlő elektronika és az üzemanyagtároló rendszer. A következő vákuumkamrában hozunk létre ionokból álló plazmát, amelyet a gyorsító rács felgyorsít. Ezen ionok a fúvókák keresztül hagyják el a meghajtó rendszert. Az ábrán nem látható a neutralizáló elektronnyaláb, amely a feltöltődéstől védi meg a szondát.

Fizikai modell

A meghajtó általunk vizsgált része a fúvóka. A fizikai modell alapját az jelenti, hogy a fúvóka geometriája által megadott felületen elektródák helyezkednek el. Ezen elektródák feszültsége változhat (vezérelhető) a gyorsító rács felső részéhez képest. Az elektródák helyzete és alakja (ebben a vizsgálatban) nem változtatható, csak a feszültsége. Az időbeli változástól eltekintünk, ezért az elektromos tér kiszámítására sztatikus modellt alkalmazunk.

A 2. ábrán látható az elrendezés egy kétdimenziós keresztmetszete. A fizikai modell feladata, hogy meghatározza a gyorsító rács tetejéről induló ionok pályáját az elektródák feszültsége által meghatározott elektromos tér hatására. A fúvókán belüli teret vákuumnak tekintjük.



2. ábra. Szimulációs tartomány 3 dimenziós ábrán (bal oldali ábra), valamint a szimulációs tartományon értelmezett határok (jobb oldali ábra). Az elektródák (sötétzöld) és a gyorsító rács teteje (szürkés-kék) adott potenciálúak, a tartomány egyéb szélei homogén Neumann jellegű határfeltételt jelenetnek.

A megoldandó feladat az elektrosztatikus potenciálra (φ) vonatkozó (elektrosztatikus) Laplace-egyenlet (1)

$$\nabla \varepsilon \nabla \varphi = 0 \quad (1)$$

ahol ε jelenti a vákuum dielektromos állandóját. Az alkalmazott peremfeltételek az elektródákra és a gyorsító rács tetejére vonatkozóan (2/a.) illetve a külső szimulációs térre (2/b.) módon írhatóak le.

$$a) \quad \varphi_i = U_i, \quad i = 0, \dots, N, \quad b) \quad \left. \frac{\partial \varphi}{\partial n} \right|_i = 0 \quad (2)$$

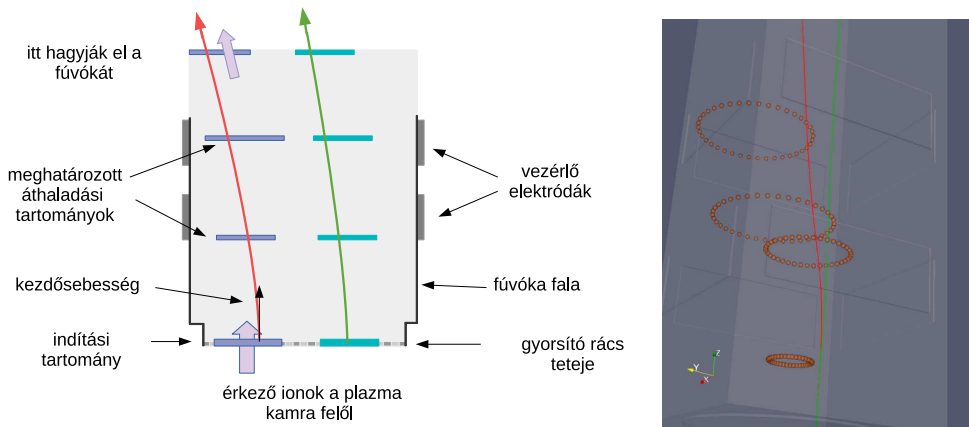
Az ionok haladási útját (pályáját) az elektromos tér ismeretében a mozgásegyenlet (3) integrálásával kapjuk ($\mathbf{r}$ az ion adott pillanatbeli helyzetét jelenti). Az optimalizálás folyamán ezeket a pályákat használjuk fel annak eldöntésére, hogy a kívánt útvonalat mennyire teljesíti az adott paraméterek esetén az ion.

$$m_{ion} \cdot \frac{d^2 \mathbf{r}}{dt^2} = -\nabla \varphi \quad (3)$$

Felügyelt gépi tanulás megvalósítása

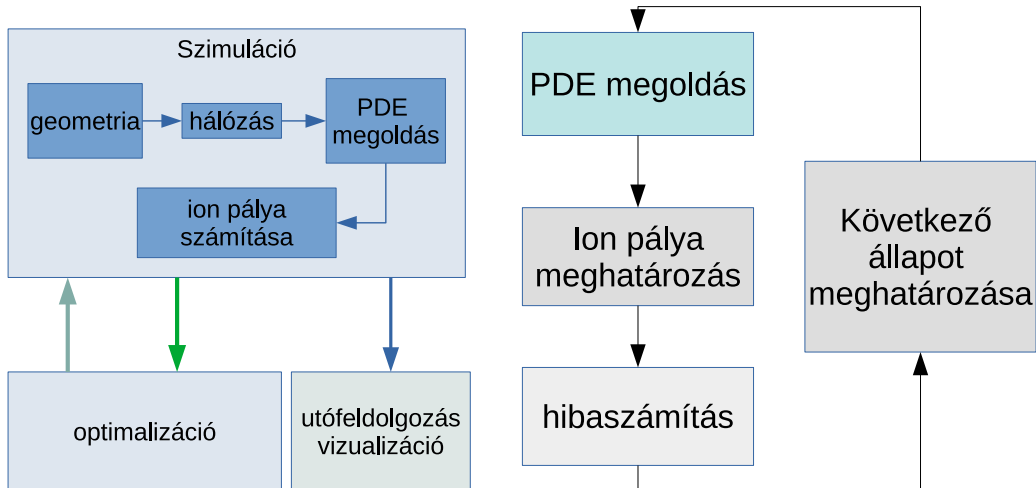
Jelen esetben optimalizálás alatt egy költségfüggvény minimalizálását értjük. Ez nem más mint az általunk előírt ion pálya és a ténylegesen befutott pálya különbsége. Azáltal, hogy definiálunk egy elvárt állapotot és ez alapján számítunk hibát, felügyelt gépi tanulásról beszélhetünk [6]. Optimalizáció során a különbség négyzetének minimalizálása a cél, melynek eredményeként a szimuláció során az elektródák által keltett tér az előírt útvonalon mozgatja az egyes ionokat.

A hibát előírt útvonalak mentén állítjuk elő, kétdimenziós hiba vektorként. Az elektródapárok számával hasonló nagyságrendben kijelölünk referenciasíkokat a z tengely mentén, melyekben referenciatartományokat határozunk meg. Így csak diszkrét pontokban ellenőrizzük a pálya megfelelőségét, mellyel számítási kapacitást csökkentjük. Mivel a kialakuló elektromos tér nem tud két szimulációs pont között tetszőleges nagy mértékben



3. ábra. Bal oldalon az előírt pályák megadása látható. Ezeken az előre meghatározott tartományokon kell az ion pályájának áthaladni. Jobb oldalon az optimalizálás lépéseinek hatása látszik (kezdeti pálya - zöld, végső pálya - piros), valamint az áthaladási referencia tartomány (narancssárga körök).

változni, így elegendő számú mintavételi ponttal az eljárás működőképes. Valós űreszköz esetében nem egy-egy iont alkalmaznak egyszerre a gyorsító térben, amelyek kezdeti belépési szöge eltérő lehet, így irreális elvárni, hogy mindegyik mozgó részecske egy-egy ponton haladjon át a térben. Helyette referencia köröket érdemes alkalmazni, melyeken való áthaladás esetén a kívánt pályakorrekció kerül végrehajtásra. A 3. ábrán, jobb oldalon látható az optimalizációs eljárás elemeinek térbeli elhelyezkedése, bal oldalon pedig a z tengely menti metszeten az optimalizálás célja egy kétdimenziós esetben.



4. ábra. Blokkdiagram a szimuláció/optimalizálás keretrendszeréről - Bal oldalon szimuláció és a többi nagyobb eljárásomag kapcsolata, jobb oldalon az optimalizációs hurok lépései

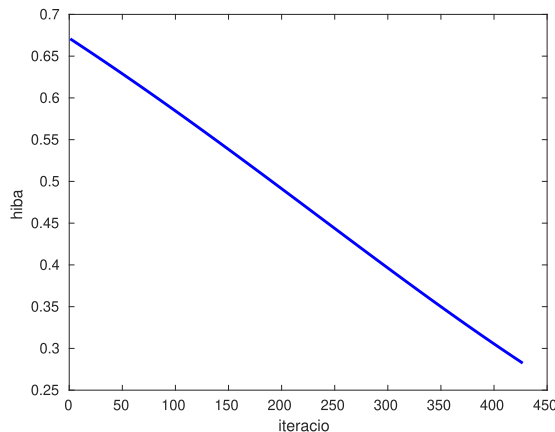
A hibavektort a következőképpen: értelmezzük: a hajtómű alsó lapjának a középpontja legyen egy Descartes-koordináta rendszer origója. Az alsó lappal párhuzamos síkban a hiba a referencia tartomány középpontját az ion pályájának exen síkon vett döféspontjának különbségvektorából képezzük. . Ez gyakorlatilag az elvárt és a szimulált eredmény

különbsége. Az egyes síkok hibavektorainak átlaga képezi a hibát az LMS (least mean square) algoritmus számára. Az eljárás a következő [1]:

$$\mathbf{W}_{n+1} = \mathbf{W}_n + 2 \cdot \alpha \cdot e \cdot \mathbf{p}, \quad (4)$$

ahol $\mathbf{W}$ az optimalizálandó súlymátrix, jelen esetben az elektródák potenciálja, α a tanulási ráta, e a hiba, $\mathbf{p}$ a bemeneti vektor, jelen esetben a skálázási vektor. Az utóbbi paraméter többféleképpen is megválasztható, alapesetben a rendre hozzátartozó elektróda felszíne.

A hibavektort x és y komponensekre bontjuk és két-két oldal elektródáihoz rendeljük. Kétdimenziós probléma esetén működőképes az eljárás [4], háromdimenziós esetben fenntartásokkal, de működik. Ezzel a megközelítéssel szétválasztjuk két párhuzamos iterációra a hajtómű optimalizációját, amelyeknél a leállási kritérium a hibavektor hosszának a határ alá csökkenése. Ez utóbbi eleme miatt a hiba kritérium működik, ugyanakkor a konvergálást lassítani fogja a számtalan reinitializálás. Ugyanis, ha az egyik komponense a hibavektornak eléri a nullát (azaz nincs hiba), de a vektor hossza még az előírt alatt marad, akkor a másik komponense még módosítja a hozzátartozó elektródapár értékeit, ezzel változtatva a teret. Ugyanakkor ha változik a kialakult tér, a már optimalizált hibavektor eddig jónak talált komponense újra tanulásra kényszerülhet, így lényegében ismét mindkét komponens használatba kerül. Az eljárás így időnként kvázi újra inicializálja az optimalizálandó problémát, melynek eredményeképpen töréseket fedezhetünk fel, és a hiba szokásos exponenciális csökkenése helyett lineáris jelleget fedezhetünk fel. Az 5. ábrán látható a négyzetes hiba alakulása.



5. ábra. A négyzetes hiba alakulása

Az eljárás tulajdonképpen megfeleltethető annak, hogy két adaptív FIR szűrőt [3] tanítunk arra, hogy egy összekapcsolt hibafüggvényen keresztül a kimeneti jelük egy ion pályáját eredményezze. Összegezve a teljes eljárást (mind a szimuláció, mind az optimalizáció részét) a 4. ábrán láthatóak az egyes nagyobb lépések. Számítási igényeket tekintve, a legerőforrásigényesebb rész a FEM szimuláció elvégzése, amely szükséges minden ciklusban, más-más potenciál értékekkel.

Összefoglalás

A korábbi kétdimenziós elrendezést sikerült kiterjeszteni háromdimenziós térbeli esetre. Mind a szimuláció, mind az optimalizálási rész megfelelően működik. Azonban a négyzetes hiba alakulásának vizsgálatával világossá válik, hogy a költségfüggvény (aminek a négyzetének minimumát keressük) nem eléggé hatékony. A jövőbeni kutatási tervek között két nagy cél szerepel: a fizikai modell szimulációjának a pontosítása és jobb költségfüggvény megalkotása.

Hivatkozások

- [1] Demuth, H. B., Beale, M. H., De Jess, O., & Hagan, M. T. 2014, Neural Network Design, 2nd edn. (Stillwater, OK, USA: Martin Hagan)
- [2] ESA. 2019, Science & Technology - Electric Spacecraft Propulsion, <https://sci.esa.int/web/smart-1/-/34201-electric-spacecraft-propulsion>, Hozzáférés: 2021.10.05.
- [3] Haykin, S. 1996, Adaptive Filter Theory (3rd Ed.) (USA: Prentice-Hall, Inc.)
- [4] Makara, Á. L., Reichardt, A., & Csurgai-Horváth, L. 2020, in In Selected papers of 6th International Conference on Research, Technology and Education of Space (H-SPACE 2020) (HSPACE2020-FP-59, 2020: Hungarian Astronautical Society)
- [5] Mehrparvar, A. 2014, CubeSat Design Specification Rev. 13, The CubeSat Program 13, Cal Poly SLO
- [6] Murphy, K. P. 2012, Machine learning: a probabilistic perspective, Adaptive computation and machine learning series (Cambridge, MA: MIT Press)
- [7] Rayman, M. D., Chadbourne, P. A., Culwell, J. S., & Williams, S. N. 1999, Acta Astronautica, 45, 381

Magyar részvétel az ESA JUICE projektjében, tápegység fejlesztése a Jupiter Jeges holdjai kutatásában

Nagy János¹, Hevesi László¹, Vizi Pál Gábor¹, Szalai Lajos², Horváth István², Szalai Sándor³

¹ Energiatudományi Kutatóközpont, 1121 Budapest, Konkoly-Thege út 29-33

² Wigner Fizikai Kutatóközpont, 1121 Budapest, Konkoly-Thege út 29-33

³ SGF Technológia Fejlesztő Kft., 1121 Budapest, Konkoly-Thege út 29-33

JUICE - JUPiter ICy moons Explorer - az ESA 2012-ben elfogadott bolygóközi missziója. A tervek szerint a JUICE űrszonda 2022 szeptemberében indul és 2029 -ben éri el a Jupiterhez, ahol három évet tölt az óriás gázhalmazú bolygó és három legnagyobb holdja, a Ganymede, a Callisto és az Európa - Galilei-holdak, amiket Galilei 1610 január 7.-én fedezett fel - részletes vizsgálatával. A projekt tudományos küldetésnek a középpontjában a Jupiter jeges holdjai állnak és az egyik célja a Jupiter környezetében az élet esetleges meglétének a vizsgálata. A JUICE űrszonda francia Guyane-ből, Kouruból Ariane-5 rakéta fedélzetén indul. Az Ariane-5 induló tömege 777 000 kg. A Jupiterhez eljutó hasznos tömeg 4800 kg, amely 3000 kg üzemanyagot tartalmaz a Jupiter térségében történő manőverezéshez. A tudományos berendezések és a napelem tömege 1800 kg. A jelentős mennyiségű üzemanyagon kívül a nagy bolygók, Vénusz, Föld, Mars gravitációs lendítő hatására is szükség van ahhoz, hogy az űrhajót célba juttassák, ezért a súlykérdések nagyon fontosak voltak a fejlesztésben. Az űreszköz először a Jupiter körüli pályáról vizsgálja a bolygó légkörét, magnetoszféráját, vékony gyűrűit és holdjait. Ezt követően – illetve az Európa és a Callisto holdak vizsgálata után – a Naprendszer legnagyobb holdja, a Ganymedes körüli pályára áll, ahol több hónapot töltve egyre alacsonyabb pályáról fogja vizsgálni a jeges óriásholdat. A Ganymedes és az Európa holdak felszíni jégrétege alatt vízóceánok találhatók, amelyekben az élet kialakulásának feltételei is adottak lehetnek. A küldetés során először kerülhet sor ezek vizsgálatára a Jupiter rendszerében.

A JUICE fedélzetén 11 műszer utazik a Jupiterhez, ezek képalkotó műszerek, optikai spektrométer, in situ részecske-érzékelők, lézeres távmérő és rádiótudományi műszerek. A 11 műszer egyike a PEP (Particle Environment Package), részecske fizika műszer, amely 6 érzékelőt és 3 DPU-t tartalmaz, az űrszonda fedélzetén két helyen, az ún. PEP-Lo és PEP-Hi ágban kerülnek elhelyezésre. A magyar résztvevő korábban Wigner majd EK Űrtechnikai Csoportja tápegységet fejlesztett a PEP (Particle Environment Package) részecske fizikai műszerhez. A PEP szenzorjai vizsgálják a Jupiter rendszer plazmakörnyezetét.

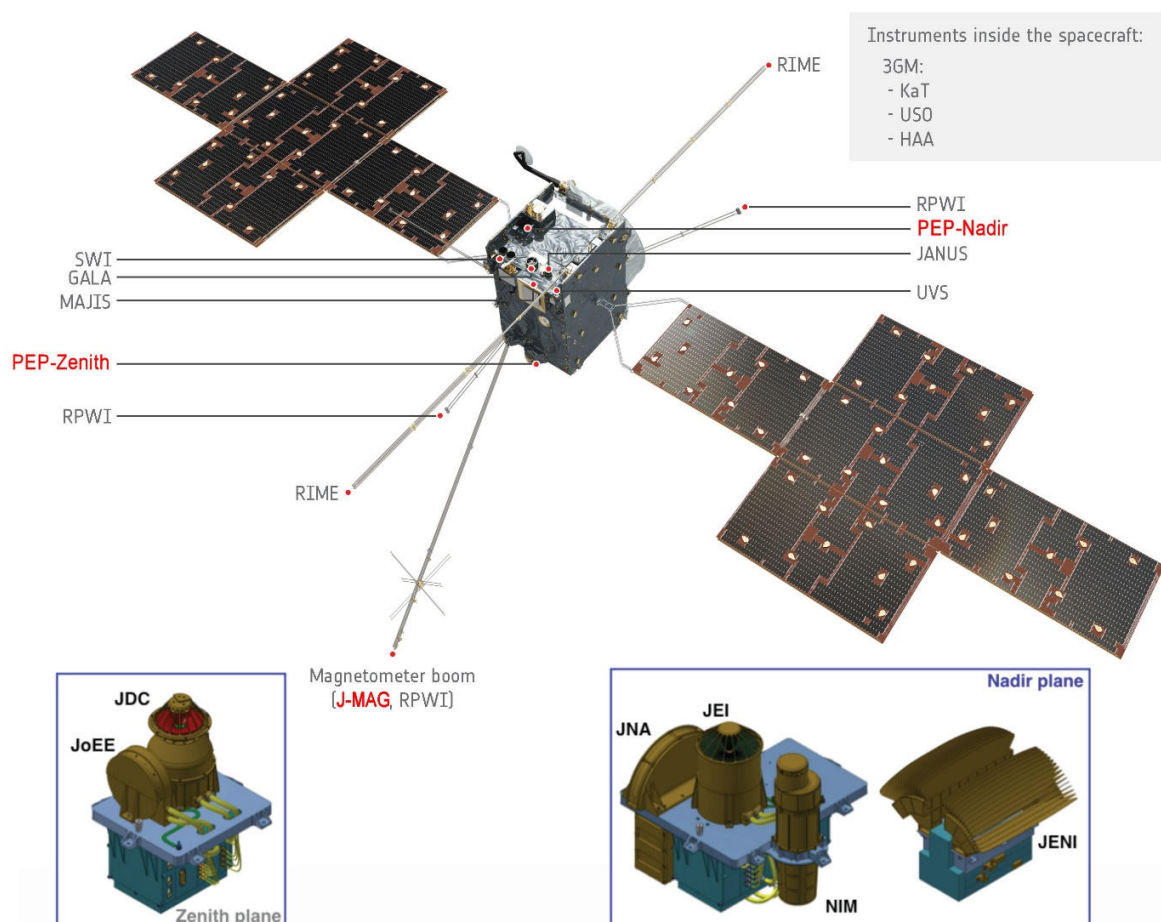
A PEP műszerei két egységet alkotnak (1- ábra): az európai fejlesztésű ún. PEP-Nadir Unit az űrszonda „felső” lapján (Nadir plane) elhelyezve négy detektoregységet tartalmaz (PEP-NU), míg az amerikai fejlesztésű ún. PEP-Hi a szonda másik oldalán (PEP- Zenith Unit) két detektoregységet tartalmazva végzi a méréseket. Mindkét egységet egy-egy processzoregység vezérli, és továbbítja a mérési adatokat a szonda rádiórendszere felé.

A PEP mérni fogja a pozitív és negatív ionok, elektronok, exoszférikus semleges gáz, termikus plazma és energetikai semleges atomok sűrűségét és fluxusait. Az űrszondán a fedélzeti névleges feszültség 28V. Az Űrtechnikai Csoport feladata volt a DCC (Direct Current Converter) tápegység kifejlesztése a PEP számítógépe, kommunikációs csatornáit és szenzorjai számára. A munka nagy kihívást jelentett az elvárt nagyfokú megbízhatóság miatt, és a megbízható működést szélsőséges körülmények között is biztosítása miatt. Röviden bemutatjuk a DCC fejlesztését és a megvalósítását. A DCC vizsgálatához egy speciális tesztberendezés kifejlesztése, EGSE (Electronic Ground Support Equipment) is szükséges volt, ami szimulálta a PEP működését. Az EGSE-t az SGF Kft. fejlesztette ki, amivel a DCC ellenőrzése megvalósítható volt.

Áttekintjük a DCC egység felépítését, a tervezés során megadott követelményeket és előírásokat, amiknek meg kellett felelni. A minőségbiztosít fontos lépéseit, a gyártás technológiai előírásainak betartása, és az igénybevételi tesztek elvégzése. A magyar résztvevők feladatai a következők

- fedélzeti közös tápegység (DCC) tervezése, gyártása és tesztelése (beleértve a repülő példány tesztjét is) a PEP-Lo kísérelthez. A DCC áramellátást biztosít a PEP-Lo-hoz tartozó érzékelők számára.

- EGSE tervezése és gyártása PEP műszerek érzékelőihöz (szoftveresen és hardveresen egyaránt).



1. ábra A JUICE űrszonda tudományos műszereinek elhelyezése (Forrás ESA és IRF)

PEP detektorainak elnevezése

Nadir plane

JDC Jovian Dynamics and Composition

JEI Jovian Electron and Ions

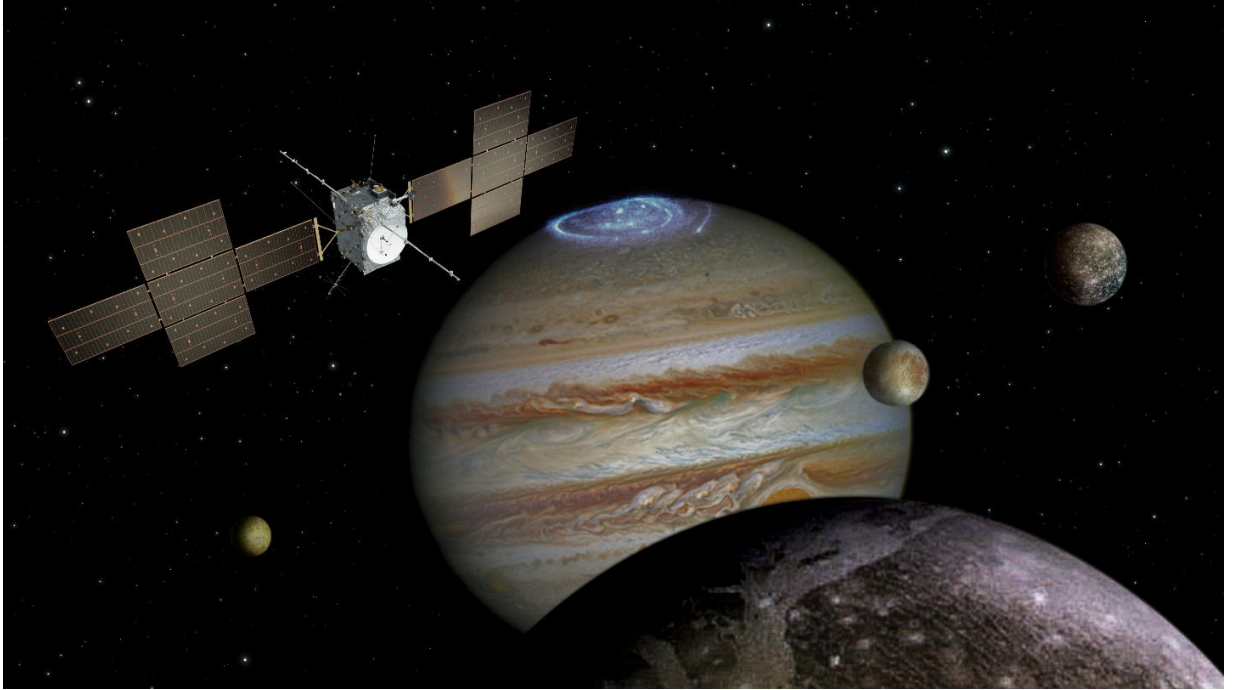
JNA Jovian Neutrals Analyzer

NIM Neuutral Ion Mass Spectrometer

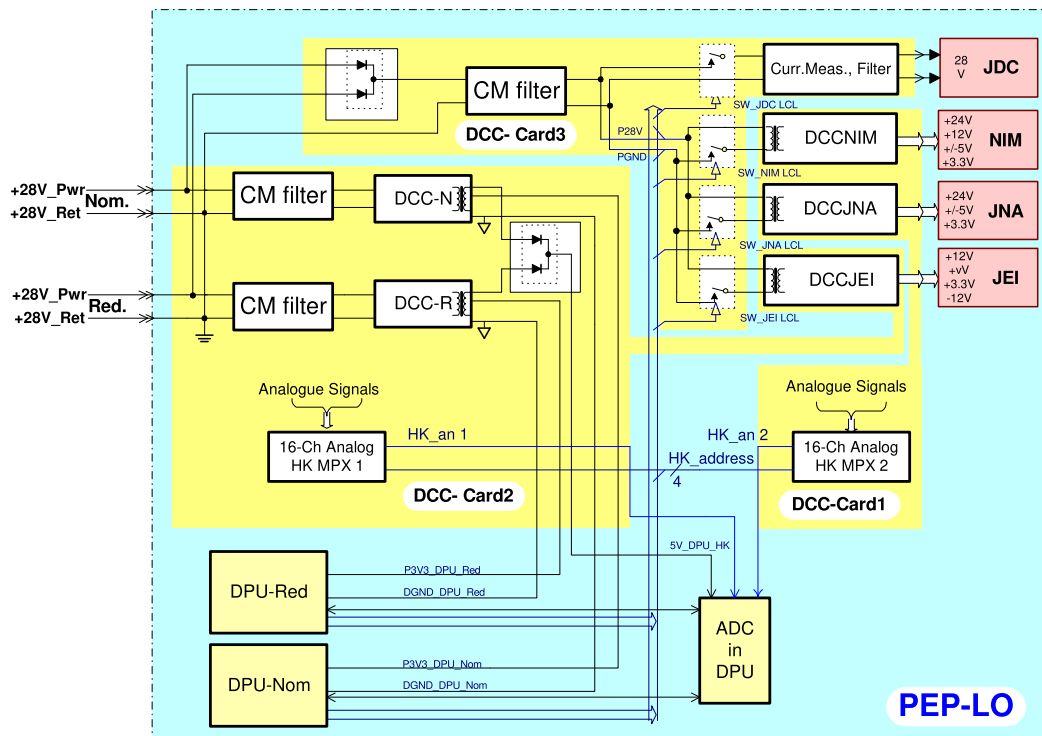
Zenit Plane

JENI Jovian Energetic and Ions

JoEE Jovian Energetic Electrons



2. ábra A Jupiter kutatása, JUICE a Jupiternél és jéges holdjainál (Forrás ESA)

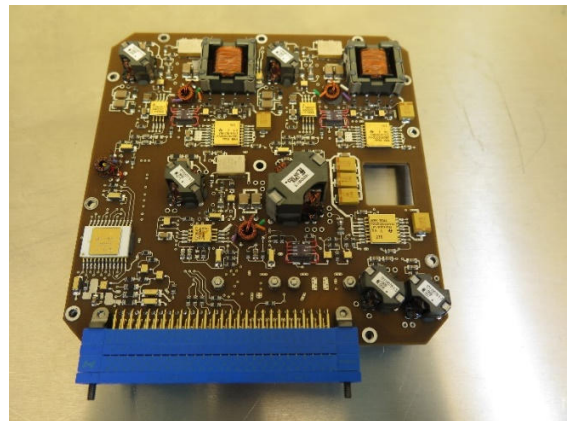
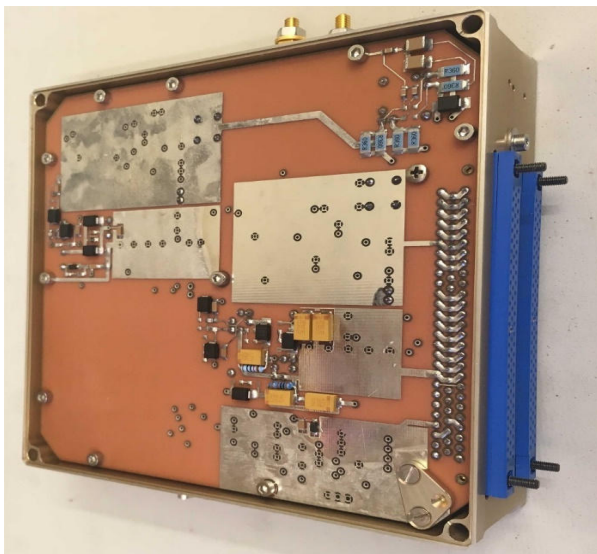


3 ábra A DCC blokkvázlata

Az 3. ábra mutatja be a DCC blokkvázlatát. Négy szenzort, a JDC, NIM, JNA, JEI és két DPU-t lát el táplálással. A fedélzeten a mintegy 70 m2 felületű napelemek segítségével biztosítják az energiaellátást, a fedélzeti tápellátás egységesen 28 V-ot biztosít a műszereknek, két ágon, egy main ágon és ha ez kiesik egy redundáns ágon. A PEP-hez fejlesztett DCC a 28V-ból előállítja a szenzorok és a DPU részére szükséges feszültségeket, amelyek +2,1V, +3,3V, +5V, -5V, +12V, -12V és +24V. Ezeken a vonalakon természetesen a megfelelő teljesítményt is biztosítani kell. Az egyes szenzorok tápfeszültségeinek egymástól való elszigetelése biztosítja, hogy az egyik detektor esetleges meghibásodása (pl. zárlat) ne tegyen tönkre a többi detektor hibátlan működését.

A rendszer az előzetes tervek szerint teljes redundanciát tartalmazott, de mivel súly problémák merültek fel, a redundanciát a PEP műszerben az elfogadható minimális szintre csökkentették és csak a PEP fedélzeti számítógépe a DPU és annak tápellátása maradt redundáns. A súly csökkentés során a szenzorok száma is csökkent kettővel. A DPU vezérli a szenzorokkal megvalósított méréseket, gyűjti az adatokat és továbbítja a fedélzeti rádiókapcsolaton át a földi vevőállomáshoz. A PEP műszeregyüttes maximális táplálási igénye 60 Watt. A DCC ezt 86%-os hatásfokkal biztosítja a fedélzeti 28V átalakításával. A szenzorok tápellátása nem tartalmaz redundanciát, de mivel a szenzorok mérési tartománya átfedéseket tartalmaz, így egy szenzor esetleges kiesése nem jelent teljes adatkiesést.

Az egyes egységeket egymástól galvanikusan elválasztott PWM vezérlő chipekre alapozott konverterek látják el táplálással. Az egyenáramú/egyenáramú átalakítók 200 kHz -en működnek, és közös modulusú és differenciális szűrőkkel rendelkeznek, amelyek csökkentik a vezetékek zajkibocsátását. A 200 kHz-es szinkronizálás lehetővé teszi az űrszonda emissziójának megkülönböztetését a tudományos adatoktól. A DCC tömege 1365 gramm, mechanikával, árnyékolással és négy nyákkal együtt, mérete 125 x 130 x 50 mm. A fejlesztés során a mechanikai méreteket is csökkentettük a kozmikus sugárzástól védő árnyékoló mechanika csökkentése érdekében. A disszipációs hő elvezetése is a mechanikában került elhelyezésre. A DCC kártyái hat rétegű nyákra készültek.



4. ábra A DCC tesztpéldánya összeszerelve, mellette a DCC kártyáinak egyike látható

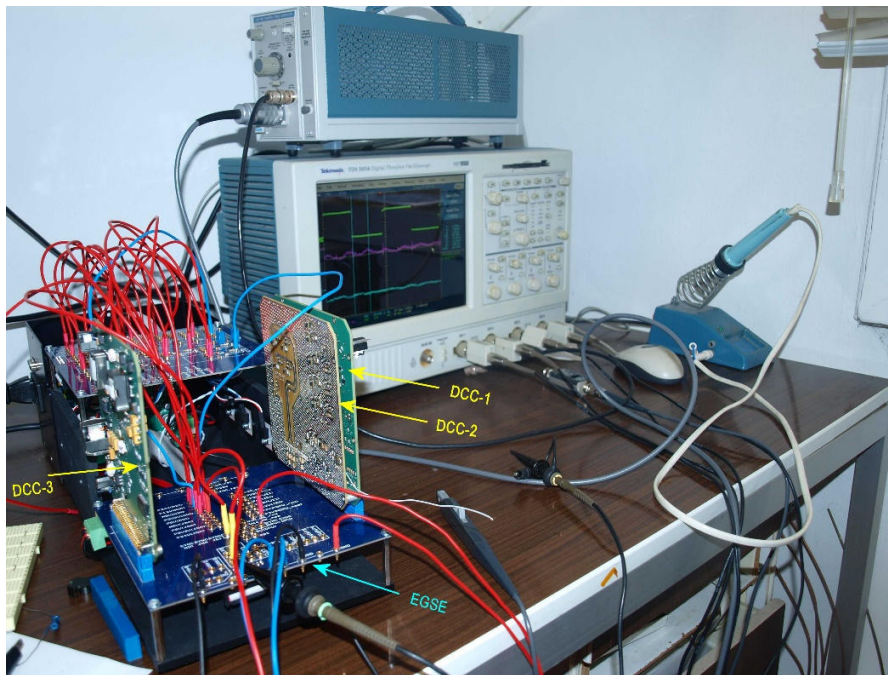
A feladat sajátos követelményeknek kell megfeleljen. Mivel a világűrben nincs légkör, a berendezések vákuumban üzemelnek, a működés közbeni hőelvezetést meg kell oldani. Ennek a megoldása összetett feladat, részben szimulációkra és termo-vákuum kamrában végzett mérésekre alapul. A mérések során az üzemelés teljes hőmérsékleti tartományában ellenőrizni kell a berendezést. Az űrszondán lévő úgy nevezett heaterek nem engedik az alkatrészeket túlhűlni, -50 C alá nem süllyed a berendezések hőmérséklete. A hőmérséklet azonban felfele is változhat egészen mintegy +50 C fokig, a bekapcsolt állapotban termelt hő hatására. A működőképességet ebben a széles hőmérsékleti tartományban kell biztosítani. Az űrben az utazás során a kozmikus sugárzással számolni kell. Ezt a Nap és a galaktikus sugárzás együtt okozzák. A Jupiter térségében a sugárzás által okozott terhelés kiemelten magas. Ez az alkatrészek tönkremenetelét okozhatná. Megfelelő alkatrészeket kell alkalmazni, amelyek un RadHard

minősítéssel rendelkeznek, azaz sugárzásállóak, legalább 100 krad összegzett terhelést elviselnek. A készülék fejlesztése során a készüléket érő kozmikus sugárzás mértéke szimulációk alapján került meghatározásra. A szimuláció rendkívül összetett feladat, ami tartalmazza a jelenlegi ismereteinket a kozmikus sugárzással kapcsolatban, és figyelembe veszi az űrszonda mechanikai felépítését, annak a kozmikus sugárzásra gyakorolt árnyékoló hatását. A cél az, hogy az űrszonda elektronikát tartalmazó részén sehol ne emelkedjen 50 krad felé az összegzett sugárzási terhelés a misszió egész időtartama alatt. A szimuláció eredményei az árnyékoló lemezek kialakítására, annak vastagságára, elhelyezésére adnak ajánlást. Az elektronika elhelyezése és az árnyékolás megvalósítása iterációs folyamat során valósult meg, és a tervezés során a súlyra vonatkozó korlátozásokat is figyelembe kellett venni.

A fejlesztés során az ESA által elfogadott, minősített alkatrészeket használhattuk a repülő példányban, amelyeket korábban vizsgálatokkal minősítettek. A tekercseket, induktivitásokat, a megfelelő minősítésekkel rendelkező alvállalkozó készítette el.

A feladat elkészítéséhez részletes követelménylistát adtak, amely a tervezés és a tesztelés során figyelembe veendő és teljesítendő követelményeket tartalmazza. Néhány követelményt megemlítünk: termikus, sugárzási, élettartam, teljesítmény, EMC zavarok és tesztelésük, mechanikai tesztek, stb..

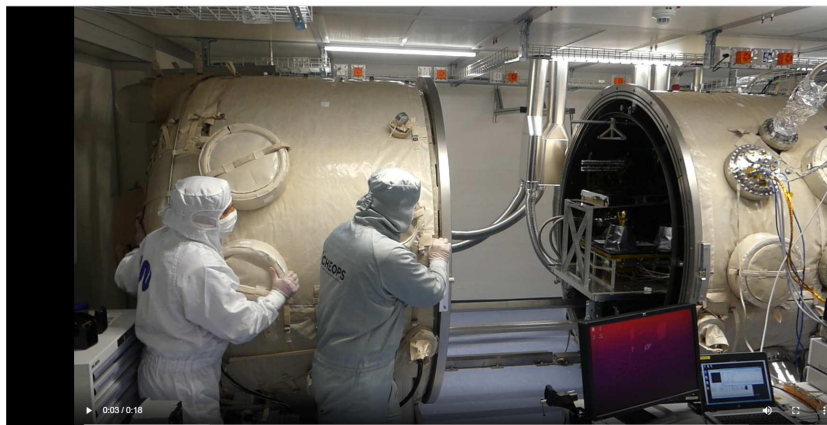
A követelmények előírták a DCC áramköreinek részletes szimulációját, Worst Case Analízist és PSA-t un. Part Stress Analízist. A teszteken kívül a szimuláció is alátámasztotta az áramköri megoldások megfelelő működését, illetve ez volt alkalmas arra, hogy választ adjunk arra a kérdésre, hogy az alkatrészek öregedése hogyan befolyásolja a misszió során a működést. A Worst Case Analízis az alkatrészek értékének szélsőértékénél vizsgálta a működést. Az alkatrészek a gyártók által megengedett működési tartományt bizonyos tartalékkal kell rendelkezzenek és a tartalék meglétét vizsgálta a PSA. Egy egyszerű példa a PSA-ra, ha egy kondenzátor 100 V-ig működhet, az alkalmazott tervezési előírások miatt ennek a tartománynak csak a felét lehet kihasználni, amit analízissel ellenőrzünk. EGSE (Electronic Ground Support Equipment) a DCC tesztelését az SGF kft. által elkészített tesztberendezéssel végeztük el, ami alkalmas a DCC-hez csatlakozó műszerek különböző működési módjainak szimulálásra, a DCC-től érkező housekeeping adatok fogadásra. Mint minden hosszú élettartamú projekt esetében, a megbízhatóság biztosítása kiemelt fontosságú. Ennek bizonyítására alapos tesztekkel kell végezni, nemcsak az űrbeli környezeti körülmények szimulálása mellett, hanem a különböző lehetséges nem nominális esetekben is. A tápegységeket minden fogyasztó (jelen esetben öt) és azok tápfeszültségei különböző terhelésénél kell ellenőrizni. Az EGSE biztosítja a fejlesztések során az űrszonda és a Nadir plane processzoregysége funkcióit (parancsokat és mérési adatok kiolvasását)



5. ábra A DCC tesztelése az SGF az EGSE-vel. A zöld kártyák a DCC nyákjai, a kék pedig az EGSE része.



6. ábra, A DCC tesztelése termo-vákuum kamrában. Az EGSE látható a képen. A DCC a kívülről kék szigetelővel borított termo-vákuum kamrában található és az EGSE-vel kábelekkel van összekötve.



7- ábra Az összeszerelt PEP műszer a Berni Egyetemen bekerül a termo-vákuum kamrába.

A DCC-ből három teszt és két repülő példány készült. A repülőpéldányok összeszerelése és tesztelése a PEP többi műszerével sikeresen megtörtént a Berni Egyetemen (7. ábra). A JUICE küldetés fővállalkozója az AIRBUS, Európa vezető műholdépítő vállalata. Az AIRBUS-hoz számos alvállalkozó szállít be részegységeket. Ezek integrálása, hőtani tervezése és összeépítése rendkívül összetett folyamat. Először valamennyi részegységet külön-külön tesztelnek, majd az illesztő (interfész)felületek kölcsönhatásainak vizsgálata következik. Ezt követi a több ezer elem összeépítése, végül az összeépített szerkezet együttes vizsgálata. A JUICE űrszonda összeszerelése megtörtént, amely tartalmazza a 11 műszert és jelenleg számos sikeres teszten túl van, és folynak az előkészületek a 2022-es indulásra.

Tavaszi jégfoltok keresése a Mars déli féltekéjén

Gergácza Mira Anna^{1,2}

¹ Eötvös Loránd Tudományegyetem

² CSFK Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet

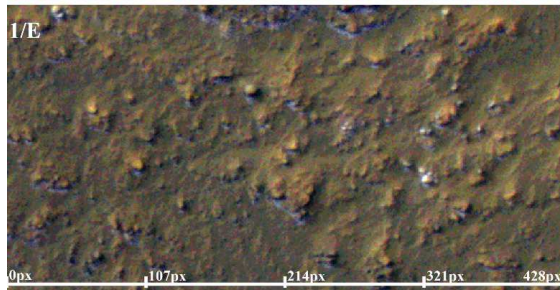
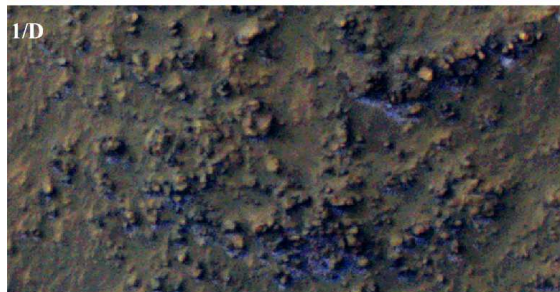
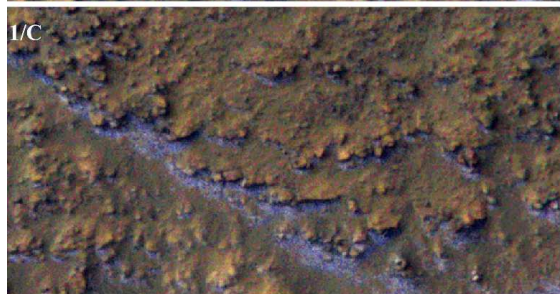
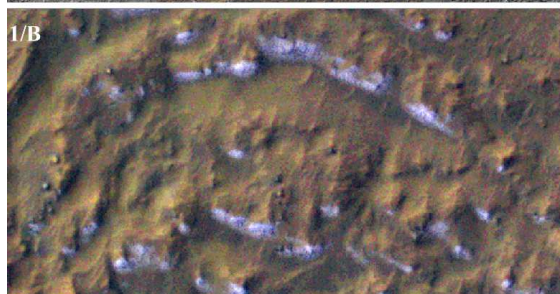
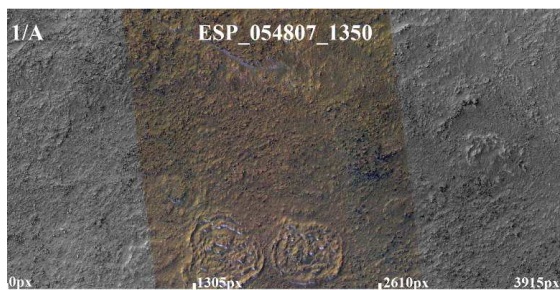
A Marson kulcskérdés a víz mai előfordulási esélyének, lehetőségnek a megértése. Ennek tesztelésére olyan tavaszi jégfoltokat kerestem a bolygó déli féltekéjén, amelyek a pólussapka visszahúzódása nyomán visszamaradtak, és az erősödő besugárzás révén nem kizárható, hogy a cseppfolyós fázis is megjelenik bennük. Az ilyen jégfoltok az MRO-űrszonda HiRISE felvételein elemezhető, és eloszlásuk térben és időben elemezhető.

Bevezetés

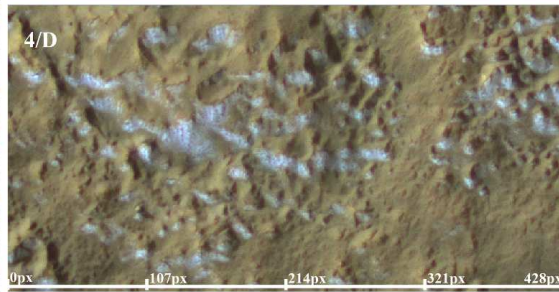
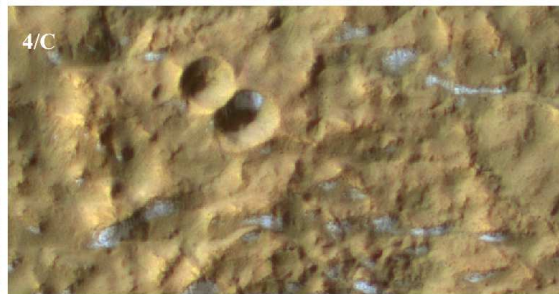
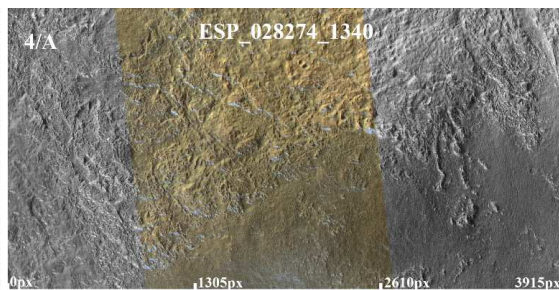
Mivel a Mars légkörének és felszíni törmelék takarójának kicsi a hővezető képessége [1,2], ezért a zsugorodó pólussapka visszahúzódása után is maradhatnak kisebb jégfoltok [3] a felszínen ott, ahol gyenge megvilágítást kaptak, például lejtőszög vagy árnyékoló felszínformák miatt. Az ilyen területeket is eléri végül a napfény, ilyenkor a jég gyorsan melegedhet — egyelőre nem tudni, hogy ekkor megjelenhet-e cseppfolyós fázis [3,4], esetleg vagy sem - ami az élet lehetősége szempontjából is fontos kérdés [5, 6, 7].

A munka során először a Mars déli féltekéjén az évszakos pólussapka visszahúzódása után megmaradt jégfoltokat azonosítottam a Mars Reconnaissance Orbiter-szonda optikai felvételein a JMars szoftverrel, majd előfordulásukat és jellemzőiket statisztikailag vizsgáltam. A kutatás során 51 képet elemeztem, ebből 31-en mutatkoztak jégfolt, azonban az adatbázis bővülőben van. Számunkra érdekes, kisebb jégfoltokat 140-től 200 *solar longitude* érték között a déli tavasz és nyár idején a -40° és -60° földrajzi szélesség között találhatunk. Első körben minden világos foltot potenciális jégnek vettem, a későbbi vizsgálatok után azonban pontosabb kritériumokat fogalmaztam meg, ennek megfelelően nem tekintettem kisebb jégfoltoknak a világos sziklákat (kinézetük alapján lehet őket elkülöníteni), emellett a felhők és a kiterjedt porborítások (világos foltok) diffúz peremük alapján jelentősen elütnek a kisebb jégfoltoktól.

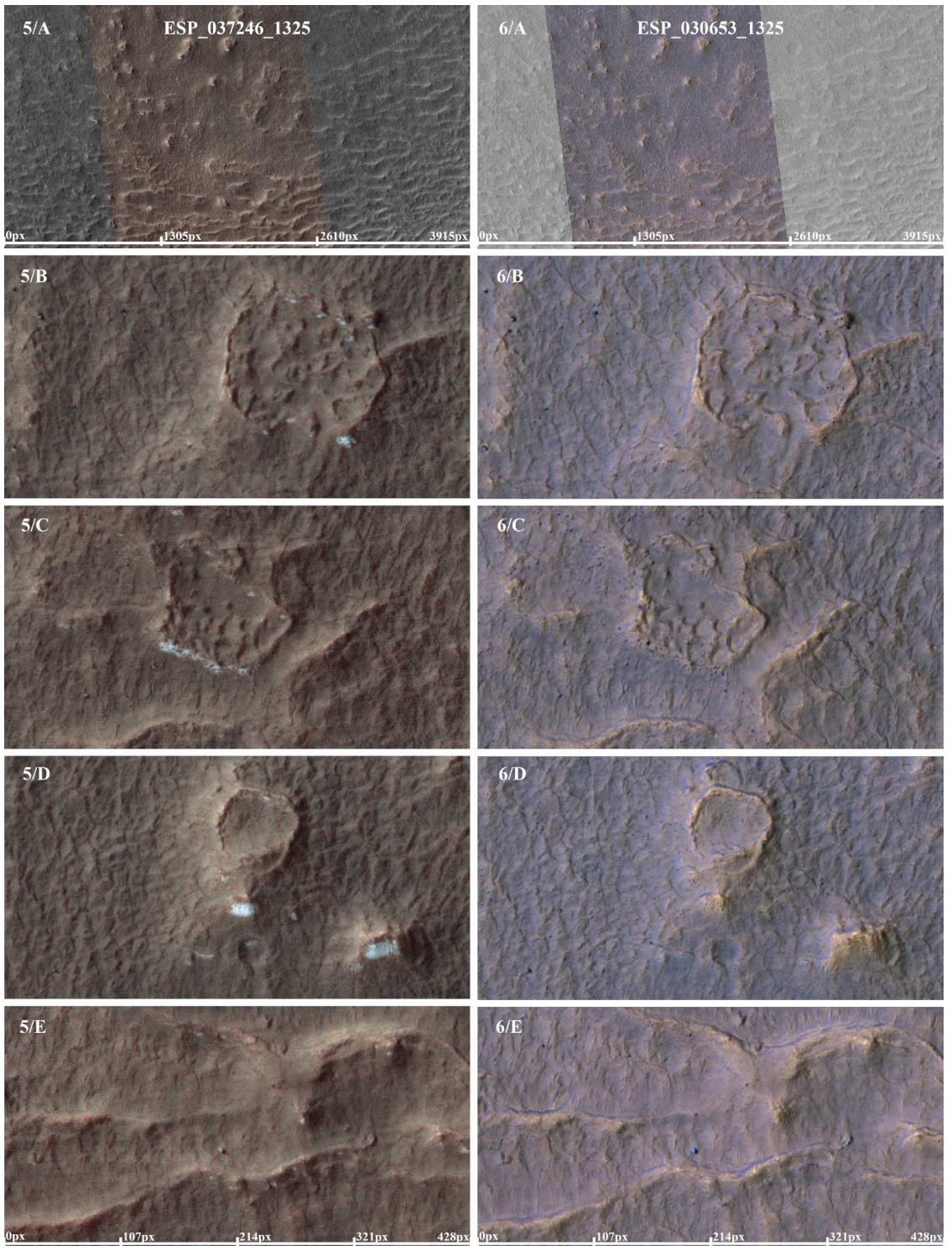
Az eredmények azt mutatják, hogy a vízjég foltok optikai megjelenés alapján elkülöníthetők az egyéb világos alakzatoktól, mint például a szikláktól és kiterjedt felhőktől. A színes IRB HiRISE képeken a vízjég környezeténél világosabb „hideg árnyalatú”, jellemzően kékes-fehéres folt, ellenben a világos kőzetek általában sárgás árnyalatúak. A jég jellemzően követi az árnyékoló felszíni formát, homokdűnés és dimbes-dombos helyeken sok folt fordul elő, míg sík terepen inkább csak egy kettő, azok is laposabb mélyedések oldalában vagy repedésekben. Jég mindig az árnyékoló domborzati formák pólus felőli oldalán van (jelen esetben a déli pólus felőli oldalon). Az átmérő a képeken 6 pixel és 1000 pixel (azaz 2-3 m és 250 m) között mozog, azonban míg a kisebb átmérőjűek jellemzően oválisak, a nagyobbak inkább elnyúltak. Ha jeges, a fehér foltoknak nincs éles határa, a jégfoltok a várakozásoknak megfelelően nem vetnek árnyékot (gyakran látni olyan világos foltokat melyek kicsi árnyékot vetnek, ezek sziklák lehetnek, amelyek odafigyeléssel kiszűrhetőek). Erre láthatunk példát az 1. ábra 1/E képén. A megfelelő képek jellemzően -40° és -50° földrajzi szélesség között helyezkednek el, rajtuk kisebb jég 150-180 *solar longitude* évszakos fázis között figyelhető meg.



1.ábra: ESP_054807_1350 HiRISE kép részlete
(1/A) és példák a kinagyított jeges területekre,
-44.894° 312.160°, Ls=154.804



2.ábra: ESP_028274_1340 HiRISE kép részlete
(4/A) és példák a kinagyított jeges területekre
-45.5803° 10.039°, Ls=151.417



3. ábra: ESP_037246_1325 ($L_s = 157.719$) és ESP_030653_1325 ($L_s = 260.936$) HiRISE képek részlete (5/A és 6/A) és a példák kinagyított jeges területre (5/B, 5/C, 5/D, 5/E) valamint a nyári párjuk, ahol már elolvadt a jég (6/B, 6/C, 6/D, 6/E),
 -47.31985° 219.946°

Az 1. ábrán szépen megfigyelhetők a fentebb megfogalmazott azonosítási kritériumok, a foltok kékes árnyalatúak és rendre napárnyékos helyen jelennek meg, követik az árnyékoló formát. 1/E kép érdekes, első ránézésre jégnek gondolhatnánk a jobboldali fehér foltot. Azonban ha jobban megvizsgálva látni, hogy a déli pólus felőli oldalában kicsi kékes-fehér folt van, tehát nem szikla-szerű jeget látunk, hanem kőzetet. A 2. ábrán is jól látszik, hogy az árnyékoló formák pólus felőli oldalában nagy biztonsággal mondhatjuk, hogy jeget látunk, azonban érdekes itt 4/B, ahol úgy tűnik hogy nincs árnyékoló forma, a jég vékonyan és összefüggően fedi a felszínt (jobban megnézve egyébként olyan mintha lennének apró árnyékoló formák vagy repedések a talajban, azonban ez a kép alapján nem állapítható meg).

Készült nyári kontroll vizsgálat is, ezt a 3. ábrán láthatjuk. Az első kép (5-ös oszlop) $L_s=157.719$ -kor készült, jól megfigyelhetők rajta az árnyékoló formákat jól követő, déli pólus felőli oldalon elhelyezkedő kisebb, 5-80 pixeles jégfoltok. A három nagyobb folt (egy 5/C-n és kettő 5/D-n), valamint a többi körülbelül húsz darab kisebb folt az $L_s=260.936$ -kor készült képeken (6-os oszlop) már nincs rajta, így biztosak lehetünk abban, hogy valóban jégfoltokat vizsgáltunk.

Következő űrszondás küldetések és a helyszíni kutatómunka tervezésében is számít az ilyen jégfoltok elfordulása [8, 9], egyrészt a foltok pontosabb megfigyelése révén, másrészt ha rendszeresen víz jelenne meg ezeken a helyszíneken, akkor ennek ott esetleges kémiai következményei is elemezhetőek lennének.

Irodalom

- [1] Grott M. et al. 2021. Thermal Conductivity of the Martian Soil at the InSight Landing Site From HP3 Active Heating Experiments. JGR 126, E006861.
- [2] Kereszturi A. 2012. Mars – fehér könyv a vörös bolygóról. Magyar Csillagászati Egyesület, Budapest
- [3] Langevin, Y.; Hansen, C.; Thomas, N.; Vincendon, M.; Titus, T.; Piqueux, S. ; Bibring, J. -P.; Gondet, B. : Investigations of selected areas of the south seasonal cap of Mars in early 2009
- [4] Pál B., Kereszturi A. 2017. Possibility of microscopic liquid water formation at landing sites on Mars and their observational potential. Icarus 282, 84–92
- [5] de Vera J.-P et al. 2014. Results on the survival of cryptobiotic cyanobacteria samples after exposure to Mars-like environmental conditions. International Journal of Astrobiology 13, 35-44.
- [6] Marschall M. et al. 2012. Migrating and UV screening subsurface zone on Mars as target for the analysis of photosynthetic life and astrobiology. Planetary and Space Science 71, 146-153.
- [7] Horváth A. et al. 2009. Analysis of Dark Albedo Features on a Southern Polar Dune Field of Mars. Astrobiology 9, 90-103.
- [8] Orgel C. et al. 2014: Scientific Results and Lessons Learned from an Integrated Crewed Mars Exploration Simulation at the Rio Tinto Mars Analogue Site. Acta Astronautica 94(2), 736–748,
- [9] Kereszturi, A. 2011. Geologic field work on Mars: distance and time issues during surface exploration. Acta Astronautica 68, 1686-1701.

Mars Rover Modell verseny – A Pandémia Kihívás

Vizi Pál Gábor ¹, Sipos Attila ²

¹ ELKH EK MTSzSz Űrtechnika vizi.pal.gabor@ek-cer.hu

² Magyarok a Marson Verseny

2006-ban született az Alkalmazott Mérnöki Tudományok Versenye ötlete, amelyet a kor kihívásának megfelelő keretbe öntve jött létre a Mars Rover Modell verseny, mely honlapot is kapott: magyarokamarson.hu. A bő másfél évtized alatt a verseny nyerteseiből több úrvállalat alapítói, munkatársai lettek. Ahhoz, hogy e folyamat folytatódjék, a COVID-19 járvány miatt meg kellett menteni a versenyt, melyet kényszerűen az online térbe helyeztünk.

Bevezetés

Versen्यünket 2020 tavaszán a járvány első hulláma, majd ősszel a második miatt kellett törölni, így kértük a csapatokat, hogy online anyagot küldjenek a megoldásaikról.

Ez egy szomorú bár reményteljes összefoglaló beszámoló az éves Mars rover modell versenyünkről, az Alkalmazott Mérnöki Tudományok Versenyéről, melynek népszerű neve: Magyarok a Marson. A versenyt a pályázók személyes részvételével két előzetesen kijelölt időpontban is megtartottuk volna 2020-ban. Az elsőt a COVID járvány első hulláma miatt törölték, a második találkozót végül az egyetem rektora a kormány négy nappal korábbi rendeleteire hivatkozva volt kénytelen törölni a második hullám miatt.

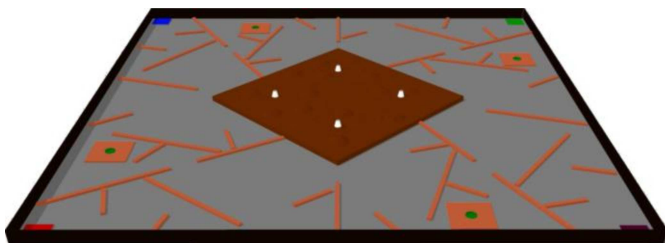
Folyamatosan terveztük a versenyt élőben is lebonyolítani, de végül a pándémia miatt 2020-ban felhívtuk a versenyző csapatokat, hogy küldjenek videókat, képeket és leírásokat a robotokról és megoldásokról, amelyekkel már elkészültek.

Kötelességünk elmondani versenyzőink COVID-19 ellenére elért közelmúltbeli sikereit, akik most résztvevői (majd később támogatói lesznek a Versenynek) és képesek voltak alkalmazkodni az új pandémiás helyzethez.

Versen्यünket bemutattuk Houstonban az amerikai Lunar and Planetary Science Conference-en (LPSC) [1-9] és hazai konferenciákon. [10]

Az év elsődleges célja hangsúlyt fektetni a mechanikus és 3D ismeretekre valamint a 3D nyomtatásra. A verseny kerettörténete, hogy meg kell menteni Mark Watney-t, mely karakter a Mentőexpedíció - The Martian, sci-fi-ből származik. A film kapcsolatos Magyarországgal, mert a film harmadát Magyarországon készítették. A feladat egy rover építése, irányítása és manipulátorok használata.

Egy világjárvány esetén is meg kellett találnunk az előnyt, amit a verseny javára fordíthattunk, Jelen esetben ez az, hogy láthattuk a csoportok fejlesztési és tesztelési fázisait. Ezúttal az első három csapat mind első helyezett lett és beszámolunk az eredményeikről.



A verseny pályája, középen az űrhajó modellek



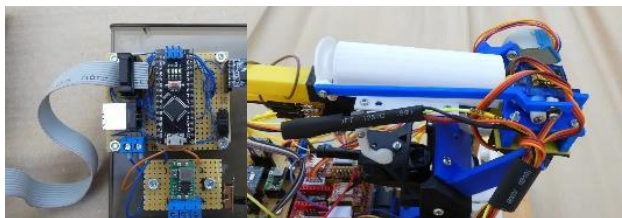
Szervezői teszt rover

A COVID-19 nehézsége ellenére a versenyen sikeresen részt vett csapatok

KissBé: Az „év nyertese”.

Általános és középiskolás diákok és egy robotika tanár édesapa.

A robot tulajdonságai:

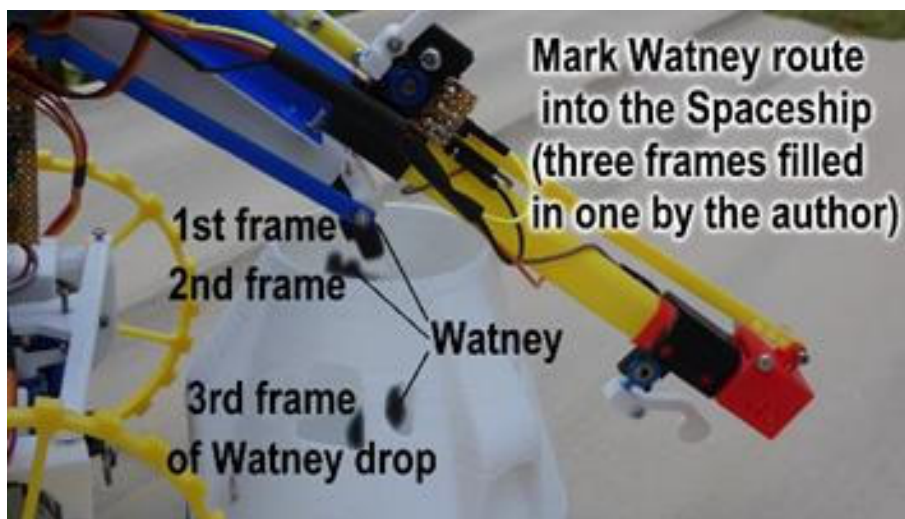


- 4 kerék meghajtás (2 kormányozható)
- 3 cellás LiPo akku 2000 mAh
- Mintavételezés egy markolóval, ami a mintákat egy tároló tartályba gyűjti. Induláskor a tartályban van az úrhajós, és ide kerülnek a minták is.
- Önműködő mintavételezés egy gombbal indítva
- A motorok automatikusan gyorsulva indulnak
- Elöl lézeres távolságmérő az úrhajó kereséséhez
- 180 fokos látószögű FPV kamera
- A mintavevő kart két végálláskapcsoló korlátozza
- Vezérlés 3 db arduino-val: motorvezérlő, központi egység HC-12 vevővel, lézeres távmérő

- Moduláris felépítés, minden alkatrész könnyen cserélhető

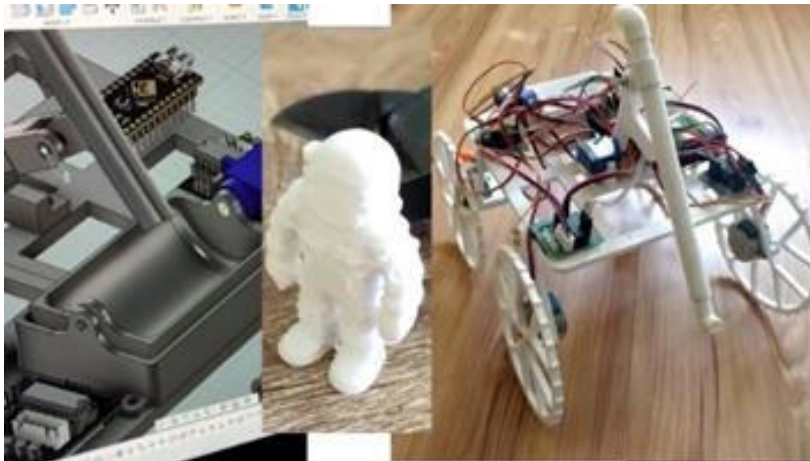
Egy Arduino HC-05 BASIC Nano 3.0-t és egy HC-12 Rádiómodul távvezérlőt használtak a robothoz.

Működése: A gyűjtőkar (Mark Watney megmentése érdekében) mozog és fog; felhasznált alkatrészek: ToverPro MicroServo 99S G90, lásd a filmet [11]

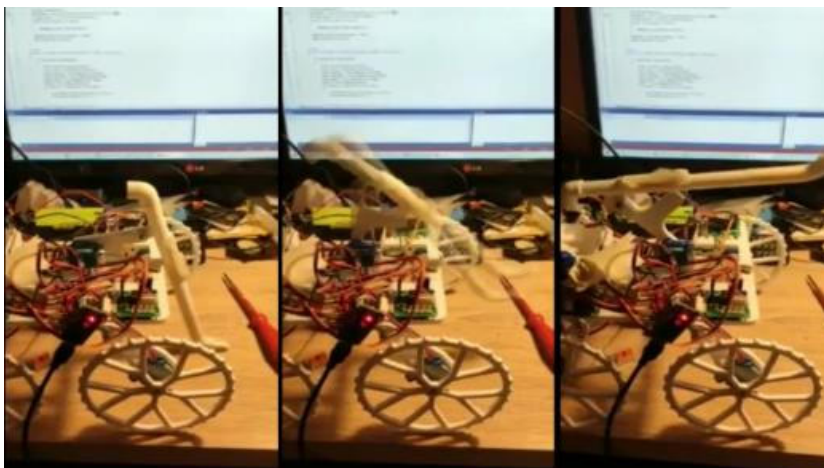


Delta2 – öreg róka csapat: Az „év bajnoka”

Az első versenyző 2010 -ben kezdte az egyetemet, ő és csapata tagjai kiváló helyezéseket értek el az évek során.



A Delta2 is Arduino kiegészítőkkel dolgozott. 28BYJ-48 léptető motort alkalmaztak ULN2003 meghajtóval. Az Autodesk Fusion 360 programot használták a 3D nyomtatáshoz és az egész tervezés folyamán. Ők is ki tudták nyomtatni az űrhajó és Watney figuráját.

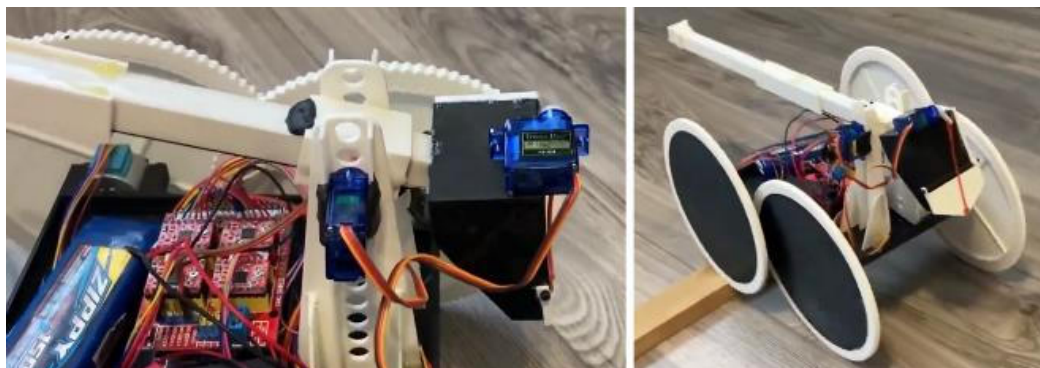


A robotkar programozása és a tesztfázisok kiválóan nyomon követhetők a videójukon, a számítógépük képernyőjén jól látható az Arduino Developing program és használata. A film a hivatkozásoknál megtekinthető. [12]

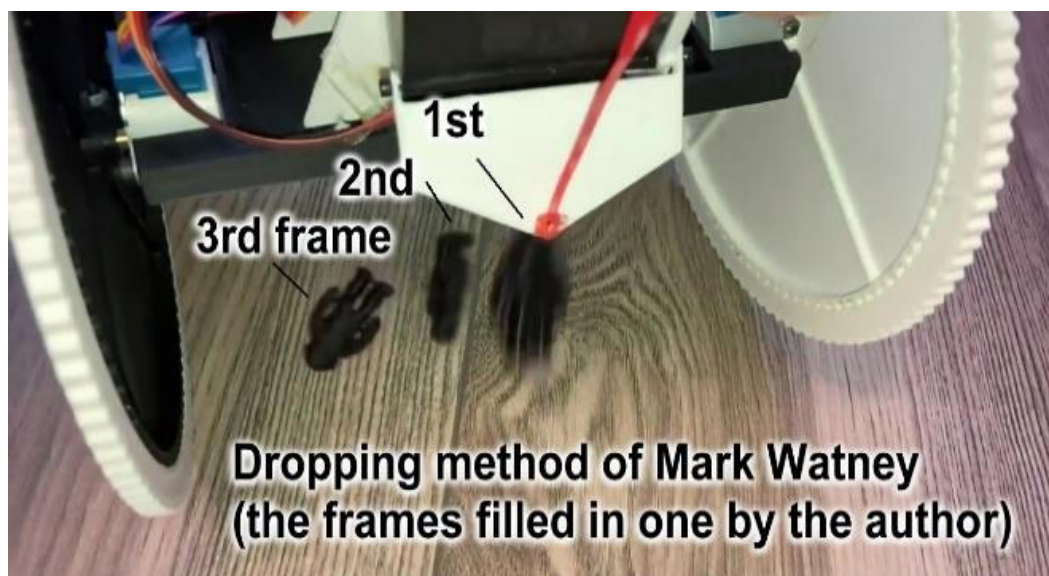


μ-troll csoport: Az „év győztese”

A csapat tagjait a Mars Mining Corporation (MMC) ösztönözte és tanította – amely a később nemzetközi sikereket elért Rescube csapat és vállalkozás [9][17]. A μ-troll csoport 2015-ben indult és attól kezdve az első öt helyezett között vannak.



Felhasznált eszközeik Arduino CNC-Shield panel, TowerPro sg90 szervomotor 180 fokos elforgatással és ZIPPY Flightmax 1500mAh lítium -ion akkumulátorok a valóban hosszú távú stabil mozgatáshoz. Lásd a filmet. [13]



Sikeres versenyzők utóélete

A Magyarok a Marson verseny sikeres versenyzőit az évek során nemzetközi fórumokon is folyamatosan bemutattuk, egy összefoglalót 2020-ban adtunk a Lunar and Planetary Science Conference-en [9]

VAC 2008 – Masat-1, Smog-P: A 2008 -as év nyertesei 2007 -ben indultak először. Ők a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem (BME HVT) BME Szélessávú Hírközlés és Villamosságtan Tanszékéről érkeztek. Tagjai a majdani első magyar műhold, a Masat-1 nevű csoportjának adjunktus vezetője és diákjai voltak, akik később a C3S Electronics Development LLC vezető tisztségviselői lettek. A vállalat hardver és szoftver fejlesztéssel foglalkozik, beágyazott rendszereket készít és kis műholdalkatrészek kialakítását, valamint a küldetések végrehajtásának tervezését végzi. A C3S 2015-ben bekapcsolódott a PLATO 2.0 exobolygó vadász missziójának fejlesztésébe. 2017-ben a C3S csatlakozott a SMILE küldetéshez (röntgen távcső). 2016-ban megkezdődött a magyar RADCUBE műhold fejlesztése annak érdekében, hogy valós időben nyomon lehessen követni az űr időjárását és a kozmikus sugárzást, mely magyar-angol-lengyel közös fejlesztésben valósult meg, együttműködve az Európai Űrügynökséggel (ESA) 2021.08.17-én állt pályára. [14]

A BME HVT új diákokkal elért közelmúltbeli sikerei a SMOG-P és az ATL-1 valamint a SMOG-1. A SMOG-P mikro műhold a földi műsorszórás keltette elektroszmogot figyelte meg sikerrel. A Smog-ok a világ legkisebb működő műholdjai, a SMOG-1 ionizáló dózismérő rendszert is tartalmaz. [15]

Team RGATE – MTA Tudományos Roadshow: A csoport 2010-ben indult középiskolásként, és éveken keresztül jól szerepelt a versenyen. Évekig megőrizték az összes rovert jó, működőképes állapotban, és vállalták, hogy részt vesznek a Magyar Tudományos Akadémia (MTA) diákoknak a Színes fizika Roadshow néven tartott bemutatóin országszerte és külföldön egyaránt.



Hunveyor csoport: A magyar UNiversity surVEYOR projekt. A NASA 1966 és 1968 között a Holdon leszállt Surveyor űrszondáinak egyszerű kialakítása egy diák kísérleti űrszonda modell elkészítésére adott inspirációt, mely az ELTE űrszonda-robotika diákprogramja 1997 óta. 2008-ban csatlakoztak, majd viszonzásul meghívták a nyerteseket, akik részt vehettek több egyetemi rendezvényen, hogy népszerűsítsék a versenyt. [16]

Mars Mining Corporation - Rescue: A csoport 2006 -ban indult, nyert és 2010 -ben ismét, valamint az évek során többször is az első három helyen végeztek. Egy nemzetközi verseny, a Rescue League az 1995 -ös kobei földrengés után született meg a kinti szervezők fejében, és azóta a Robocup egyik legösszetettebb versenye lett. [17]. A Rescue csapata olyan vállalkozásként nyerte el a Nemzetközi Atomenergia Ügynökség IAEA szervezetének megbízását, amely az atomerőművekben telepíthető víz alatti mentőrobot rendszer létrehozására irányult.

Igen Agyafűrt Úszó MiniTank: A 2009-es év felnőtt nyertesei, a csapat tagja az Energiatudományi Kutatóközpont fejlesztéseiben, illetve a Remred Kft. alkalmazottjaként vesz részt az űrkutatásban és űrtvékenységben. [18]

Konklúzió:

Az elmúlt időszak a „mentési kötelezettség” időszaka volt. Kötelesség megmenteni bármely bajba kerültet - itt Mark Watneyt -, és kötelesség volt megmenteni magát a Magyarok a Marson versenyt is, hogy a pándémia korlátozásai ellenére működőképes legyen. A verseny koncepciója tehetséges fiatalok, azaz diákok, hallgatók, mérnökök megtalálása, inspirálása, elindítása valamint természetesen az, hogy támogassa őket. A cél az, hogy kiváló mérnökök, szervezők és befektetők legyenek az űrkutatás és a kapcsolódó tudományok területein. Nekünk, szervezőknek biztosítanunk kell ezt a lehetőséget olyan nehéz körülmények esetén is, mint egy világjárvány. Különös tekintettel a nyertes és sikeres csapatoknak a való életben betöltött szerepére, melyet 2020-ban bemutathattunk az LPSC-n is. [9] Ez a lista azóta kiegészült a 2009-es nyertessel, aki hazai űrtechnológiával foglalkozó Kft-ben - kutatói környezetben - mérnöki tevékenységet végez.

Irodalom

- [1] SIPOS, A., VIZI, PG: LPSC40 #2519; <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2009/pdf/2519.pdf> ;
- [2] SIPOS, VIZI: LPSC41 #2649; <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2010/pdf/2649.pdf>
- [3] SIPOS, VIZI: LPSC42 #2014; <http://www.lpi.usra.edu/meetings/lpsc2011/pdf/2014.pdf>
- [4] SIPOS, VIZI: LPSC 46 #2602 <http://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2015/eposter/2602.pdf>
- [5] SIPOS, VIZI: LPSC 47 #2098 <http://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2016/eposter/2098.pdf>
- [6] SIPOS, VIZI: LPSC 48 #2250 <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2017/pdf/2250.pdf>
- [7] SIPOS, VIZI: LPSC 49 #2191 <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2018/pdf/2191.pdf>
- [8] SIPOS, VIZI: LPSC 50 #2095 <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2019/pdf/2095.pdf>
- [9] SIPOS, VIZI: LPSC 51 #1924 <https://www.hou.usra.edu/meetings/lpsc2020/pdf/1924.pdf>
- [10] Vizi P.G., Sipos A. : Simulated Mars Rover Model Competition - More than a decade as a research area (2017) H-SPACE2017 p48; http://www.eit.bme.hu/sites/default/files/booklets/h-space-2017/HSPACE_2017final_beliv_02061.pdf
- [11] KissBé csapat: (kis b) (2020) <https://youtu.be/AJb45PRINVY>
- [12] Squad DeltA2: (2020) <https://youtu.be/S9O-61KHj8o>
- [13] µ-troll csoport: (2020) <https://youtu.be/ivxhrDbrKaw>
- [14] C3S <https://www.c3s.hu/about/>
- [15] BME HVT SMOG <https://gnd.bme.hu/smog>
- [16] Hunveyor <http://mii.ttk.pte.hu/iatt/hunveyor>
- [17] MMC and Rescue https://robocup-rescue.github.io/team_description_papers/2016/RoboCup_2016_RescueR_TDP_RescueCube.pdf
- [18] MÚF2021 - Remred Kft https://www.mant.hu/fileupload/MUF2021_eloadasok_osszefoglaloj.pdf

ELF-viharok ég fölött és föld alatt

**Bór József ¹, Szabóné André Karolina ¹, Novák Attila ¹, Bozóki Tamás ^{1,2},
Steinbach Péter ^{3,4}, Lempenger István ¹**

¹ Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet (ELKH FI), Sopron

² Környezettudományi Doktori Iskola, Szegedi Tudományegyetem, Szeged

³ Geofizikai és Űrtudományi Tanszék, Eötvös Loránd Tudományegyetem, Budapest

⁴ Geológiai, Geofizikai és Űrtudományi Kutatócsoport, ELKH-ELTE

A Föld-ionoszféra elektromágneses hullámvezető (FIH) határoló felületei nem tökéletes elektromos vezetők, így várható, hogy intenzív villámkisülések extrém alacsony frekvenciatarományban (ELF, 3 Hz - 3 kHz) terjedő elektromágneses (EM) jelei észlelhetők a FIH határain kívül is mind a világűrben, mind a Föld felszíne alatt. Tanulmányunkban ilyen esetekre vonatkozó megfigyeléseket és eredményeket mutatunk be, amelyek olyan tranziens, ELF sávban észlelt eseményekkel, "ELF-viharokkal" kapcsolatban születtek, ahol a szerzők forrásként villámkisüléseket gyanítottak, illetve azonosítottak. A Föld felszíne alatt észlelt ELF-viharok esetében a Mátában folytatott saját mérésekből levezetett eredményekről számolunk be, amelyek szerint a mérési hely környékén az ELF hullámok skin mélysége a földkéregben 7-21 Hz között kb. 1500-900 m körüli.

Bevezetés

ELF-viharon ebben a közleményben ELF sávban észlelhető EM hullámcsomagok jeleit értjük. A szakirodalomban ezek ELF tranziensként, illetve az intenzív villámkisülések közben keletkező típusok ELF sferic [1, 9. fejezet] illetve Q-burst és N-burst [2] (Q/N-vihar) néven is ismeretesek. Ez utóbbi jelek csillapítása a FIH-ben alacsony, 0.2-0.7 dB/1000 km 50 Hz alatt [3], így akár többszöri körbefutásuk is észlelhető a Föld körül [4]. Az alsó (<60 km) légkörreghoz képest jó, de nem tökéletes elektromos vezetőknek tekinthető bolygónk felszíne [5] és az alsó ionoszféra [6, 1.2. fejezet]. Így várható, hogy a skin effektusnak köszönhetően [7, chapter 8.1] a villámoktól származó ELF-viharokat valamilyen formában észlelhetjük a FIH határain túl is a világűrben illetve a föld mélyében, azaz "ég fölött" és föld alatt is.

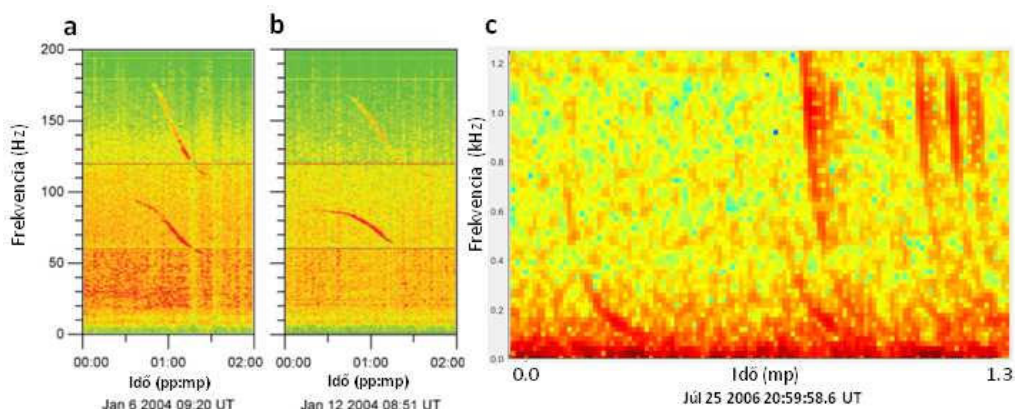
Általában a FIH-ben keletkező és terjedő ELF EM hullámokat, konkrétan az általuk gerjesztett Schumann-rezonancia (SR) spektrális mintázatot már megfigyelték a világűrben [8, 9, 10]. A több ezer km távolságra terjedő és a tengerek, óceánok felszíne alá behatoló ELF és nagyon alacsony frekvenciás (VLF, 3-30 kHz) mesterséges rádióhullámokat pedig tengeralttjárókkal való kommunikációra használják haditengerészeti rendszerek [11, 12, 13, 14].

A következőkben egyedi, intenzív villámkisülésekkel összefüggésbe hozott, ELF sávba eső EM hullámok FIH-n kívüli észleléseire mutatunk be példákat, hangsúlyozva a föld alatti észlelések esetében a saját vizsgálataink eredményét.

"ELF whistlerek" észlelése földi állomásokon

Az EM hullámok plazmaszférában történő terjedésének bizonyítékai a whistlerek. Ezek a hagyományosan VLF sávban, földi állomásokon észlelt jelek a villámkisülések EM impulzusának VLF komponensei, amelyek a hullámvezetőből kilépve a plazmaszféra diszperzív közegében terjedés után újra a FIH-ba hatolva jellegzetes, időben csökkenő frekvenciájú jelként észlelhetők [15]. Az ELF sávban is hasonló mintázatú, ELF whistlerként hivatkozott jeleket figyeltek meg úgy alacsony, mint magas szélességeken földi állomásokon (1a-b. ábra) [16, 17,

18, 19]. E jelek sajátosan hosszú idejűek (15 másodperc - pár perc, jellemzően 1-2 perc), korlátozott frekvenciasávban észlelhetők (20-200 Hz, de jellemzően 50-60 Hz fölöttiek 90 Hz-es középfrekvenciával), főként nappal fordulnak elő és gyakrabban szeptember-októberben, nagyobb részben nyugodt AP index értékek mellett, intenzív szubviharok ($K_p > 4$) ideje alatt pedig nem [16]. Megjelenésük az ionoszféra állapotának megváltozásához köthető [20]. Wang és munkatársai a World-Wide Lightning Location Network (WWLLN) villámaival való összevetés alapján nem zárták ki, hogy a Tajvan közelében észlelt ELF whistlerek forrásai villámok [21], azonban a hosszú időtartamot és a korlátozott frekvenciátartalmat is magyarázó, nagyobb ionsűrűségű ionoszférikus plazmába való be és kilépés, illetve az ebben való, alacsony fázissebességű terjedés mechanizmusa nem tisztázott. Az ilyen típusú észleléseknél felmerült, hogy a források a mágneses lepelben keletkező és a poláris tölcséreknél becsatornázódó, 120 Hz körüli ELF hullámok („oroszlánbömbölés”, lion roar) is lehetnek [17].



1. ábra. Világűrben is terjedő ELF jelek. a) és b): Antarktiszon észlelt ELF whistler-szerű jelek [19], 1. ábrája alapján; c) DEMETER műhold észlelése Németország fölött.

ELF whistlerek észlelése a világűrben

A villámok ELF jeleinek jelenlétére a világűrben egyértelmű bizonyítékot az egyidejű műholdas és földi észlelések szolgáltatnak. Az ionoszférában rakétakísérletekkel kb. 150 km-es magasságig ezzel a módszerrel korábban kétséget kizáróan igazolták a várakozásokat [22]. A villámkísülésekhez köthető jelek a kvázi-statisztikus (DC) elektromos térben mindössze 10-20 ms időtartamúak voltak.

A DEMETER műhold Közép-Európa fölötti elhaladása során több olyan töredék whistlert is azonosítottak, amelyek keltővillámaikat egyértelműen azonosítani lehetett [23]. A műhold által észlelt, diszperziót szenvedett jelek az ELF tartományban is megjelennek (1c. ábra). Ugyancsak e műhold 2007-es, elektromos térkomponens-méréseiben azonosítottak optikai megfigyelésekkel igazoltan vörös lidércek megjelenését is kiváltó intenzív (> 100 kA-es csúcsáramú) villámok [24] által keltett, VLF és ELF sávban is megjelenő töredék whistlereket [25]. A kb. 700 km-es magasságban, 100 Hz alatt is jól észlelhető események időtartama néhány tízedmásodperc volt. A Van Allen műholdakon, 4000 km magasságban, 2013-ban mért elektromos tér adatokban is találtak olyan ELF whistler jeleket, amelyek forráskísüléseit a WWLLN adatbázisban azonosították [26]. Ezekben a jelekben az alacsonyfrekvenciás komponensek csak párszáz Hz fölött voltak észlelhetők, azonban időtartamuk néhány másodpercet is kitett.

ELF whistlereket kb. 450 km magasságban a mágneses térkomponensekben regisztráltak SWARM műholdak [27]. Ezek a jelek még 20 Hz alatt is egyértelműen megfigyelhetők, időtartamuk ezen a magasságon kb. másodpercnyi. A jeleket keltő

forrásvillámok helyét ebben a projektben a WERA ELF észlelőhálózat [28] adatainak a felhasználásával határozták meg. Megjegyezzük, hogy ezek az észlelések mind a plazmaszféra éjszakai régiójában történtek.

Skin effektus az ELF sávban a szárazföld alatt

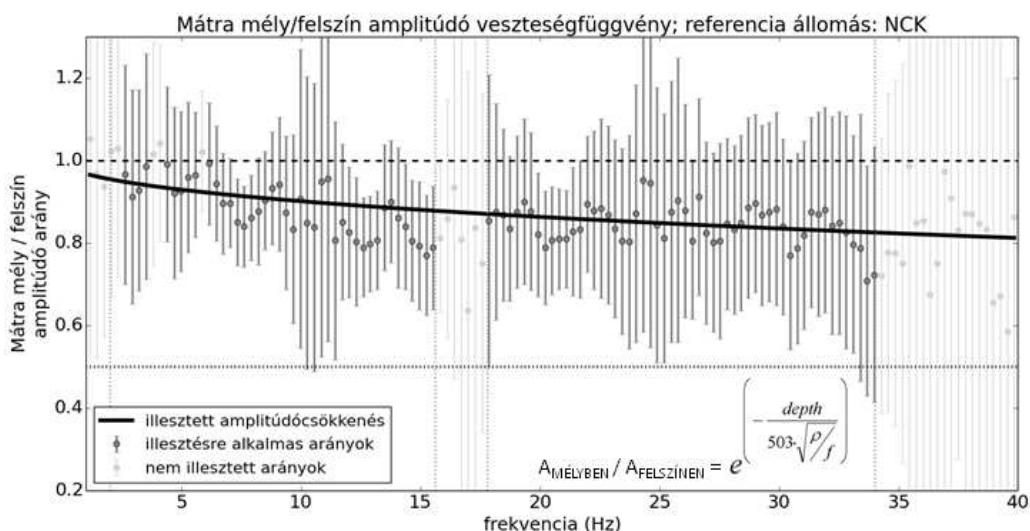
Az ELF jelek földfelszín alatti hatásaira alapul pl. az audio-magnetotellurikus módszer [29], amellyel a földkéreg felső rétegének a vezetőképességét lehet meghatározni. ELF jelek föld mélyében való közvetlen észlelésével kapcsolatban kevés tanulmány található [30]. Az utóbbi időben megnőtt az érdeklődés a jelenség iránt, mivel a villámok globálisan koherens ELF jelei zavarhatják a gravitációshullám-észleléseket a földfelszín alatt. A következőkben ismertetett vizsgálatokat egy újgenerációs gravitációshullám-detektor, az Einstein-teleszkóp [31] egy lehetséges megvalósítási helyének széleskörű geofizikai feltérképezése motiválta.

A kiszemelt helyszín a Mátrában található, ahol a föld alatti vizsgálatok a Mátrai Gravitációs és Geofizikai Laboratóriumban folytak, 140 m mélyen [32]. A mágneses tér horizontális komponenseit ott és felette a felszínen is 3-3 napon keresztül regisztrálta egy indukciós szondapár, hogy a földkéreg ELF hullámokra gyakorolt frekvenciafüggő hatását vizsgálni lehessen. A mintavételi frekvencia 4 kHz volt. A mélybeli és a felszíni mérések más napokon folytak, így a jelek összehasonlításához a Széchenyi István Geofizikai Observatóriumban (NCK) folyamatosan működő SR mérőállomás adatait is felhasználtuk referenciaként [Bór et al., 2016]. Itt az átviteli tartomány 2-34 Hz, így ebben a frekvenciasávban volt lehetséges a vizsgálat. Az alkalmazott módszer lényege, hogy az ugyanakkor mért jelek spektrumai közötti átviteli függvényeket meghatározzuk a referencia állomás, illetve a mátrai föld alatti / földfelszíni mérések viszonylatában. A Mátrában a mélyben és a felszínen mérhető jelek amplitúdóinak arányát ezután megkaphatjuk a két átviteli függvény hányadosaként a frekvencia függvényében.

Az elemzés amplitúdók arányainak meghatározásán alapul, így különösen fontos volt, hogy bizonyosan ugyanabból a forrásból származó jeleket hasonlítsunk össze, és minél kevesebb zaj torzítsa az eredményeket. Mivel passzív méréseket folytattunk, nagy jel/zaj arányú természetes jelekre volt szükségünk és így is statisztikai megközelítést kellett alkalmazni, ami számos esemény vizsgálatát kívánta meg. Ezeknek a feltételeknek kiválóan megfelelnek a Közép- és Dél-Afrikában bekövetkező távoli, de nagy intenzitású villámok által keltett Q-viharok, amelyek a Mátrában és NCK állomáson is gyakorlatilag ugyanolyan jel alakban és egyidejűleg jelennek meg.

Ilyen forrásvillámokat kerestünk hát első körben NCK állomás adatsoraiban, ahol a mágneses mérések mellett a koherens vertikális elektromos (Ez) térkomponensbeli jelek megjelenését is vizsgálni tudtuk a valódi Q-vihar események azonosításakor. Az Ez adatoknak köszönhetően a téves eseményészlelések száma csökkent, és a forrás irányát is meg tudtuk határozni [33]. Az észlelési idő mellett ennek az információnak az alapján azonosítottuk azokat forrásvillámokat a WWLLN hálózat eseménystájában, amelyek jeleit a vizsgálatban felhasználtuk. Összesen 294 db eseményt tudtunk azonosítani a mátrai felszíni mérési időszakban, illetve 410 db eseményt a felszín alatti mérések idején.

A mélyben és a felszínen mért amplitúdók csökkenését a frekvencia függvényében a 2. ábra mutatja. A pontokra jól illeszkedik a skin effektust leíró formula, amely alapján a mélybeli mérési hely feletti közettest és talajréteg összesített átlagos fajlagos ellenállására $71.4 \pm 5.9 \Omega\text{m}$ adódott. Ez jól illeszkedik a területen elvégzett független magnetotellurikus mérések eredményeihez, amelyek a földkéreg felső 365 m vastag rétegére $141 \Omega\text{m}$ -es értéket szolgáltatnak. A kapott fajlagos ellenállás alapján az első három SR frekvencián (7.8 Hz, 14.1 Hz, 20.0 Hz) a skin mélység rendre 1470 m, 1100 m, and 920 m, ami szerint viszonylag nagyobb mélységekben is észlelhetők lehetnek úgy a SR-ák, mint a Q-viharok.



2. ábra. ELF jelek amplitúdóvesztés-spektruma a Mátrában 2 és 34 Hz között. A hibásávok az értékek bizonytalanságával arányosak. 16.6 Hz közelében az adatokat az NCK állomáson alkalmazott lyukszűrő miatt zártuk ki az illesztésből. Az elméleti amplitúdóvesztés-függvényben a fajlagos ellenállás (ρ) értékét illesztettük mélység ($depth$) = 140 m paraméterezéssel az alkalmas pontokra a frekvencia (f) függvényében.

Összefoglalás

A bemutatott eredmények demonstrálják, hogy a FIH nem zárt az intenzív villámkisülések ELF sávú jelei számára, amelyek így észlelhetők a FIH-n kívül nagyobb távolságra a világűrben és a földfelszín alatt is. A bemutatott példák között az események időtartama és a jellemzően eltérő nappal/éjszakai észlelhetőségi időszak is arra utal, hogy a földfelszíni állomásokon észlelt whistler-szerű ELF-viharok forrásai nem a villámkisülések. Az ELF-viharok a whistler észleléseknél az alsó, a magnetotellurikus észlelések esetén a felső határánál helyezkednek el az elemzett frekvenciasávnak, sőt mutatnak túl a szokásos vizsgálati tartományokon. Megfigyelésükkel és vizsgálatukkal így e bevett módszerek által vizsgálható jelenségek köre szélesíthető.

Köszönetnyilvánítás

A kutatás a Nemzeti Kutatási, Fejlesztési és Innovációs Hivatal OTKA K-115836, OTKA K-124508 és K-124366 sz. pályázati támogatásaival valósult meg.

Irodalomjegyzék

- [1] Stuchly, M. A (1999)., Modern Radio Science 1999, IEEE, 99, 171-189
- [2] Ogawa T., Tanaka Y., Miura. T. et al. (1966), J. Geomag. Geoelectr. 18: 443-54.
- [3] Chapman F.W., Llanwyn Jones D., Todd J.D.W. et al (1966), Radio Science, 1(11), 1273-1282
- [4] Nickolaenko A.P., Hayakawa M., Hobara Y. (2010), Surv. in Geophys., 31(4), 409-425
- [5] Kulak A., Mlynarczyk J. (2013), IEEE Transact. on Antennas and Prop., 61(4), 2269-2275
- [6] Nickolaenko A., Hayakawa M. (2014), Schumann resonance for Tyros. Tokyo: Springer Japan

- [7] Jackson J.D. (1998), Classical Electrodynamics 3rd Edition, New York: John Wiley & Sons.
- [8] Dudkin D., Pilipenko V., Korepanov V. et al. (2014), J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 117, 81-87
- [9] Simões F., Pfaff R., Freudenreich H. (2011), Geophys. Res. Lett., 38(22), L22101
- [10] Surkov V.V. (2016), J. of Phys.: Conf. Series, 675, 032008
- [11] Callahan M.B. (1981), IEEE Communications Magazine, 19(6), 16-25.
- [12] Price C. (2016), Atmosphere, 7(9), 116
- [13] Rowe H.E. (1974), IEEE Transact. on Comm., 22(4), 371-385
- [14] Wait, J.R. (1977), IEEE J. of Oceanic Engineering, 2(2), 161-172
- [15] Koroncay D., Lichtenberger J., Clilverd M.A. et al. (2019), J. Geophys. Res. Space Phys., 124, 5082-5096
- [16] Heacock R.R. (1974), Geophys. Res. Lett., 1: 77-79
- [17] Sentman D.D., Ehrling D.A. (1994), J. Geophys. Res., 99(A2), 2183-2190
- [18] Wang Y.-C., Wang K., Su H.-T. et al. (2005), Geophys. Res. Lett., 32, L08102
- [19] Kim H., Lessard M.R., LaBelle J. et al. (2006), Geophys. Res. Lett., 33, L06109
- [20] Fritz B.A., Heavisides J., Young M.A. et al., (2018), J. Geophys. Res. Space Phys., 123, 3955-3964
- [21] Wang K., Wang Y.-C., Su H.-T. et al. (2011), J. Geophys. Res., 116, A09323
- [22] Kelley M.C., Siefring C.L., Pfaff R.F. et al (1985), J. Geophys. Res., 90(A10), 9815-9823
- [23] Steinbach P., Lichtenberger J., Ferencz Cs. et al. (2007), Geophys. Res. Abstracts, 9, 10036
- [24] Boccippio D.J., Williams E.R., Heckman, S.J. et al. (1995), Science, 269(5227), 1088-1091
- [25] Blecki J., Parrot M., Wronowski, R. (2009), Ann. Geophys., 27, 2599-2605
- [26] Ripoll J.-F., Farges T., Malaspina D.M. et al. (2021), Nat Commun 12, 3553
- [27] Coisson P., Truhlik V., Mlynarczyk J. et al. (2021), EGU General Assembly 2021, EGU21-12740
- [28] WERA Project 2016, <http://www.oa.uj.edu.pl/elf/index/projects3.htm>, (utoljára letöltve: 2021.júl.10.)
- [29] Strangway D.W., Swift Jr. C.M., Holmer R.C. (1973), Geophysics, 38:6, 1159-1175
- [30] Waysand G., Marfaing J., Pozzo di Borgo E. et al. (2011), Comptes Rendus Phys., 12(2), 192-202
- [31] Penturo M. (2018), ET Letter of Intent. <http://www.et-gw.eu/index.php/letter-of-intent> (utoljára letöltve: 2021.aug.13.)
- [32] Ván P., Barnaföldi G.G., Bulik T. et al (2019), The Europ. Phys. J. Spec. Topics, 228, 1693-1743
- [33] Bór J., Ludván B., Attila N. et al (2016), J. Geophys. Res. Atmos., 121, 5601-5619

Geotechnikai paraméterek elemzése a holdi regolit fúrásos mintavételéhez

Novák Roland ^{1,2}

¹ ELTE, Csillagászati Tanszék, csillagász MSc;

² Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet, CSFK

Mivel a Hold a közelmúltban újra az űrmissziók érdeklődésének központjába került, a jövőben több olyan küldetést is terveznek, amelyek keretében belül leszállóegységekkel vizsgálnák a felszínt. A leszállóhelyek kiválasztásának igen fontos ismerni a környék viszonyait, illetve a helyszíni mintavétel esetleges előnyeit. A közelgő Luna-27 misszió kapcsán vizsgáltam a potenciális leszállóhelyek geotechnikai paramétereit, ezáltal lehetőséget adva az alaposabb megismerésükre. Munkám központi eleme az OMAT paraméter, amely hasznos segítség a felszín megismerésére, ha csupán távérzékelési módszerek állnak rendelkezésünkre.

Bevezetés, cél

A Luna-27 [1,2] egy 2025-re tervezett, közös ESA-Roscosmos űrszondás projekt, amely leszállóegységként fog tevékenykedni a holdi Déli-Pólus Aitken-medence térségében, a déli poláris kráterek valamelyikében. Elsődleges feladata a holdi regolit, illetve a térségben lévő vízjég helyszíni elemzése.

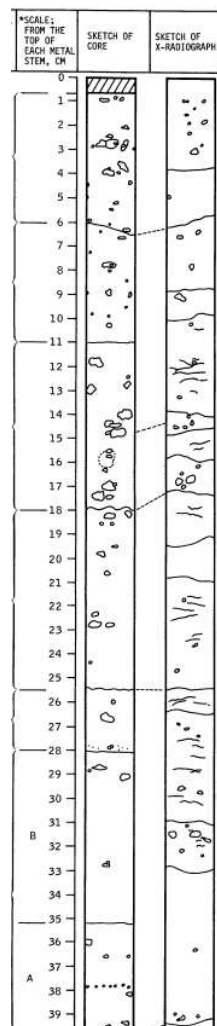


1. ábra: A Luna-27 a Holdon (grafika)
Forrás: Roscosmos

A holdi felszín egységesen az úgynevezett regolit borítja. Ez a laza, nagyrészt heterogén „talaj”, a Hold elmúlt 4,6 milliárd éves élettartama alatt folyamatosan keletkezett, a szüntelen mikro- és makrobezapódások, valamint besugárzások és hőmérsékletváltozások által folyamatosan módosítva.

A NASA Apollo programja során több alkalommal is sikerült fúrásos mintát venni a holdi felszínből, aminek az elemzése során fény derült a holdtalaj különböző rétegeinek eltérő szemcseméret, összetétel és szerkezeti tulajdonságaira. A mélységtől függően ezek a jellemzők erősen változhatnak, és eltérhetnek az őket megelőző vagy követő rétegtől. Ezek alapján a regolit fejlődéstörténetét, az egyes rétegek keletkezési jellemzőit a függőleges mintavétel révén részben becsülni, közelíteni lehet.

2. ábra: Az Apollo 15 által végzett fúrás fúrómagja. Sok helyen láthatóak a rétegek közötti eltérések, illetve a különböző szemcseméretű régiók. [3]



Fontosabb geotechnikai paraméterek

Paraméter	Leírás
<i>A regolit szemcsék morfológiája</i>	Erősen függ az adott szemcse korától, érettségétől (<i>maturity</i>), az idősődéssel az egyes szemcsék felszíne egyre simább lesz, alakjuk a lekerekített alaktól az egészen extrém módon szögletesig változhat.
<i>Szemcseméret eloszlás</i>	A szemcsék elégtelen keveredése jellemző (főleg a földi, laza, üledékes talajokhoz képest). A szemcseméretet az összetapadás növeli, a mikrometeorit becsapódások tördelő hatása csökkenti.
<i>Sűrűség</i>	Vizsgálható egyes szemcsékre, vagy pedig alkotóinak együttes térfogatsűrűségére is. Utóbbi (főként Apollo fűrómagok alapján), a mélységgel meredeken nő.
<i>Porozitás</i>	Függ az egyes szemcsék közötti távolságtól, illetve magukban a szemcsékben található üregektől is. Releváns paraméter a kráterszélek és kráterek közötti tér jellemzése esetén is, mivel jelentős eltéréseket mutathat a két régió esetében.

Az OMAT paraméter

A regolit fűrés szempontjából fontos mechanikai jellemzőit nehéz távérzékeléses módszerrel becsülni. Az egyik ilyen célra használható paraméter az OMAT (**O**ptical **M**aturity) eredetileg Lucey et al. [4] munkája, amit a Clementine szonda adataiból határoztak meg, és a holdi felszín érettségének megállapítására, illetve a felszín különböző részeinek összehasonlítására szolgál.

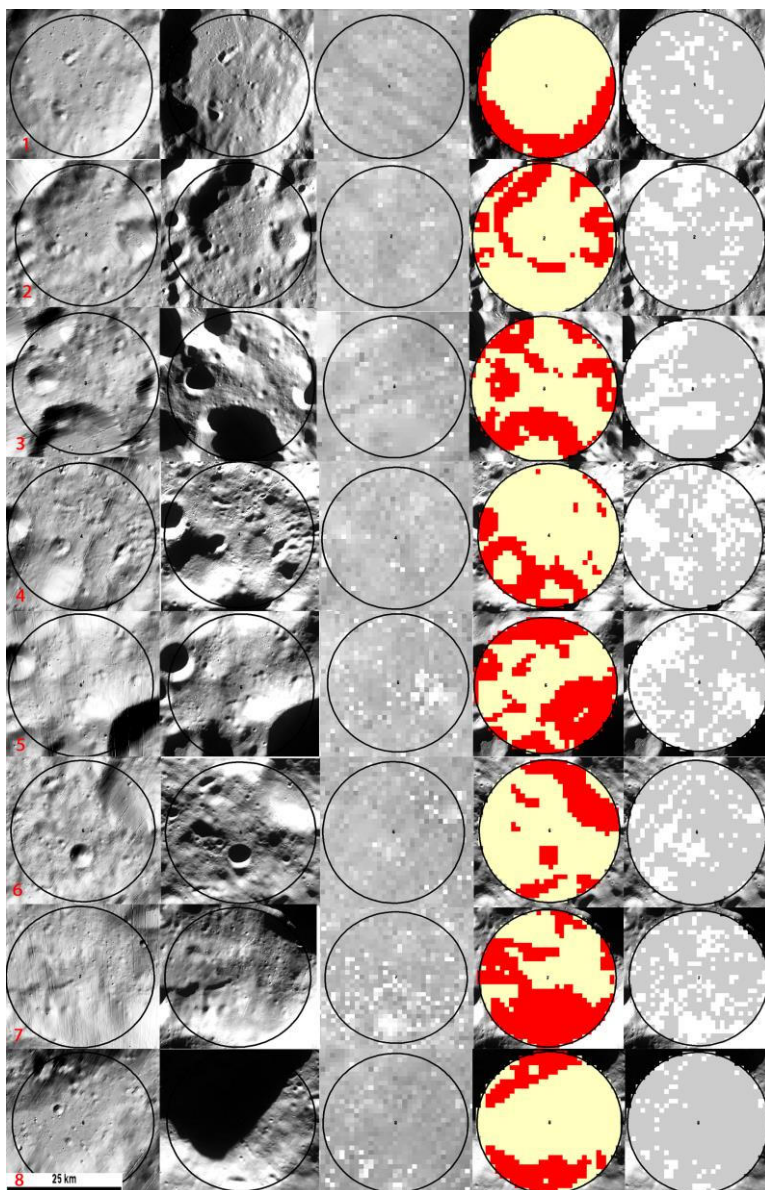
Az OMAT paraméter származtatása a felszín optikai paramétereiből történik, amelyek korrelálnak a felszíni regolit érettségével. A paraméter kiegészítésként is használható a vas-oxid térképezési technika mellé, amely az az érettség és a vastartalom között fent álló kapcsolatra épül, a reflektancia/közeli infra láthatóság arány paraméterein.

$$OMAT = \sqrt{(R_{750} - R_0)^2 + \left(\left(\frac{R_{950}}{R_{750}} \right) - R_1 \right)^2}$$

ahol, R_0 , R_1 konstansok (Clementine adataira lettek optimalizálva alaphól, minden másra (pl. Kaguya szonda adatai), átszámítást igényel), R_{750} a 750 nm-en, R_{950} a 950 nm-en mért reflektancia.

Leszállóhely jelöltek a déli sarkvidéken

Jelenleg 8 leszállóhely-jelölt létezik a Luna-27 esetében, melyek közül az expedíció előkészítő fázisa során, később választják ki a legmegfelelőbbet. MSc diplomamunkám célja, hogy ezen területek geotechnikai paramétereinek felmérésével alaposabban megismerhessük a potenciális leszállóhelyeket, az ott lévő regolit jellemzőit, amelynek legfelső 1 méter vastag rétegét a legkisebb becsapódások és kráterek [5, 6] befolyásolják legerősebben.

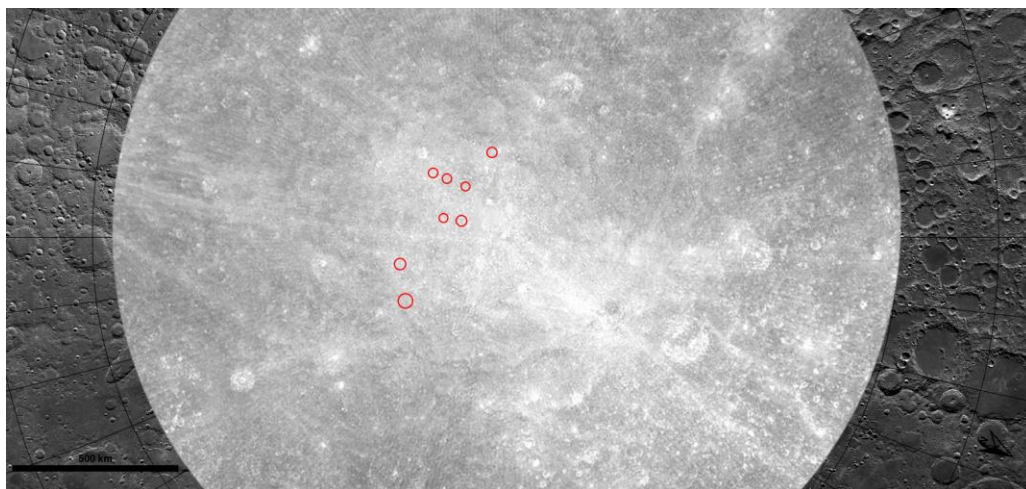


2. ábra: A nyolc leszállóhely jelölt domborzat árnyékolásos képe. Az egyes panelek balról-jobbra: WAC mozaik optikai kép, az OMAT térkép, a magas lejtőszög értékek kiemelve (piros), és a szélsőséges OMAT értékek kiemelve (fehér).

OMAT a felszíni mintavétel támogatására

A fenti mozaik képen látható némi korreláció a leszállóhelyeken a szélsőséges OMAT értékek, és a magas értékű lejtőszögek között, ahol a regolit az ott jellemző intenzívebb pusztulás miatt éretlenebb lehet. Megfigyelhető továbbá a leszállóhelyek pontosabb elemzése során, hogy az apró, fiatal kráterek is magas OMAT értékkel bírnak, hiszen ez fiatal felszínre utal. Némely helyeken a kidobott anyag is fehéren jelenik meg az OMAT térképen.

A további célok közé tartozik az OMAT értékek összekapcsolása az adott terület/ek átlagos szemcseméretével, illetve további felszínt jellemző értékekkel, mint a nano/mikrofázisú vastartalom, vagy a CPR (Circular Polarization Ratio). A **CPR (circular polarization ratio)**: radarmérésekből (pl.: Chandrayaan-1 - Mini-SAR) nyert paraméter, a magas CPR érték vagy fiatal kráterre, vagy felszín alatti jégtartalomra utal. A **nano/mikrofázisú vas gyakorisága**: a japán SELENE/Kaguya misszió során, az SP (Spectral Profiler) által rögzített adatokból a déli pólust is lefedő, spektrális mérések felhasználása a FeO, illetve közvetetten a nanofázisú vas tartalom megállapítása érdekében.



3. ábra: A Hold déli pólusának OMAT térképe, a Luna-27 potenciális leszállóhelyeinek köreivel.

Köszönetnyilvánítás

A kutatómunkát az ESA H82 POLICETECH projektje, valamint a Külgazdasági és Külügyminisztérium támogatta.

Irodalom

- [1] Heather D. et al. 2021. The ESA PROSPECT Payload for Luna 27: Development Status. 50th LPSC? LPI Contribution No. 2548, id.2111.
- [2] Heather D. et al. 2020. The ESA PROSPECT Payload for Luna27: Development Status. EPSC, id. EPSC2020-672.
- [3] Heiken G. et al. 1973. Preliminary stratigraphy of the Apollo 15 drill core – Proceedings of the Fourth Lunar Science Conference, 1. pp. 191-213
- [4] Lucey P. G. et al. 2000. Imaging of lunar surface maturity. JGR 105, 20,377-20,386.
- [5] Kereszturi A., Steinmann V. 2019. Terra-mare comparison of small young craters on the Moon. Icarus 322, 54-68.
- [6] Kereszturi A., Steinmann V., 2017. Characteristics of small young lunar impact craters focusing on current production and degradation on the Moon. Planet. Space Sci. 148, 12-27.

Kárpátalja felszín deformációjának regionális léptékű monitorozása InSAR technológiával

Magyar Bálint ^{1,2}, Horváth Roland ¹

¹ Lechner Nonprofit Kft. - Kozmikus Geodéziai Observatórium, Penc

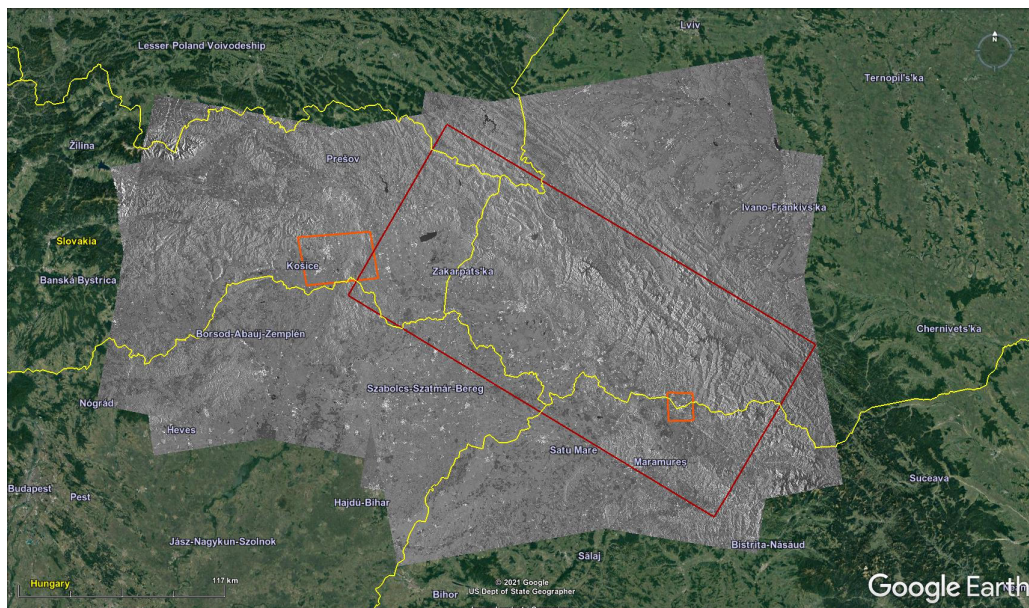
² Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem – Építőmérnöki Kar -Általános-és Felsőgeodéziai Tanszék, Budapest

Az európai szomszédságpolitika megerősítését segítő GEOSSES projekt egyik fő célja a Kárpátalja természeti és emberi tevékenységeinek recens kockázatainak és veszélyeztetettségének átfogó elemzése, amely egy regionális geomonitoringot mint területi vészjelző rendszert is magában foglal. Ennek támogatásaként az apertúraszintézis elve alapján a közös határszakaszokon műholdradar-interferometriai feldolgozást végeztünk, amelynek fókuszában a projektpartnerek által meghatározott, Kassától keletre található (Alsóhutka és Felsőcsáj) aktív tömegmozgásos területi, továbbá Aknaszlatina és Máramarossziget felhagyott bányavidékei találhatók. A projekt és a mintaterületek ismertetését követően bemutatjuk az alkalmazott állandó szórópontú műholdradar interferometria módszertanát, kitérve a feldolgozási folyamat főbb lépéseinek ismertetésére is. Ezt követően bemutatjuk a két mintaterületre levezetett műholdirányú deformációs mezők eredményeit. Ezek közül kiemelendő az Aknaszlatina/Máramarossziget mintaterületen található felhagyott sóbányák okozta recens karsztos deformáció, mely jelentős, ~3 cm/yr műholdirányú deformációs rátájú felszínváltozásokat indikál a kialakult víznyelők közelében. Emellett szintén megemlítendő a Kassa mintaterületől D-DNY-i irányban található Nagyida község és a Kassai Acélművek között elterülő meddőhányók ~1-4 cm/yr deformációs mintáinak azonosítása. Diskusszióink során kitekintünk az előzetes feldolgozási eredményeinek tapasztalataiból a GEOSSES projekt regionális, térben és időben is nagyszálájú műholdradar interferometriás feldolgozására is.

Bevezetés

Az európai szomszédságpolitika (ENI) megerősítését szolgálja a Határon Átnyúló Együttműködési Program (2014-2020), amelyhez Magyarország, Szlovákia, Románia és Ukrajna is csatlakozott a GEOSSES projekten keresztül az Európai Unió támogatásával [1]. A projekt a négy ország kárpátaljai határvidékének (1. ábra) közös kihívásaira fókuszál, melynek alapja egy regionális területi vészjelző rendszer, amely a természeti folyamatok és emberi tevékenységek által bekövetkező kockázatok megelőzését, valamint a katasztrófákra és veszélyhelyzetekre irányuló közös fellépést segíti elő. Az elmúlt évtizedekben az ökológiai katasztrófák aránya ebben a régióban is nőtt, amit az is mutat, hogy a földfelszíni mozgások a viszonylag sűrűn lakott területeken, akár mezőgazdasági, ipari (pl. bányaterületek, meddőhányók) és városi környezetben, természetvédelmi területeken is jelen vannak. Ezek mellett az éghajlatváltozás okozta hirtelen és erős meteorológiai események (pl. havazás, heves esőzés) tömegmozgásos folyamatokat hozhatnak létre (pl. földcsuszamlás, sárfolyás), amely a terület társadalmi és gazdasági veszélyeztetettségét is növeli. A veszélyeztetettség mértéke még nem teljesen ismert, ezért indokolt a recens kockázatok átfogó értékelése, a potenciális felszín deformációk beazonosítása, lokális fókuszterületek felkutatása. Ehhez kapcsolódóan a projekt partnerek által két előzetes mintaterület került meghatározásra, nevezetesen az Aknaszlatina/Máramarossziget és Kassa/Felsőcsáj-Alsóhutka mintaterületek (1. ábra).

Ezen folyamatok megfigyelése és megértése érdekében a műholdas földmegfigyelés egy gyorsan fejlődő technológiáját, az apertúraszintézises műholdradarinterferometriát (InSAR) alkalmazzuk, mely karakterisztikájából adódóan nagy pontossággal, napszak és időjárás-függetlenül képes meghatározni a felszíndeformációk műholdirányú komponensét. Ezekből a felszín (közel)vízszintes-és függőleges irányú elmozdulásai vezethetők le, melyekből meglévő felszíni deformációkat azonosítottunk be, amik alapján nagy pontossággal meghatározhatóak a potenciálisan veszélyeztetett területek mozgásainak sebességei is. A következőkben ismertetjük a kapcsolódó feldolgozási folyamatokat, illetve személtetjük az említett két mintaterület specifikus műholdirányú deformációs eredményeket.



1. ábra: A GeoSES projekt magterülete (piros színnel jelölve) és előre definiált mintaterületei (narancs színnel jelölve). Koregisztrált és geokódolt intenzitás képek, a területet érintő: ASC029 DESC080 és ASC102-DESC153 relatív pályákon.

Módszertan

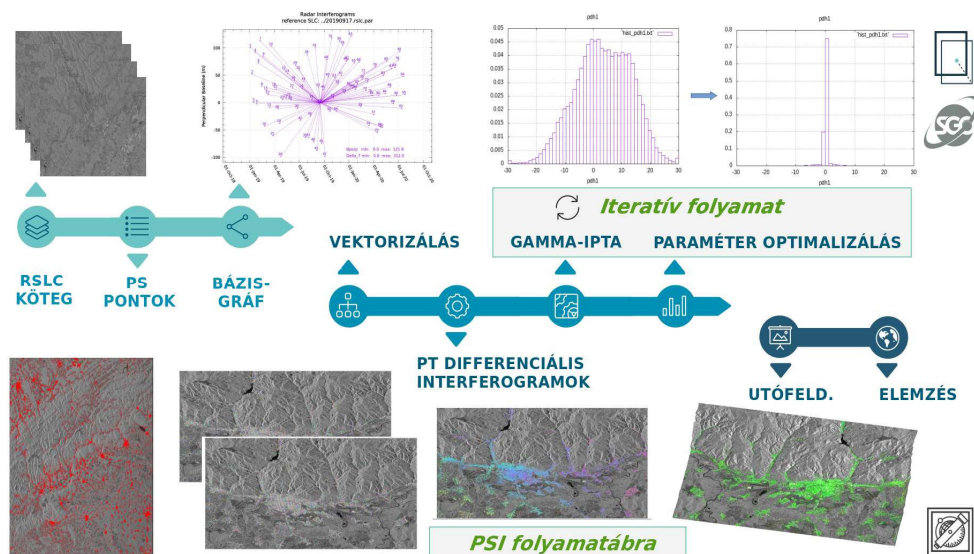
A mintaterületek feldolgozása során az állandó szórópontú műholdradar-interferometria eljárását alkalmaztuk [3]. Ehhez az ESA Copernicus földmegfigyelési programjának a Sentinel-1 műholdcsalád, Sentinel-1A és B (S1AB) műholdjainak vv-polarizáltságú, IW felvételezési módú komplex SAR felvételeit használtuk fel [1] [13]. A projekt magterületét és mintaterületeit a felszálló (Ascending – ASC) A029 és A102, valamint a leszálló irányú (Descending – DESC) D080 és D153-as relatív S1AB pályák fedik le. A 2019-2020-as előzetes feldolgozás időszakára a rendelkezésre álló SAR felvételeket az Alaska Satellite Facility-n [1] keresztül értük el, a kapcsolódó precíz pályaadatokat pedig a Sentinel-1 Quality Control-on keresztül [7] [8].

A feldolgozási folyamat első fázisaként, az ismertetett relatív pályákra koregisztrált adattömböket kellett előállítanunk. Ehhez először a SAR adatokat kalibráltuk, majd zajszűrést alkalmaztunk rajtuk. A TOPS- formátumú [13] SAR térbeli referencia felvétel mozaikolását követően elvégeztük az ún. geokódolást [4], ami lehetővé teszi a SAR koordinátarendszer (RDC

– Radar-Doppler-Crs) és a választott földrajzi koordinátarendszer közötti transzformációt. Ezt követően a rendelkezésre álló, RDC-transzformált közel 30 m-es felbontású SRTM DEM [9] segítségével elvégeztük az egy tér- és időbeli referenciájú koregisztrációt [4] [6] [12] [13] [14]. Az így előállt felvételtöveget kompenzáltuk az esetleges nagyskálájú, azimuth irányú fázisugrásokra; majd ezt követően felvételenként mozaikoltuk és felülmintavételeztük a koregisztrált felvételtöveget.

Ezen koregisztrált felvétel kötegen (2. ábra – RSLC köteg) végeztük el a feldolgozási folyamat második fázisát, nevezetesen az állandó szórópontú műholdradar interferometrikus analízist (PSInSAR) [3] [11] [12]. Ennek során potenciálisan állandó szórópontokat határoztunk meg a felvételek spektrális tulajdonságai és időbeli változékonyságai alapján [3] [11] [12], majd a felvételeket ezekben a pontokban mintavételeztük, vektorizáltuk. Ezt követően térben és időben fix referencia felvételhez képest vezetünk le differenciális interferogramokat, illetve végeztük el a kapcsolódó fáziskitömörítési feladatokat az MCF algoritmussal [10]. Az így levezetett fáziskitömörített differenciális interferogramokat a GAMMA IPTA eljárásával elemeztük [11] [12]. Ennek során meghatároztuk a magasságfüggő fázist és az atmoszferikus fázist is magában foglaló nagyskálájú fázistagot, és azokat iteratív módon kompenzáltuk, valamint lineáris deformációs modellel közelítettük a deformációs fázistagot.

Végül, de nem utolsósorban a fentebb ismertetett fázistagokra kompenzált kitömörített differenciális fázisból levezettük az adott relatív pályára jellemző műholdirányú (LOS) elmozdulásokat, illetve elvégeztük a kapcsolódó utófeldolgozási lépéseket. Az ismertetett feldolgozási folyamatot a GAMMA Remote Sensing Software környezetében [11] [12] valósítottuk meg, melyet a 2. ábra illusztrál.

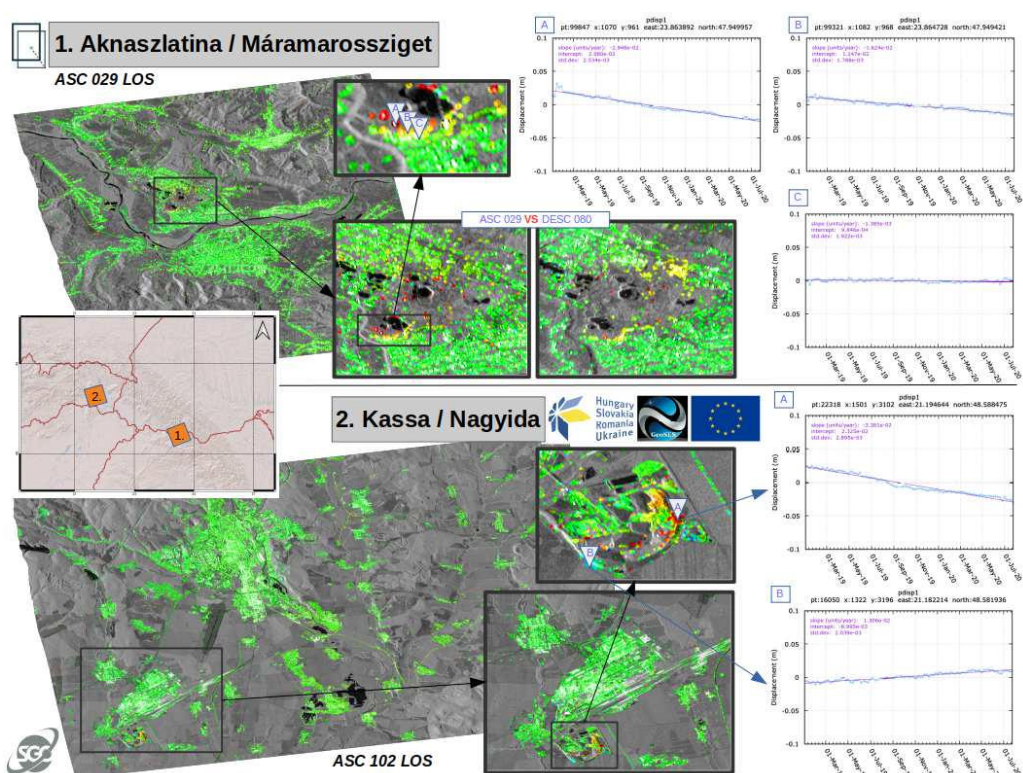


2. ábra: Az alkalmazott PSI feldolgozási folyamat egyszerűsített vázlata.

Eredmények

A korábban bemutatott mintaterületekre (1. ábra), a 2. ábra alapján levezetett műholdirányú deformációkat a 3. ábra szemlélteti. A 3. ábra felső panelje az Aknaszlatina/Máramarossziget mintaterületet illusztrálja. A levezetett műholdirányú elmozdulások recens deformációs mintát mutatnak az Aknaszlatinai sóbánya területén. A kiemelt deformációs idősorok (1/A-B-C) szemléletesen illusztrálják a karsztüreges és víznyelők okozta felszínváltozásokat: a beszakadt víznyelők közvetlen környezetében 1-3 cm/yr deformációs ráta azonosítható, mely a beszakadt víznyelőktől távolodva belesimul a >1mm/yr, stabilnak értelmezhető zónákba.

A 3. ábra alsó panelje a Kassa – Nagyida mintaterület műholdirányú deformációs mezőjét szemlélteti. Az eredmények közül kiemelendő a Kassától D-DNY irányban, Nagyida község és a Kassai Acélművek mellett elhelyezkedő meddőhányók jelentős, 1-4 cm/yr műholdirányú elmozdulása ASC és DESC irányokban. Ezen minták potenciálisan tömegmozgásos deformációkra utalhatnak a friss meddőhányók területén, illetve a meddőhányók szélső részein.



3. Ábra: A bemutatott mintaterületek (ASC) műholdirányú elmozdulásai. Felül, az Aknaszlatina/Máramarossziget mintaterület látható, kiemelve az Aknaszlatinai karsztformációhoz köthető elmozdulásokat. Alul, a Kassai mintaterületnek, a Nagyida mellett detektált deformációi kerültek kiemelésre.

A fenti ábrán ismertetett előzetes, 2019-2020-as időszakra végzett állandó szórópontú műholdradar interferometriával készült analízis számos további, döntően a feldolgozási módszertanhoz, illetve folyamathoz kapcsolódó fejlesztést, fejlesztési irányt eredményezett. Ezen tapasztalatok beépítésre kerültek a projekt magterületét teljesen fedő, 2014-2021-es feldolgozási folyamatokba.

Diszkusszió

A fentebb említett fejlesztési irányok közül kiemelendő egy olyan hibrid koregisztrációs folyamat implementálása [12] amely csökkenti a temporális dekorrelációt úgy, hogy kihasználja az egyszeres tér- és időbeli referencia felvétel előnyeit (nem terjed tovább az esetleges koregisztrációs hiba) valamint az időben változó, ideiglenes referenciájú koregisztrációs eljárás előnyeit is [12] [14]. Továbbá fontos tapasztalat, hogy az elméleti várakozásoknak megfelelően, tisztán csak az állandó szórópontok módszere nem nyújt megfelelő szórópont sűrűséget a vegetációval és/vagy alacsony interferometrikus koherenciájú területek felett, ezzel szemben azonban az épített környezetet nagy pontsűrűséggel reprezentálja [3] [5] [11] [12]. Emiatt a projekt partnerek által előre definiált in-situ pontokban nem minden esetben sikerült állandó szórópontot azonosítani (pl. Alsóhutka és Felsőcsáj környékének tömegmozgásos deformációi), így újabb technikák bevonása válik szükségessé [5]. A bemutatott, előzetes 2019-2020-as időszakra a mintaterületekre elvégzett állandó szórópontú műholdradar interferometriás elemzés szerves részét képezi a projekt magterületét is érintő spatio-temporális nagyskálájú analízisnek, és nagyban hozzájárult annak megvalósításához.

Irodalom

- [1] Alaska Satellite Facility DAAC: <https://asf.alaska.edu/data-sets/sar-data-sets/sentinel-1/>
- [2] Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem – Építőmérnöki Kar -Általános-és Felsőgeodéziai Tanszék https://geod.bme.hu/geod/geoses_projekt
- [3] Ferretti A, Prati C and Rocca F (2001) “Permanent scatterers in SAR interferometry,” IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, vol. 39, no. 1, pp. 8–20, Jan. 2001
- [4] Frey O, Santoro M, Werner CL, Wegmüller U (2012) DEM-based SAR pixel-area estimation for enhanced geocoding refinement and radiometric normalization, IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, V10, pp:48-52, doi: 10.1109/LGRS.2012.2192093
- [5] Pepe A., Calò F. (2017), A Review of Interferometric Synthetic Aperture RADAR (InSAR) Multi-Track Approaches for the Retrieval of Earth's Surface Displacements. Applied Sciences.; 7(12):1264. <https://doi.org/10.3390/app7121264>
- [6] Scheiber R, Moreira A (2000) Coregistration of Interferometric SAR Images Using Spectral Diversity. IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing, Vol. 38, No. 5: 2179-2191
- [7] Sentinels POD Product Handbook [S1POD] (2020) ESA, available at <https://sentinel.esa.int/documents/247904/3372484/Sentinels-POD-Product-Handbook.pdf>
- [8] Sentinel-1 Product Specification [S1PRD] ESA, available at: <https://sentinel.esa.int/web/sentinel/technical-guides/sentinel-1-sar/products-algorithms>
- [9] Shuttle Radar Topography Mission 1 Arc-Second Global (SRTM) DOI: number: /10.5066/F7PR7TFT
- [10] Werner C, Wegmüller U, Strozzi T (2002) Processing strategies for phase unwrapping for INSAR applications, Proceedings, EUSAR Conference, Cologne, Germany, June, 2002
- [11] Werner C, Wegmüller U, Strozzi T and Wiesmann A (2003). “Interferometric point target analysis for deformation mapping”. Proceedings of IGARSS 2003, 4362-4364.

- [12] Wegmüller U et al (2016) Sentinel-1 Support in the GAMMA Software, *Procedia Computer Science*. 100, pp. 1305–1312. doi: 10.1016/j.procs.2016.09.246
- [13] Yague-Martinez N, Prats-Iraola R, Gonzalez FR, Brcic R, Shau R, Geudtner D, Eineder M, Bamler R (2016) Interferometric Processing of Sentinel-1 TOPS Data. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 54 (4):2220-2234, doi: 10.1109/TGRS.2015.2497902
- [14] Xu B et al (2020) Kinematic Coregistration of Sentinel-1 TOPSAR Images Based on Sequential Least Squares Adjustment. In *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 13, pp. 3083-3093, 2020, doi: 10.1109/JSTARS.2020.3000043.

A Naprendszer különböző bolygóinak környezetében észlelt SLAMS események összehasonlító vizsgálata

Bebesi Zsófia, Erdős Géza, Juhász Antal

Wigner Fizikai Kutatóközpont

Rövid, nagy amplitúdójú mágneses struktúrákat (Short Large Amplitude Magnetic Structures; SLAMS) már a Naprendszer legtöbb bolygójának kvázi-párhuzamos fejhulláma előtti (foreshock) tartományában megfigyeltek már. A földi foreshock-ban több évtizede tanulmányozhatók, valamint a Cluster II űrmisszió négy űrszondája térbeli kiterjedésük vizsgálatát is lehetővé tette. A SLAMS-hez társuló ULF hullámtevékenység szorosan összefügg a jelenséggel, mivel a mágneses struktúrák ezeknek a hullámoknak a meredekké válása révén jönnek létre. Az ULF hullámokat a fejhullámról visszaszóró napszél-ionoknak a beérkező napszéllel való kölcsönhatása során keletkező instabilitások hozzák létre. A hullámok először az upstream irányban terjednek, majd a napszél hatására visszakonvektálnak a fejhullám felé, ahol meredekké válnak, és létrejönnek a SLAM struktúrák. Ezek végül beépülnek a kvázi-párhuzamos fejhullámba, így hozzájárulnak annak folyamatos fenntartásához.

A elmúlt évtizedek folyamán számos más bolygónknál is megfigyelték már a foreshock-ban zajló ULF hullámtevékenységet, és esetenként SLAMS észlelésekre is sor került. Általánosságban a SLAMS események fizikai tulajdonságai megegyeznek a földi észlelésekével, azonban a napszél paramétereinek a Naptávolságtól függő változásai miatt a keltő ULF hullámok frekvenciája (mely korrelál a SLAM struktúrák kiterjedésével) bolygónként eltér. A cikkben áttekintjük a SLAMS események kialakulásához vezető folyamatokat, valamint konkrét esettanulmányokat is bemutatunk. Végül megvizsgáljuk a napszél Naptávolságtól függő fizikai paramétereinek a SLAMS méretekalkálakra gyakorolt hatását.

Bevezetés

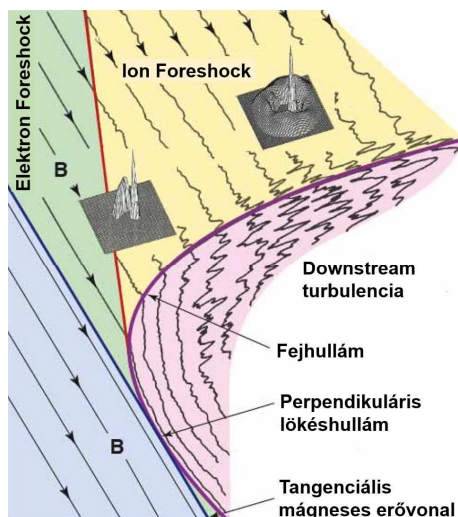
A bolygóknak a napszél-plazma áramlása felőli oldalán létrejövő lökeshullám (vagy fejhullám) előterében intenzív részecske-hullám kölcsönhatások zajlanak. A lökeshullám környezetéből a napszél részecskéinek egy része a Nap irányába visszaverődik, de mozgásukra hatással van a napszél $\mathbf{ExB}$ driftje is. A visszaáramló ionok és a napszél kölcsönhatása számos plazma instabilitást gerjeszt (például ion-nyaláb instabilitást), melyek hullámkeltéshez vezetnek. A kvázi-parallel lökeshullám előterében létrejövő nem-lineáris, kompresszív ULF (Ultra Low Frequency) hullámok meredekké válása során keletkeznek a vizsgált mágneses struktúrák (Short Large Amplitude Magnetic Structures; SLAMS) [1][2][3][4].

A SLAM struktúrák lokálisan gyors módusú lökeshullámként viselkednek, ezért megfigyelhettük a környezetükből visszaverődő ionnyalábokat, a plazmaáramlás lassulását, valamint plazmafűtést, illetve számos esetben észleltünk whistler prekursor hullámokat is. Ezek a sajátosságok összhangban vannak a Föld közelében vizsgált SLAM struktúrák fizikai jellemzőivel, azonban térbeli kiterjedésük (a keltő ULF hullámok frekvenciájával arányosan) a például a Szaturnusznál lényegesen nagyobb. Ennek magyarázata a napszél fizikai paramétereinek a Naptól való nagyobb távolság miatti változásaiban rejlik. A SLAM struktúrák lineáris kiterjedése az észlelések időtartamából a napszél sebességének ismeretében megbecsülhető, mivel az űrszondák sebessége a plazmaáramláshoz viszonyítva rendkívül kicsi. A Föld környezetében észlelt SLAMS események csak néhány másodpercig tartanak (~100-1000 km-es lineáris kiterjedésnek felel meg), míg a Szaturnusznál átlagosan 1-2 perc hosszúságúak (~30,000-50,000 km). A SLAM struktúrák fontos szerepet játszanak a kvázi-parallel lökeshullámfront folyamatos fenntartásában.

A földi megfigyelések mellett a szakirodalomban találhatunk már hasonló jelenségekről szóló beszámolókat például a Vénusz [5], a Mars [6] (csak ULF hullámtevékenység), a Szaturnusz [7] és a Jupiter [8] esetében is. Először áttekintjük az ULF hullámok, valamint a belőlük kifejlődő SLAM struktúrák elméleti hátterét, és észlelési sajátosságait, majd (a teljesség igénye nélkül) sorra vesszük az egyes bolygóknál észlelt ULF (és ahol detektálták, SLAMS) észlelések legalapvetőbb jellemzőit.

A foreshock tartományában zajló fizikai folyamatok

A bolygók fejhullámának előterében (azaz a napszél áramlása felőli, "upstream" oldalon) húzódik a foreshock tartománya. Az interplanetáris mágneses tér az ívelt fejhullámot más-más szögben metszi (1. ábra), és attól függően, hogy a fejhullám normálisa milyen szöget (θ_{Bn}) zár be az interplanetáris térrel, beszélhetünk kvázi-párhuzamos (vagy kvázi-parallel $0^\circ < \theta_{Bn} < 45^\circ$), vagy kvázi-merőleges (vagy kvázi-perpendikuláris $45^\circ < \theta_{Bn} < 90^\circ$) lökeshullám-tartományokról. A kvázi-parallel fejhullám közvetlen összeköttetésben van az upstream mágneses erővonalakkal, amelyek mentén a fejhullámról visszavert ionok giromozgást végezve visszaáramlanak a foreshock tartományba. A foreshock-ot az interplanetáris mágneses térnek az az erővonala jelöli ki, amely érintőként (tangenciálisan) csatlakozik a fejhullámhoz. Azonban a visszaszórt töltött részecskék ettől a határvonaltól a foreshock-ban csak valamivel beljebb észlelhetők, mivel az **ExB** drift hatására a fejhullám felé térülnek el. A foreshock határait (külön-külön az elektronokra és az ionokra) a legnagyobb energiájú elsőkő részecskék jelölik ki az upstream térségben (az ion-foreshock tartomány az elektron foreshock-nál kisebb kiterjedésű).



1. ábra. A foreshock szerkezete, és a benne zajló részecske-hullám kölcsönhatások. (Forrás: [9])

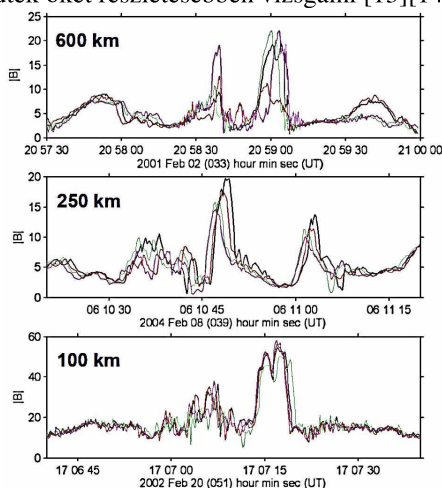
Az ULF hullámok mellett hasonló frekvenciatartományban léteznek a foreshock-ban másfajta hullámok is, melyeket gyűrű, gyűrűnyaláb, illetve diffúz ion-eloszlások is lérehozhatnak [10]. Ahogy az upstream irányban terjedő hullámok egyre mélyebbre hatolnak a foreshock-b, áthaladnak olyan térrészekben is, amelyekben a diffúz ionok sűrűsége megnő. Ezekben régiókban a közeg törésmutatója is megváltozik, melynek hatására a transzverzális módus kompresszív lesz, így a hullámok meredekké válhatnak. Az ULF hullámok előzetesen az upstream irány felé terjednek, de a napszél által visszakonvektálnak a fejhullámhoz. Ennek során a lokálisan a már meredekké vált SLAM struktúrák hozzávetőlegesen a környező plazma sebességével mozognak, egészen addig, amíg el nem érik a fejhullám tartományát, ahol beépülnek a lökeshullámfrontba ("lökeshullám reformáció"). A kvázi-párhuzamos

lökéshullámfront akár SLAMS események sorozataként is felfogható, melyet erősen turbulens mágneses tér és jelentős sűrűségingadozások jellemeznek.

Az eredeti definíció szerint egy monolitikus mágneses struktúra abban az esetben minősül SLAMS-nek, ha hozzá társul a mágneses térerősség amplitúdója a háttér mágneses térnek legalább a kétszerese [12]. Megfigyelési szempontból a SLAMS a mágneses térben ugrásszerű változásoként jelenik meg, belső struktúrája pedig a lokális ion-girosugár nagyságrendjében változik (a Földnél ~100-150 km). A struktúrák az áramló plazmában gyors módusú lökéshullámokként viselkednek, ahol a mágneses tér változásai korrelálnak a plazma sűrűségének váltoásaival. Környezetükből ionnyalábok verődnek vissza, megfigyelhető a plazmaáramlás lelassulása, plazmafűtés, valamint számos esetben észleltek whistler prekursor hullámokat, mely a meredekké váló SLAMS vezető oldalán keltődik [11]. Ugyancsak jellemző a mágneses tér erőteljes forgása.

ULF és SLAMS észlelések az egyes bolygókánál

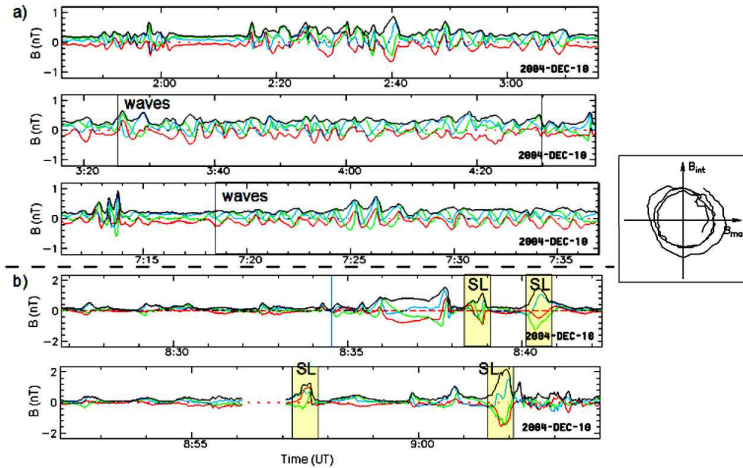
A földi foreshock tartományban már sokszor megfigyeltek SLAMS eseményeket, és elsősorban a Cluster II űrszondákkal (4 egyforma szonda, tetraéder formációban repülnek, változó szeparációval) kezdték őket részletesebben vizsgálni [13][14][15][16].



2. ábra. SLAMS észlelés a földi foreshock-ban a Cluster II űrszondák által, különböző szonda-szeparációk esetén [12].

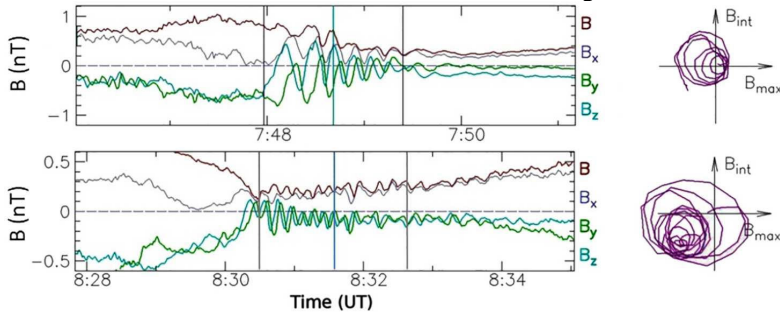
A 2. ábrán a Cluster II szondák panelenként ugyanazt, de 3 különböző SLAMS eseményt észlelték. Látható, hogy minél nagyobb a térbeli szeparációjuk, annál részletesebben fel tudták térképezni a SLAMS belső szerkezetét, azonban ezekben az esetben a struktúra mozgásának irányát nehéz meghatározni. Kis szeparáció esetén (például 100 km) a profilokban csak kismértékű eltéréseket figyelhetünk meg, de meghatározható a terjedési irány és a sebesség.

SLAM struktúrákat a Szaturnuszánál csak az közelmúltban lehetett részletesebben tanulmányozni [7]. A Cassini fedélzeti Magnetométerének és Plazma Spektrométerének (CAPS) adatait felhasználva számos SLAMS eseményt észleltünk, elsősorban a 2004-től 2005 végéig terjedő időszakban, amikor az űrszonda többször is áthaladt a kvázi-párhuzamos fejhullámon. Azonban a Cassini űrszonda egyedüli szondaként nem képes a SLAMS térbeli eloszlását, valódi kiterjedését, és a mozgását vizsgálni.



3. ábra. ULF hullámok és a meredekké válás stádiumában lévő SLAM struktúrák a Szaturnusz foreshock tartományában [7]. A hodogram a 07:30-07:33 UTC közötti intervallumra vonatkozik.

2004 december 10-én a Cassini űrszonda az upstream tartományban, a fejhullám irányában haladt, a bolygótól $\sim 37 R_S$ távolságban (ahol $R_S = 60268$ km, a Szaturnusz egyenlítői sugara). A 3. ábrán látható, ahogy a bolygó felé közeledve először ULF hullámokat észleltünk ($\sim 03:00$ UTC-től kezdődően), majd fokozatosan megjelentek a meredekké válás különböző stádiumában lévő SLAMS események is (sárgával jelölve). Az ULF hullámok frekvenciája $\sim 10^{-2}$ Hz körül ingadozott. A beillesztett hodogram a 07:30 és 07:33 UTC között mért adatokból lett meghatározva, mely jól mutatja, a mágneses tér folyamatos forgásban volt. Az upstream hullámok hullámhossza azonos a SLAM struktúrákéival, ami megfelel a földi észleléseknek.



4. ábra. A SLAM struktúrák vezető oldalán keltődő whistler prekursor hullámok a Szaturnusz foreshock-ban, 2005. február 11-én [7].

Több alkalommal megfigyeltük a SLAMS eseményekhez társuló whistler prekursor hullámokat is, melyek közül a 4. ábrán két, 2005. február 11-én észlelt példát mutatunk be. A hodogramokon látható, hogy változó amplitúdójú, cirkulárisan polarizált hullámokat mérünk, azonban a méréseket nem lehet átvizualizálni a plazmához rögzített koordináta-rendszerbe. A szonda rendszerében a forgás az óramutató járásával megegyező irányú volt. A mágneses tér nagysága a whistler észlelésekkor a legtöbb esetben közel nullára csökkent.

A töltött részecske adatokban kimutatható volt az ionoknyaláboknak a SLAMS közelében való eltérése, valamint megfigyeltük a plazma felfűtődését, és az áramlási sebesség csökkenését is. Általánosságban elmondható, hogy a Szaturnusz foreshock-ban észlelt SLAM struktúrák alapvető fizikai jellemzői megfeleltek a Föld közelében megfigyeltetteknek, azonban a térbeli kiterjedése lényegesen nagyobb (30000-50000 km) volt. Ezt az észlelések időtartamából

lehetett megbecsülni, mivel a szonda az áramló plazmához képes stacionáriusnak tekinthető.

A Merkúrnál több esetben is megfigyelték már az ULF hullámtevékenységet. A MESSENGER űrszonda a pályára állítását követően nem sokkal erősen koherens 1 Hz-es frekvenciájú ULF hullámokat észlelt a Merkúr magnetoszférájában [17][18]. A frekvencia a He^+ és a proton lokális ciklotronfrekvenciái között ingadozott. Egy 2,5 éves időszakot felölelő statisztikai vizsgálat [19] során 0,4 és 5 Hz közötti frekvenciatartományba eső hullámokat észleltek, melyek közül 25% esetében a transzverzális komponens dominált, 1-2 Hz-es frekvencián.

A Vénusz foreshock tartományában az első dokumentált SLAMS eseményt 2009. április 11-én figyelték meg a Venus Express űrszonda fedélzeti magnetométerével [5]. Három egymást követő SLAM struktúrát észleltek, melyek a szonda rendszerében balos, elliptikusan polarizált hullámokként jelentek meg. Fizikai jellemzőik tekintetében jól korrelálthatók voltak a földi eseményekkel. A Vénusz foreshock kiterjedését azóta részletesebben is megvizsgálták [20].

A Marsnál mostanáig csak kevés foreshock iont detektáltak, mivel az ion girosugárhoz képest a marsi lökeshullám, és a foreshock tartomány egyaránt elég kis kiterjedésű. Konkrét SLAMS eseményt mostanáig még nem sikerült megfigyelni, de ULF hullámtevékenységet már észleltek a foreshock-ban [6]. A hullámok esetében az ionsűrűség korrelált a mágneses pulzációk fázisával, ami gyorsan módosul. A hullámok maximális frekvenciája $\sim 0,040$ Hz volt, mely sokkal alacsonyabb, mint a lokális proton girofrekvencia ($\sim 0,088$ Hz). A hullámok terjedési iránya a környező mágneses térrel 34° -os szöget zárt be, és észlelték a whistler módust is. A hullámok a szonda rendszerében balos, elliptikus polarizációt mutattak.

A Jupiternél is megfigyeltek nagy amplitúdójú, nem-lineáris mágneses pulzációkat foreshock tartományban [8]. Az erősen kompresszív, elliptikusan polarizált hullámok terjedési iránya a környező mágneses tér irányával nagy szöget zárt be, mely némiképp hasonlít a Giacobini-Zinner [20] üstökösnél észleltekhöz. Frekvenciájuk 10^{-2} Hz körüli volt, és szintén több alkalommal észleltek whistler hullámokat is, melyek terjedési és polarizációs tulajdonságai megfeleltek a Föld közelében megfigyeltnek.

A Naptávolságtól függő napszél paraméterek hatásai a foreshock-ban

A SLAM struktúrák mérete az ion girosugárral skálázódik, mely az interplanetáris mágneses tér nagyságától függ. Ez ugyancsak meghatározza az ULF hullámok frekvenciáját, melyekből a SLAM struktúrák is létrejönnek. Növekvő mágneses térerősség hatására az ULF hullámok frekvenciája növekszik, valamint a frekvencia ugyancsak függ az interplanetáris mágneses tér kúpszögétől (növekvő kúpszöggel arányosan csökken) [22][23].

A Szaturnusz esetében úgy találtuk, hogy a SLAMS események sokkal hosszabb időtartamúak, mint a Földnél észleltek; a Szaturnusznál az interplanetáris tér erőssége körülbelül $1/10$ -e a Földnél mért értéknek. A Föld közelében észlelt SLAM struktúrák térbeli kiterjedése (a 4 Cluster szondával sokkal pontosabban mérhető) a 100-1000 km-es nagyságrendbe tartozik, a Szaturnusznál azonban a becsült kiterjedés (az észlelés időtartamát, és a plazmához képest álló szondát feltételezve) a ~ 30000 - 50000 -es mérettartományba esik.

Mivel a becsült kiterjedés függ a napszél sebességétől is, ezért ezt a Föld és a Szaturnusz esetén kívül a többi égitestre vonatkozóan a jelen cikkben nem alkalmazzuk, mindössze egyszerű távolságfüggő, és mágneses térerősség-függő korrelációt mutatunk be (5. ábra). Az 5. ábra bal oldalán látható grafikon az egyes bolygóknál mért SLAMS események, vagy (például a Marsnál) az ULF hullámok mérési időtartamát/periódusát mutatja. A Naptól távolodva ezeknek az ULF hullámok periódusa növekszik, azaz a SLAMS események ezzel arányos lineáris kiterjedése is megnő.

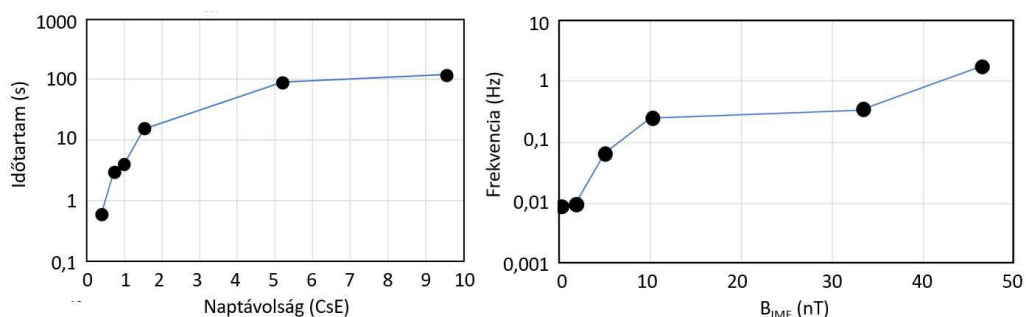


Figure 5. Az egyes bolygók foreshock tartományaiban észlelt SLAMS (vagy ULF) események időtartama (bal oldal) a Naptól való távolság függvényében, valamint az ULF hullámoknak az bolygóknál mért átlagos frekvenciája az interplanetáris mágneses tér nagyságának függvényében (jobb oldal).

Az 5. ábra jobb oldalán pedig az egyes bolygóknál detektált ULF hullámok frekvenciájának az interplanetáris mágneses tértől való függését mutatja, kizárólag a korábbiakban bemutatott esettanulmányok során mért értékeket valamint az adott égitestnél jellemző, átlagos napszél-paramétereket vettük figyelembe. Természetesen ezek csak első közelítésnek tekinthetők, és mindössze a reláció bemutatását szolgálják. Jelenleg egy szélesebb skálájú statisztikai elemzés is folyamatban van.

Irodalom

- [1] Tsoubouchi, K., Lembége, B., (2004), J. Geophys. Res. 109, A02114
- [2] Thomsen, M.F., Gosling, J.T., Bame, S.J. et al., (1990), J. Geophys. Res. 95, 957
- [3] Schwartz, S.J., Burgess, D., Wilkinson, W.P. et al., (1992), J. Geophys. Res. 97
- [4] Le, G., Russell, C.T., (1996), J. Geophys. Res. 101 (A2), 2571–2575.
- [5] Collinson, G.A., Wilson, L.B., Sibeck, D.G. et al., (2012), J. Geophys. Res., VOL. 117, A10221
- [6] Shan, L.C., Ge, Y. S., Du, A.M., (2020), Earth Planet. Phys., 4(1), 45–50
- [7] Bebesi, Z., Erdos, G., Szego, K. et al., (2019), Icarus 333, 306–317
- [8] Tsurutani, B.T., Southwood, D.J., Smith, E.J. et al., (1993), J. Geophys. Res. 98, A12
- [9] Treumann, R.A., Jaroschek, C.H., (2008), Phys. Rev. Lett., 100, 155005
- [10] Eastwood, J.P., Balogh, A., Lucek, E.A. et al., (2003), Ann. Geophys. 21 (7), 1457–1465
- [11] Pantellini, F.G.E., Heron, A., Adam, J.C. et al., (1992), J. Geophys. Res. 97
- [12] Schwartz, S.J., Burgess, D., Wilkinson, W.P. et al., (1992), J. Geophys. Res. 97
- [13] Behlke, R., André, M., Buchert, S.C. et al., Geophys Res. Lett. 30, 1177
- [14] Behlke, R., André, M., Bale, S.D. et al., (2004) Geophys. Res. Lett. 31, L16805
- [15] Lucek, E.T., Horbury, T.S., Dunlop, M.W. et al., (2002), Ann. Geophys. 20
- [16] Lucek, E., Horbury, T.S., Dandouras, I. et al., (2008), J. Geophys. Res. 113 (A7)
- [17] Boardsen, S.A., Anderson, B.J., Acuna, M.H. et al., (2009), Geophys. Res. Lett., 36, L01104.
- [18] Boardsen, S.A., Slavin, J.A., Anderson, B.J. (2009), Geophys. Res., Lett. 36, L18106
- [19] Boardsen, S.A., Slavin, J.A., Anderson, B.J. (2012), J. Geophys. Res., 117, A00M05
- [20] Shan et al., 2017
- [21] Tsurutani, B.T., Smith, E.J., Matsumoto, H. et al., (1990) Geophys. Res. Lett. 17, 757
- [22] Russell, C.T., (2004), Adv. Space Res. 33
- [23] Le, G., Russell, C.T., (1996), J. Geophys. Res. 101 (A2), 2571–2575.

A Comet Interceptor-űrszonda – módszer és technológia az ismeretlen üstökös vizsgálatára

Kereszturi Ákos¹, Gross Péter², Gutay Gergely², Sódor Bálint³, Tróznai Gábor³

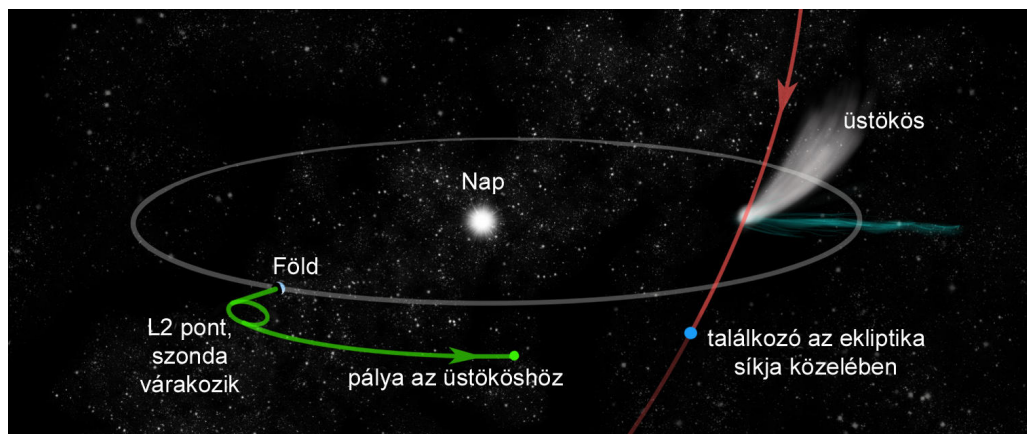
¹ Csillagászati és Földtudomány Kutatóközpont, Konkoly Thege Miklós Csillagászati Intézet

² REMRED Kft., ³ SGF Kft. E-mail: kereszturi.akos@csfk.org

A Comet Interceptor-űrszonda a Napot esőként megközelítő üstököst úgy fog megvizsgálni, hogy még a célpont kiválasztása előtt indítják, majd az űrben vár a megfelelő égitest felfedezésére. A szonda több magyar részegységet is visz magával, többek között a kamera Digitális Feldolgozó (és Adatrögzítő) Egységét, aminek tervezése és készítése itthon történik.

Bevezetés

Az ESA Comet Interceptor űrszondájának feladata egy olyan üstökös meglátogatása, amely az óriásbolygók közötti keletkezését és a távoli üstökösfelhőbe lökődését követően elsőként jön a Nap közelébe. Felszíne jellemzői és összetétele a Naprendszer őanyagáról minden korábbinál érdekesebb új ismereteket adhat. Ilyen égitestet még sosem vizsgált űrszonda, hiszen annak felfedezése után alig egy év lenne a szonda elkészítésére és felbocsátására. Ennek megfelelően a Comet Interceptor startja után az L2 Lagrange-pontban fog várakozni, amíg az LSST távcső fel nem fedez egy kedvező pályán mozgó ilyen üstököst, amit a szonda is elérheti (1. ábra).



1. ábra. A Comet Interceptor vázlatos helyzete és potenciális útvonala [1]

Az F-kategóriájú küldetés maximálisan 150 millió euró költségű (felbocsátást kivéve), az Ariel-űrtávcsővel együtt 2028-ban indul az L2 pontba, ahol ott 2-3 év várakozás után áll tovább végső célpontja felé (2. ábra). Fő nehézségei, hogy a célpont és a találkozó paraméterei még nem ismertek. A randevúra akár 70 km/s találkozási sebesség mellett is sor kerülhet (Giotto szondáéhoz hasonló porpajzs védi az űreszközt), előre ismeretlen pályaelemek mellett [2]. A szonda a várakozással maximum 5 évet tölthet az űrben, ha addig nem akad neki ideális célpont, akkor valamely korábban ismert üstököst látogat meg. De szerencsés esetben a cél égitest egy csillagközi üstökös is lehet, amely éppen áthalad a Naprendszeren.

A megfigyelések a kóma és a mag jellemzőit két helyről is követik: a fő egység és egy japán cubesat végzi a méréseket (eredetileg két cubesat volt betervezve, de anyagi okokból az egyiket törölték).

A fő szonda (A) műszerei:

- CoCa – optikai kamera (~CaSSIS)
- MANIaC – tömegspektrométer (Rosina)
- MIRMIS – infravörös kamera
- Por és mágneses érzékelő (DFP műszercsomag): DISC – porbecsapódás érzékelő, COMPLIMENT – plazma és mágneses mező érzékelő, FGM – magnetométerek, LEES – elektron detektor, SCIENA – ion és semleges részecske detektor

A CoCa kamera részei: CSU (távcső, detektor, szűrők), ELU: elektronikus egységek, szűrő, hőszabályozás), PEU (támogató elektronikus egység).
A kamera jellemzői:

- 135 mm átmérőj, 875 mm fókusz távolság (CaSSIS mintájára)
- 2000x1504 px E2V CMOS detektor, 14 bites adat kódolás
- látómező: 0.69° x 0.92°
- forgó szűrőtárcsa: 475 nm, 670 nm, 775 nm, 900 nm
- expozíciós idő: 220 μ s – 15 perc
- belső memória: 256 Gb (~120 Gb redundancia)
- adattárolás: 'raw' (16bit/px + HK)
- korai nyers képek gyors hazaküldésre

A munka a kamerát készítő University of Bern intézettel és a DLR-el közösen zajlik, a Comet Interceptor projekt további résztvevőivel, tudományos ülésekkel, és heti-kétheti operatív technikai megbeszélésekkel. 2021-ben a cél a Phase B1 elérése.

Köszönetnyilvánítás

A CoCa DPM magyar közreműködést egy PRODEX pályázaton keresztül a Külgazdasági és Külügyminisztérium támogatja.

Irodalom

- [1] Snodgrass, C., Jones, G.H. 2019. The European Space Agency's Comet Interceptor lies in wait. Nat Commun 10, 5418. <https://doi.org/10.1038/s41467-019-13470-1>.
- [2] Sánchez et al. 2021. ESA F-Class Comet Interceptor: Trajectory design to intercept a yet-to-be-discovered comet. Acta Astronautica 188, 265-277.



2. ábra. A Comet Interceptor-űrszonda logója, az eredeti terv alapján még két kísérő cubesat szondával (ESA)

A rendezvény szervezői

Magyar Asztronautikai Társaság

A Magyar Asztronautikai Társaság (MANT) jogelődje 1956-ban alakult. Küldetése azóta is változatlan, legfontosabb célkitűzései az alábbiak: terjeszteni az űrhajózási-űrkutatási ismereteket; egységes magyar szaknyelv kialakítása az asztronautikában; foglalkozni az ifjúsággal, és erősíteni azt az elvet, hogy az űrtan nem csak az űrhajózást jelenti, hanem jelen van mindennapi életünkben: a katasztrófa-előrejelzéstől kezdve a termésbecslésen és a műholdas helymeghatározáson át az orvos- és jogtudományig egyaránt. A MANT az űrkutatás iránt érdeklődő és az űrtevékenységgel aktívan foglalkozó hazai szakembereket tömöríti. A társaság szakmai programok (konferenciák, szemináriumok, találkozók) szervezése mellett minél szélesebb közönséghez szeretne szólítani, a fiataloktól az idősekig egyaránt. Az általános és középiskolás fiatalok számára pályázatokat, programokat, űrtáborokat, a felsőoktatásban tanulók számára ifjúsági szakmai fórumot, szervez, rendszeres kiadványokat jelentet meg.

További információ a Társaságról: www.mant.hu



Energiatudományi Kutatóközpont

Az Energiatudományi Kutatóközpont (EK) mai struktúrájában 2012-ben jött létre az akadémiai kutatóintézetek újra szervezését követően, azonban a kezdetekben egyetlen intézmény volt, amit Központi Fizikai Kutatóintézet néven alapítottak, 1950-ben. Jelenleg három fő terület köré épül a Központban folyó munka, amit az Atomenergia Kutató-, az Energia- és Környezetbiztonsági-, valamint a Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Intézet fog össze. A 2019 óta ismét önálló csoportként működő Űrkutatási Laboratórium jogelődje, az 1970-ben alakult Űrelektronikai Csoport révén egyike azoknak a kutatóhelyeknek, melyek Magyarországon legrégebben foglalkoznak űrkutatással. E hagyományokra is építenek a jelenkori fejlesztések során, aminek kiváló példája a 80-as évek óta alkalmazott Pille dózismérő rendszer, aminek legújabb változata a Nemzetközi Űrállomás szolgálati eszközeként ebben a pillanatban is üzemel. Egyéb feladatai mellett a csoport lehetőséget kapott részt venni a NASA Artemis programjában; az Orion űrhajó első Hold-körüli repülésén a Matroshka AstroRad sugárzási kísérletben (MARE), valamint a Lunar Gateway űrállomás fedélzeti műszer-együttese, az IDA (Internal Dosimetry Array) dózismérő kísérlet alapkonceptiójának kidolgozásában. További információk: www.ek-cer.hu



Energiatudományi
Kutatóközpont

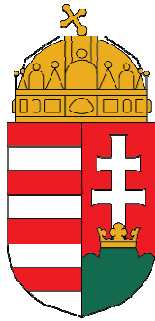
Földfizikai és Űrtudományi Kutatóintézet

Az ELKH soproni székhelyű kutatóhelye az egykori Selmecbányai Akadémia geodéziai és geofizikai utódintézményeiből és a Kövesligethy Radó által 1905-ben alapított Földrengésjelző Intézetből több szervezeti átalakulással jött létre. Feladatai közé tartoznak a geodéziai és geofizikai alapkutatások, melyek célja a Föld-rendszer fizikai állapotának és folyamatainak megfigyelése, modellezése, értelmezése, valamint az ezekhez kapcsolódó elméleti (matematikai, fizikai) és gyakorlati módszerek, vizsgálati eszközök fejlesztése, létrehozása. Mindemellett számos közcélú szolgáltatást végez, mint a Föld körüli térség űreszközökön és folyamatos obszervatóriumi megfigyeléseken alapuló diagnosztikája (űridőjárás), az országos szeizmológiai hálózat és szolgálat fenntartása, a nemzetközi együttműködésekkel fakadó adatszolgáltatás, valamint időszakos megfigyelőrendszerek működtetése. Az intézet alapkutatási tevékenységével összefüggésben részt vállal természeti erőforrások kutatásában, földtani-földfizikai természeti kockázatok elemzésében is. A földfizikai és űrtudományi kutatások keretét öt kutatási szervezeti egység adja (Földmegfigyelés, Geodéziai és Geofizika, Litoszférafizika, Szeizmológia, Űrkutatás és űrtechnológia), de a kutatások tárgyából és módszereiből adódóan az intézeti munkát igen erős projekt és szervezeti szintű nemzetközi beágyazottság jellemzi.

További információk: www.epss.hu



Támogatók



**KÜLGAZDASÁGI ÉS
KÜLÜGYMINISZTERIUM**

REMRED
SPACE TECHNOLOGIES

REMRED Kft.