

Tartalom

TÁVKÖZLÉS ÉS ŰRKUTATÁS (A VENDÉGSZERKESZTŐ BEVEZETŐJE) 1

ÚRÁLLOMÁSOK, MŰHOLDAK

Both Előd

A Nemzetközi Űrállomás 3

Almár Iván

Csúcsforgalom a geostacionárius pályán 8

HULLÁMTERJEDÉSI VIZSGÁLATOK

Bencze Pál

Naptevékenység és a rádióhullámok terjedése 12

Erhardtné Ferencz Orsolya, Ferencz Csaba

Elektromágneses impulzusok terjedésének vizsgálata különböző közegekben 18

Ferencz Csaba, E. Ferencz Orsolya, Hamar Dániel, Lichtenberger János, Steinbach Péter

Az elektromágneses hullámterjedési mérések és modellek szerepe az űrkutatásban 25

ESZKÖZÖK ÉS MÉRÉSEK

Baksa Attila

Űreszközök fedélzeti autonómiájának kialakítása naprendszer távoli objektumainak kutatásához 30

Szalai Sándor, Balázs András

Rosetta Lander központi vezérlő és adatgyűjtő számítógépe 34

Apáthy István

Sugárdózis-mérés égen és földön 37

Takács Bence

GPS mérések abszolút feldolgozását terhelő hibahatások vizsgálata 42

AKTUÁLIS ESEMÉNYEK

Péceli Gábor, Selényi Endre

50 éves a Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék 48

Lajtha György

Nanotechnikai Konferencia Budapesten 54

Címlap: Az űrben már építkeznek... (fotó: NASA)

Főszerkesztő
ZOMBORY LÁSZLÓ

Szerkesztőbizottság
Elnök: LAJTHA GYÖRGY

BARTOLITS ISTVÁN
BOTTKA SÁNDOR
CSAPODI CSABA
DIBUZ SAROLTA

DROZDY GYŐZŐ
GORDOS GÉZA
GÖDÖR ÉVA
HUSZTY GÁBOR

JAMBRIK MIHÁLY
KAZI KÁROLY
MARADI ISTVÁN
MEGYESI CSABA

PAP LÁSZLÓ
SALLAI GYULA
TARNAY KATALIN
TORMÁSI GYÖRGY

Távközlés és űrkutatás

A vendégszerkesztő bevezetője

KÁNTOR CSABA

kantor.csaba@ln.matav.hu

Megtisztelő, egyben örömteli az a feladat számomra, hogy a Híradástechnika májusi, űrkutatással foglalkozó tematikus számának szerkesztője lehetek. A témakör ugyan nem kapcsolódik közvetlenül a folyóirat profiljához, azonban a hazai űrkutatás prominens képviselői által írt cikkek több ponton is érdeklődésre tarthatnak számot. Az űrkutatás egyrésztől önmagában is jelentős mértékben alkalmazza az infokommunikációs technológiákat, másrésztől jó példát ad a hazai kutatás-fejlesztési tevékenység nemzetközi szerepvállalására. A szerkesztésnél célul tűztem ki, hogy a cikkek adjanak áttekintést a hazai űrkutatási tevékenységről, ugyanakkor legyen távközlési vonatkozásuk is.

Az űrkutatásnál alkalmazott technológiák, hasonlóan a hadiiparához, mindig megalapozzák az egyéb szakterületek, így a távközlés fejlődését is. A folyamatban lévő projektek jól előrejelzik azokat a lehetőségeket, melyeket ki lehet használni a távközlés technológia váltásai során. A kiválasztott cikkek aktuális kutatási projektekhez kapcsolódnak, és bár különböző szempontok alapján, de valamilyen módon mindegyik hatással lehet a távközlés fejlődésére. A cikkekhez nem készültek külön bevezetők, az egységes témaválasztás lehetővé tette közös felvezetésüket.

Magyarországon az űrkutatási tevékenységet az IHM által felügyelt Magyar Űrkutatási Szervezet (Magyar Űrkutatási Tanács, Űrkutatási Tudományos Tanács és Magyar Űrkutatási Iroda) jól képzett tapasztalt, nemzetközileg elismert kutatói közösségre támaszkodva irányítja és koordinálja. Céljük, hogy az űrkutatás és fejlesztés új, társadalmilag hasznos eredményei és alkalmazásuk az európai integrációs folyamat során, versenyképességünk megőrzése érdekében megfelelő súllyal épülhessenek be az ország társadalmi-gazdasági életébe. A szerzők ennek a kutató közösségnek tagjai.

A következő évek legnagyobb űrkutatási vállalkozása a *nemzetközi űrállomás* tudományos-műszaki programja lesz. A 45 űrrepüléssel több mint 100 fő daraból a világűrben összeszerelendő kutatóbázis teljes kiépülése után hét űrhajósna adhat otthont. A csaknem 460 tonnás berendezés méretét futballpályáéhoz szokták hasonlítani. A tudományos kutatást hat nyomás alatt álló laboratóriumi modul, valamint több, a szabad világűrbe kihelyezett kísérleti platform fogja szolgálni. Létrehozásában a résztvevő űrügynökségek több

mint százezer alkalmazottja, valamint több száz szerződéses partner cég munkatársai vesznek részt. Az űrállomást folyamatosan építik, a már telepített berendezések üzemelnek.

A magyar kutatók sikere, hogy hazánk is bekapcsolódott az űrállomás programjába. A KFKI Atomenergia Kutató Intézetében kifejlesztett és készített *Pille sugármérő berendezés* első példányát már 2001 márciusában felvitték az amerikaiak az Űrállomásra, ahol egy kísérletsorozat keretében csaknem fél évig használták. A világűrben már többször sikerrel vizsgázott műszer korszerűsített változatával a kabin belsejében és az űrséták során az űrhajósokat érő sugárterhelést kísérték figyelemmel. Ugyanennek a műszernek egy másik példányát az orosz szolgálati rendszer részeként 2003 nyarán vitték fel az űrállomásra. A Pille szolgálatszerű használatára október végétől került sor.

Ugyancsak a magyar űrkutatás jelentős sikere, hogy az ESA egyik kutatási pályázatán elfogadta egy magyar biofizikai kísérlet tervét. Az MTA Biofizikai Kutatólaboratórium munkatársai külföldi partnereikkel együtt biológailag fontos, kristályos anyagokat akarnak elhelyezni az egyik, kabinon kívüli kísérleti csomagban, hogy megfigyeljék a távoli ibolyántúli sugárzás hatását ezen anyagokra.

A távközlés területén évek óta felmerülő kérdés a „természeti erőforrásokkal” (frekvencia, torony telephely, alépítmények) való gazdálkodás. A műholdak felhasználásának kezdetén kevesen gondoltak arra, hogy a világűrben is lesznek „*zsúfolt és kiemelt fontosságú*” *útvonalak, pályák*, amelyek stratégiai és gazdasági fontossága vitathatatlan. Éppen a műholdas távközlés gyorsan növekvő igényei tették a geostacionárius pályát olyan kritikus „útvonallá”, amelyen egyre nehezebb az újonnan érkezőknek üres helyet találniuk, illetve ahol használaton kívüli, lerobbant járművek kezdik akadályozni a folyamatos közlekedést.

Ez a körülmény azért jelent problémát, mert e különleges „természeti erőforrás”, vagyis a geostacionárius pálya nem kimeríthetetlen, hanem nagyon is korlátozott terjedelmű. Más szóval nem lehet rajta végtelen számú holdat elhelyezni, mert zavarnák egymás működését. Alapvető jogi problémává vált, hogy ehhez a természeti erőforráshoz szerezhet-e jogot olyan állam, amely ma még képtelen lenne műholdat felbocsátani, de azt reméli, hogy később erre szüksége lenne (viszont addigra a pálya betelik!).

Az elmúlt év végén tapasztalt erőteljes *naptvékenység* ráirányította a figyelmet a mágneses viharok elektromágneses hullámterjedésre gyakorolt hatására. A rádióhullámok terjedését az ionoszféra befolyásolja. Az ionoszféra a felső légkörnek az a része, ahol elsősorban a Nap elektromágneses sugárzása által előidézett ionizáció következtében a szabad elektronok olyan koncentrációban vannak jelen, hogy a rádiófrekvenciás (elektromágneses) hullámok terjedését is befolyásolják. A napkitörés a Nap elektromágneses sugárzásának a növekedése az extrém-ultraibolya és röntgen tartományban rövid időtartamú, csak mintegy egy óráig tart. Az ionizációt, a szabad elektronok koncentrációját elsősorban a Nap elektromágneses sugárzása, illetve annak hullámhosszúsága és erőssége határozza meg, a naptvékenység változásai az ionoszférában is tükröződnek, így befolyásolják az összeköttetések minőségét.

A *hullámterjedési jelenségek* vizsgálatának a naptvékenységen túl is nagy jelentőségük van az űrkutatásban és az egyes alkalmazásokban. Ezek közül a földi életet és annak biztonságát is érintő területeken: a plazmaszféra kutatásokban, az űridőjárási vizsgálatokban és a szeizmikus kockázatok műholdas előre jelezhetősége kutatásában. Az űrkutatás, a távközlés és számos más kutatási terület fontos részét képezi az elektromágneses impulzusok terjedésének vizsgálata is különböző közegekben. Ez a vizsgálat magában foglalja a tranzienst, bekapcsolási jelenségeket és néhány fontos modell-számítási eredményt is ad.

Az utóbbi években felgyorsult az új technológiák megjelenésének üteme. Az első automata telefon központok még közel fél évszázadik üzemeltek, a mai korszerű eszközök már pár év alatt erkölcsileg elavulnak, és az üzemelő eszközök szoftvereit még rövidebb időközönként fel kell újítani. Ennek tükrében különleges feladat olyan, hosszú távú küldetésen résztvevő űrkutatási eszközök tervezése és előállítás, amelyeknél meg kell oldani, hogy a küldetés teljesítésekor, azaz *évtizedek múlva is rendelkezésre álljon a korábbi technológia*. Meg kell őrizni, nem csak a technológiát, de a feldolgozó rendszerek szoftvereit és minden a kiértékeléshez szükséges eszközt is. Rendelkezésre kell állnia a mai szakértői tudásnak, gondolkodásmódnak is. Mindezek évtizedek múlva korszerűtlennek, avítottak, sőt érthetetlennek tűnhetnek megfelelő konzerválás, folyamatos éln tartás nélkül. Gondoljunk csak arra, vajon hányan tudják ma felhasználni a húsz évvel ezelőtti számítógépen szolgáltatott adatokat.

Három intézet a (a garchingi Max Planck intézet, a helsinki meteorológiai intézet és a budapesti KFKI RMKI) fogott össze a Wirtanen üstököszt meglátogató *Rosetta űrszonda* központi vezérlő és adatgyűjtő rendszerének kifejlesztésére. A finn kutatók vállalták a „nagy” kapacitású tároló fejlesztését és gyártását, a magyar kutatók a fedélzeti számítógép és annak szoftverrendszerének kifejlesztését, míg a német kutatók a számítógép űrminősítéssel rendelkező alkatrészeinek beszerzését és

magának repülő számítógépnek a gyártását. A számítógépek legyártott moduljait a magyar mérnökök mérték be és integrálták rendszerbe. A számítógép feladata az autonóm működés és a kapcsolat a földi berendezésekkel. A kettős feladatkör egy sor bonyolult algoritmust és ugyanakkor nagyfokú flexibilitást biztosító vezérlő szoftver kifejlesztését igényelte.

A naprendszer távoli objektumainak eredményes űrszondás kutatása magas fokú önállóságot követel meg az adott űreszköztől, ami a processzorok fejlődésének köszönhetően szoftver úton valósítható meg. Egy távoli égitest felszínén tevékenykedő űreszköz bonyolult feladatainak sokasága szükségessé teszi egy átfogó vezérlési modell kialakítását, amely megfelelő sebességgel képes kezelni a gyors környezeti eseményeket, mégis rugalmasságot biztosít egy hosszú távú küldetés változó igényei számára. Kidolgozott modellel működő Rosetta űrszonda 2004. március 2-án sikeresen kilépett bolygónk gravitációs teréből.

A technológia szempontjából az energiatartás minimalizálásának és a nagyfokú megbízhatóságnak volt prioritása a rendszer kialakításánál. A fogyasztás azért különösen kritikus mivel az űrszonda a Naptól 3,5 csillagászati egység távolságra találkozik az üstökösrel és így csekély a napelemek által szolgáltatott energia. A fedélzeten ugyan van a Földről vitt telep, de annak energiája feltehetőleg csak három – négy napig tartó működést biztosít a tíz évet meghaladó tárolás után. Hasonlóan az alkalmazott másodlagos, újratölthető akkumulátorok kapacitása is csökken a hosszú utazás során.

A *GPS technikát* a távközlés több területén használják. Ezen a területen a korlátozott hozzáférés (SA) felfüggesztése után új fejezet kezdődött. A Híradástechnika már korábban is foglalkozott az abszolút helymeghatározás pontosságával és azt néhány méterre becsülte. Az utóbbi években a GPS felhasználók száma rohamosan nőtt, ebben egészen biztos szerepe van az SA felfüggesztésének is. 2000 májusa nemcsak a gyakorlati alkalmazások számára, hanem a tudományos kutatók szempontjából is fordulópontnak tekinthető. Korábban a pontosság mesterséges rontásának hatása egy nagyságrenddel nagyobb volt, mint az abszolút méréseket terhelő szabályos hibáké. A SA felfüggesztése után célszerűnek látszik az abszolút helymeghatározást terhelő szabályos és véletlen jellegű hibák hatásának alapos újraértékelése.

Az űrkutatási eredmények számos szakterület, így a távközlés fejlődését is elősegítik. Az eredmények hazai felhasználása növeli az ország versenyképességét. Az eddigi eredmények bizonyítják, hogy szakembereink ezen a területen is megállják helyüket a nemzetközi összehasonlításban.

A Nemzetközi Űrállomás

BOTH ELŐD, a Magyar Űrkutatási Iroda igazgatója

both@hso.hu

Kulcsszavak: *emberes űrrepülés, nemzetközi űrprogramok, mikrogravitáció*

Az emberes űrrepülések első évtizedében, a 60-as években az űrhajók csak rövid időre tették lehetővé az ember számára a világűrben tartózkodást. Mire az űrhajósok szervezete igazán hozzászokott a súlytalanság körülményeihez, hamarosan vissza kellett térniük a Földre. A sikeres kísérleti repülésekkel egyidőben merült fel az igény nagyobb, tágasabb, komfortosabb és az ember hosszabb időtartamú munkavégzését is lehetővé tevő űreszközök, az úgynevezett űrállomások létesítésére.

Az űrkutatás történetének első űrállomását, a Szaljut-1-et az egykori Szovjetunió a 70-es évek elején állította Föld körüli pályára. Ezt a részben katonai, részben polgári célokat szolgáló sorozat további öt tagja követte. Időközben az amerikaiak 1973-74-ben az Apollo program farvizén kifejlesztett Skylab űrállomáson végeztek sikeres kísérleteket. A Szovjetunió 1982-ben állította pályára a Mir űrállomás alapegységét, melyet később Oroszország „örökölt”. Ez volt az első modul rendszerű űrállomás, egy évtizedig tartó teljes kiépítése során az alapegységhez különböző funkciójú kutatóegységeket kapcsoltak. A Mir valóban hosszú időtartamú űrrepüléseket tett lehetővé, volt olyan alapegység, amely egy évnél hosszabb ideig dolgozott a fedélzetén.

Kutatási kapacitására való tekintettel itt kell megemlíteni az amerikai Spacelab és Spacehab űrlaboratóriumokat is, ám ezek a szó szoros értelmében nem tekinthetők űrállomásnak, hiszen csupán az űrrepülőgépek rakodóterében, tehát korlátozott időtartamig használhatóak.

Mindezen űreszközök részletes leírása és repüléseik története túlnőne cikkünk keretein, így erre itt nem térünk ki részletesen. Annyi mindenesetre megállapítható, hogy – ellentétben az űrkutatás számos más területével – az űrállomások alkalmazásában Oroszország a korábbi évtizedekben sokkal több tapasztalatra tett szert, mint az Egyesült Államok.

Amerikai tervek

A Mir pályára állítását követő évben, 1983 áprilisában Ronald Reagan amerikai elnök szakmai tanácsadó testületet kért fel a NASA űrállomás-terveinek véleményezésére. Ennek alapján 1984. januárban az Unió helyzetéről tartott beszédében javasolta, hogy a NASA 8 milliárd dolláros költséggel építsen állandóan lakható, nemzetközi űrállomást. A célkitűzés nyilvánvalóan politikai indíttatású volt, hiszen javában tartott a hidegháború és a vele együtt járó űrverseny, ezért a nyugati országoknak – amerikai vezetéssel – nagyszabású, lát-

ványos akcióval kellett ellensúlyozni a sikerekkel kecsegtető szovjet lépést.

A NASA 1984. január 27-én létrehozta az űrállomás tervezéséért felelős önálló igazgatóságát. 1985-ben az Európai Űrügynökség (ESA), Kanada és Japán csatlakozott a programhoz, anyagilag is részt vállalva a megvalósításban. A következő év elején azonban a Chalenger űrrepülőgép tragikus balesete beárnyékolta az egész amerikai űrprogramot. A NASA-t súlyos vádak érték, a szervezet helyzete megrendült. Az átdolgozott űrállomás-tervek – kezdetben 10,9 milliárd, 1987 elejére 13 milliárd dollárért – azonban segítették a NASA talpra állását. Mindamellett a Nemzeti Kutatási Tanács szakértői 1987-ben a költségeket legalább 24,5 milliárdra becsülték. 1988. július 18-án a leendő űrállomás a hivatali ideje utolsó évét töltő Reagan elnöktől a kezestségben a Freedom (Szabadság) nevet kapta.

1989 nyarán az új elnök, George Bush az amerikai űrkutatás fő céljaként az emberes Mars-expedíciót és a Holdra történő visszatérést jelölte meg. Egyidejűleg csökkentették a NASA teljes költségvetését, ezért az űrállomás-programot is redukálni kellett. Időközben Olaszország tárgyalásokat kezdett a NASA-val, miszerint az ESA-tól függetlenül, közvetlenül is részt vennének az űrállomás létrehozásában.

A kelet-európai politikai változások közepette 1991. július 31-én Bush elnök egyezményt írt alá Gorbacsov szovjet elnökkel a NASA-Mir programról, melynek keretében amerikai űrhajósok a Miren, egy orosz űrhajós pedig az amerikai űrrepülőgépen vesz részt űrutazáson. Egy évvel később Daniel Goldin, a NASA új főigazgatója már azért látogatott Moszkvába, hogy megismerje Oroszország űrprogramját. 1993-ban immár Clinton elnök ismét áttevettette az űrállomást, a költségeket felére kellett csökkenteni. 1993. december 16-án a NASA megegyezett Oroszországgal, hogy az amerikai űrrepülőgépek 10 alkalommal meglátogatják a Mirt. A közös kísérleteket a Nemzetközi Űrállomás orosz közreműködéssel történő megvalósítása első szakaszának tekintették. Mindez a NASA-nak 400 millió dollárba került.

1995 nyarán az USA Számvevőszékének számításai szerint az űrállomás teljes költségvetése a végelszámolásnál 93,9 milliárdra rúg majd, amiből 50,5 milliárdot tesznek ki az űrrepülőgépek repülései. Ugyancsak 1995-ben a Nemzetközi Űrállomás építésének fővállalkozója, a Boeing 190 millió dolláros szerződést kötött az orosz Krunyicsev céggel az FGB jelű modul megépítésére. Ez a modul lett 1998. novemberben az új űrállomás elsőként, immár Zárja néven pályára állított eleme. 1997-ben a NASA köreiből kételyek merültek fel, hogy Oroszország gazdasági nehézségei ellenére vállalni tudja-e kötelezettségeit. Ugyanakkor 1997 végén Brazília is bejelentette, hogy csatlakozik a nagyszabású terv megvalósításához.

Verseny helyett együttműködés

A Nemzetközi Űrállomás gondolata ugyan még a hidegháború és az űrverseny idején fogant, mire azonban a megvalósítás karnyújtásnyi közelségbe került, megváltozott a világpolitikai helyzet. A verseny helyét az együttműködés vette át, így ma már joggal elmondható, hogy az űrkutatás történetének legnagyobb orbitális szerkezete valamennyi űrhajózó nemzet békés célú összefogása eredményeképpen jön létre.

A Nemzetközi Űrállomás történetének fontos mérföldköve volt 1998. január 29. Ezen a napon az érintett űrügynökségek vezetői Washingtonban 15 ország képviseletében aláírták a Nemzetközi Űrállomásra szóló kormányközi egyezményt. Ez helyettesíti az ebben a témában kötött összes korábbi két- és többoldalú megállapodást. A szerződő partnerek: az Egyesült Államok, Oroszország, Kanada, Japán, valamint az ESA akkori 15 tagországa közül 11 (Írország, Ausztria, és Finnország nem vesz részt a költséges programban). A program 16. résztvevője Brazília, amely utólag csatlakozott.

A szerződés szerint az Egyesült Államok vezetésével létesülő űrállomás minden idők legnagyobb nemzetközi tudományos-műszaki programja lesz. A 45 űrrepülőessel több mint 100 fődarabból a világűrben összeszerelendő kutatóbázis teljes kiépülése után hét űrhajósra adhat otthont. A csaknem 460 tonnás berendezés méretét futballpályáéhoz szokták hasonlítani. A tudományos kutatást hat nyomás alatt álló laboratóriumi modul, valamint több, a szabad világűrbe kihelyezett kísérleti platform fogja szolgálni. Létrehozásában a résztvevő űrügynökségek több mint százezer alkalmazottja, valamint több száz szerződéses partner cég munkatársai vesznek részt.

Meggyőződésünk, hogy az épülő űrállomás legfőbb jelentősége éppen az emberiség nemes cél érdekében vállalt, nagyszerű összefogásában rejlik. Minden egyéb másodlagos ehhez képest. Mindamellet hangúlyoznunk kell, hogy szakmai (tudományos) szempontból az űrállomás létrehozása nem jelentheti az együttműködés végcélját, csupán eszköz valamilyen nagyra törő tudományos kutatási program megvalósításához. A nagyszabású vállalkozás létjogosultsága csakis akkor

igazolható, ha az űrállomás használata során a ráfordítással arányos mennyiségű és értékű kutatási eredmény születik.

Az űrállomás egyezmény 15 ország által történt aláírása nem jelenti azt, hogy a további országok ki lennének zárva a programból, a tudományos programok ugyanis általában az egész világ kutatói számára nyitottak. Itt mondjuk el, hogy már hazánk is bekapcsolódott az űrállomás programjába. A KFKI Atomenergia Kutató Intézetében kifejlesztett és készített Pille sugárzás-mérő berendezés első példányát már 2001 márciusában felvitték az amerikaiak az Űrállomásra, ahol a DOSMAP kísérletsorozat keretében csaknem fél évig használták. A világűrben már többször sikerrel vizsgázott műszer korszerűsített változatával a kabin belsejében és az űr-séták során az űrhajósokat érő sugárterhelést kísérték figyelemmel. Ugyanennek a műszernek egy másik példányát az orosz szolgálati rendszer részeként 2003 nyarán felvitték az űrállomásra. A Pille szolgáltatásra október végétől került sor, amikor az e sorok írásakor is a világűrben tartózkodó 8. expedíció (a Pille használatára kiképzett) legénysége felváltotta a korábban az ISS-en tarózkodó űrhajósokat.

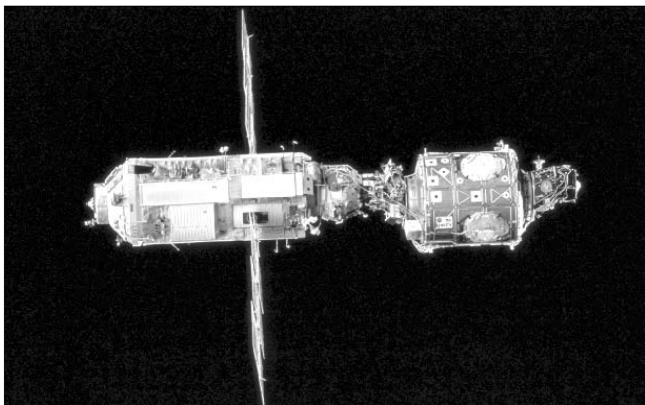
Ugyancsak a magyar űrkutatás jelentős sikere, hogy az ESA egyik kutatási pályázatán elfogadta egy magyar biofizikai kísérlet tervét. Az MTA Biofizikai Kutatólaboratórium munkatársai külföldi partnereikkel együtt biológiailag fontos, kristályos anyagokat akarnak elhelyezni az egyik, kabinon kívüli kísérleti csomagban, hogy megfigyeljék a távoli ibolyántúli sugárzás hatását ezen anyagokra.

Az építkezés

Az ISS építése első szakaszának a NASA űrhajósai által a Mir űrállomáson a 90-es évek második felében végrehajtott, több hónapos űrrepüléseket tekintik. Ennek során az amerikai űrhajósok tapasztalatokat szereztek az űrállomás üzemeltetésében és az ISS-en végrehajtandó, nagyszabású tudományos program előkészítéseként bekapcsolódtak a fedélzeten folyó kutatómunkába.

Az építkezés második szakaszát az orosz és az amerikai építőelemek világűrben történő összeszerelése jelenti. Ez a szakasz a tervek szerint 2004-ig tartott volna, azonban a Columbia tavalyi szerencsétlensége az amerikai űrrepülőgép-programmal együtt az ISS építését is jelentősen visszavetette. Végül az építkezés harmadik szakaszában az űrállomáshoz hozzákapcsolják az európai, a japán és a kanadai elemeket, majd elvégzik az állomás végső beállításait. Ennek időpontját majd csak az űrrepülőgépek újraindulását követően lehet megjósolni.

A tényleges építkezés, vagyis a program második szakasza 1998-ban kezdődött. 1998. november 20-án reggel 6:40 világidőkor a bajkonuri űrrepülőtérről magasba emelkedett az a Proton hordozórakéta, amely az űrállomás első elemét, az amerikai megrendelésre



1. ábra A kezdetek.
Az első amerikai modul, a Unity (jobbra) és az első orosz modul, a Zárja, nem sokkal az összekapcsolásuk után, 1998 decemberében. A felvétel az Endeavour űrrepülőgép fedélzetéről készült. (Fotó: NASA)

Oroszországban épített Zárja (Hajnalpír) nevű modul 390 km magas Föld körüli pályára állította. Két héttel később, december 4-én a floridai Kennedy Űrközpontból indult 12 napos útjára az Endeavour űrrepülőgép, rakodóterében az űrállomás második, Unity nevű blokkjával. A repülés harmadik napján az űrhajósok összekapcsolták a két modult, ezzel lerakták a sok éven keresztül épülő Nemzetközi Űrállomás alapkövét.

Az ISS-t száznál több, kisebb-nagyobb darabból állítják össze, amelyeket az amerikai űrrepülőgépekkel, valamint orosz Szojuz és Proton hordozórakétákkal állítanak Föld körüli pályára.

Az űrállomás elemei öt nagy csoportba sorolhatók. Természetesen legfontosabbak a modulok, ezek a nagyjából azonos méretű, henger alakú tartályok, amelyek belsejében az űrhajósok életfenntartásához és munkájához megfelelő körülményeket biztosítanak. Az összekötő elemek (node) kapcsolják egymással össze a modulokat, biztosítják az elágazás lehetőségét, illetve az ide kapcsolódó zsilipkamrákon keresztül lehetővé teszik az űrsétákat. A rácsos tartó elemeiből épül fel az űrállomás gerince, amelyre a napelemeket erősítik. Utóbbiak gondoskodnak az ISS elektromos energiával történő ellátásáról. Végül, amire kevesen gondolnak, külön hőleadó egységekre van szükség ahhoz, hogy a termelődő fölösleges hőtől meg tudjanak szabadulni.

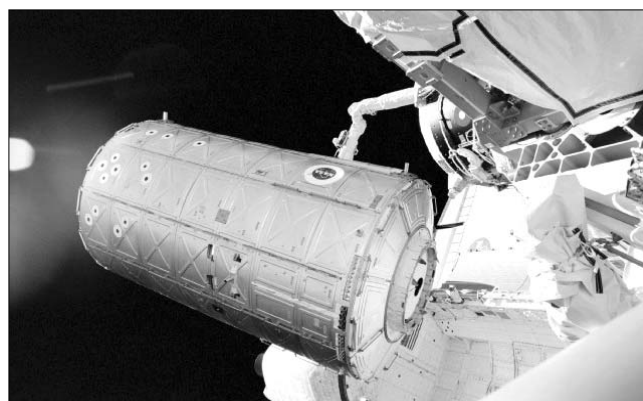
A negyvennél is több tervezett repülésnek már csaknem a felét végrehajtották. Az első két elem összekapcsolása után mérföldkőnek számított az ISS történetében 2000 nyara, amikor a Zvezda modul hozzákapcsolásával lehetővé vált az űrhajósok életfeltételeinek biztosítása. Még abban az évben útnak indult az első állandó személyzet. A következő év elején érkezett meg a nagy, amerikai laboratóriumi modul, a Destiny. Üzembe állították az úgynevezett logisztikai modulokat, melyek lényegében hatalmas, utánpótlást és egyéb anyagokat szállító konténerek. Felszerelték a további építkezéshez nélkülözhetetlen, kanadai gyártmányú robotkارت, és megkezdték annak a rácsos tartónak a kiépítését, amelyik majd a legnagyobb napelemtáblákat fogja tartani.

A Columbia űrrepülőgép 2003. februári katasztrófája miatt az Egyesült Államok hosszabb időre leállította az űrrepülőgép indításait. Ez súlyosan érintette az űrállomás-programot is. A személyzet váltását azóta orosz Szojuz űrhajókkal biztosítják, és a korábbi három helyett csak két űrhajós tartózkodik a fedélzeten. Az űrhajósok nem fogadnak látogatókat sem, akik korábban az űrrepülőgéppel rendszeresen felvitték az újabb elemeket. Minthogy szünetel az építkezés, a személyzet tagjai űrsétákat sem hajtanak végre. A tudományos kísérletek számát is erőteljesen csökkentették, csak a legfontosabbakat végzik el, emellett egyes oktatási programokat folytatnak.

Jelenleg az ISS tömege 187 tonna, ami a teljes tömeg mintegy 40%-a. Lakható térfogata 425 köbméter, a napelemtáblák felülete 892 négyzetméter. Az űrállomás legnagyobb kiterjedései három egymásra merőleges irányban 73, 44 és 27 méter. A floridai Kennedy Űrközpontban további, mintegy 75 tonna tömegű alkatrész áll készenlétben, hogy folytatódhasson az ISS építése. (E sorok megírásakor – 2004 januárjában – az űrrepülőgép-program újraindítását a szakemberek 2004 őszére várják.) A kész elemek között található egyebek között a második amerikai kutatólaboratórium és a Kibo nevű japán modul. Ha mindezeket a már elkészült elemeket beépítik, akkor a tudományos laboratóriumok térfogata megháromszorozódik, háromszorosára nő a napelemek felülete, és 80 százalékkal több energia áll majd a kutatási programok rendelkezésére.

Megemlíthetjük még, hogy az űrállomás az egyenlítővel 51,6 fokos szöveget bezáró pályasíkjában kering a Föld körül, így ennek következtében időnként hazánk fölött is elrepül. Ha átvonulása az esti vagy a hajnali szürkület idejére esik, a csaknem 400 km magasan keringő szerkezetről visszaverődnek a Nap sugarai, így szabad szemmel könnyen megfigyelhető az általában nyugatról kelet felé mozgó fénypont. Kedvező esetben már most is a fényesebb csillagokhoz hasonló a fénye, és ahogy nő a mérete, úgy válik egyre ragyogóbbá. A mindenkori láthatóságára vonatkozó előrejelzés az interneten keresztül a www.heavens-above.com címről tetszés szerinti földrajzi helyre lehívható.

2. ábra Az űrrepülőgép robotkarja megragadja és kiemeli a rakozótérből a Destiny amerikai kutatómodult, hogy hozzákapcsolhassák az ISS többi részéhez. A felvétel az Atlantis fedélzetéről készült, 2001. februárban. (Fotó: NASA)



Az építés fázisában az ISS 3 fős személyzetnek adhat otthont. A normális üzemmenetben alkalmazott alapelv szerint az egyik állandó személyzet parancsnoka amerikai, két tagja pedig orosz, a következőnek viszont orosz a parancsnoka, és a két tagja amerikai. Ettől a rendszertől kényszerűségből eltértek, mióta „takaréklángon” üzemeltetik az űrállomást, azóta egy orosz és egy amerikai űrhajós alkotja a személyzetet. Jelenleg a nyolcadik állandó személyzet, Michael Foale és Alekszander Kareli lakja az űrállomást.

Tavaly júliusban ünnepelték meg, hogy ezer napja tartózkodik személyzet az állomáson. Ez idő alatt az első hét legénység 10 amerikai és 10 orosz tagja átlagosan 4-6 hónapot töltött el a világűrben. Az űrállomásról 26 űrsétát végeztek el, emellett az űrrepülőgép ottjártakor további 25 űrsétára került sor, melyek során az űrhajósok összesen 317 órát töltöttek a világűrben. Az űrhajósok 11 alkalommal fogadták az űrrepülőgép látogatását, 10 orosz Progressz teherűrhajóról rakodták át az egyenként több tonna utánpótlást, továbbá négy Szojuz űrhajó látogatását is fogadták, közöttük kettőnek az első két űrturista is az utasa volt. Mégis talán a legszokatlanabb – és a bulvársajtó fantáziáját is megmozgató – esemény tavaly nyáron történt az űrállomáson, amikor a hetedik személyzet orosz tagja, menet közben megnősült. Az űrállomás építése mellett a személyzet megkezdte a tudományos munkát is, eddig már csaknem 150 különféle kísérletet végeztek el.

A tudományos program

Sokan kételkednek az egész űrállomásprogram létjogosultságában. Őket csak a sikeres és hatékony tudományos program győzheti meg. Lássuk, mit ígérnek az űrállomás tervezői! Természetesen cikkünkben csak rövid áttekintést adhatunk arról, amit bárki elolvashat a <http://spaceflight.nasa.gov/station/science/index.html> honlapról kiindulva elérhető dokumentumokban.

Az űrfizika területén mindennek előtt a Világegyetem fejlődését és szerkezetét, valamint a Naprendszeret akarják vizsgálni, továbbá idegen bolygórendszereket keresnek és megpróbálják feltárni azok eredetét. Fontos terület a Nap-Föld fizikai kapcsolatok kutatása, mert ez közvetlen hatással van a világméretű távközlési rendszerek működésére, valamint a földi időjárás és az éghajlat hosszú távú változásaira.

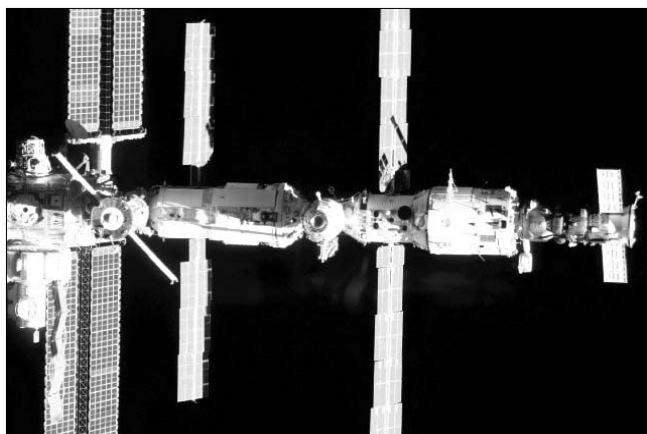
Az űrélettani kutatásokon belül a NASA két fő irányt jelölt ki. Az orvosbiológiai vizsgálatok segítenek megismerni az emberi szervezet fiziológiai és pszichológiai viselkedését a hosszú időtartamú űrrepülések során. E területen kiemelt szerepet kap az űrhajósokat érő sugárterhelés rendszeres mérése, amelynek egyik eszköze, mint említettük, a magyar Pille műszer.

A gravitációs biológiai vizsgálatok célja inkább alap kutatás jellegű. A molekuláris biológiai szinttől kezdve a sejteken keresztül a különféle biológiai és ökológiai rendszerek viselkedéséig vizsgálják a súlytalanság hatását. A kutatók a mikrogravitáció körülményei között például fehérjéket vagy csaknem tökéletes belső szerkezetű félvezető kristályokat állíthatnak elő. Vizsgálhatják az immunrendszer és az emberi szervezet más részeinek működését a súlytalanság viszonyai között. A mikrogravitáció hatására megváltozik az agy, az idegek, az izmok, a csontok működése. Ezeknek az alig észrevehető változásoknak a nyomon követése hozzásegíthet egyes, a Földön előforduló betegségek gyógyításához.

A mikrogravitációs vizsgálatok bizonyos alapvető fizikai kutatások mellett négy fő területre terjednek ki. Az anyagtudományok célja mindennek előtt a világűrben előállított anyagok szerkezetének, termikus, mágneses, kémiai és tulajdonságainak vizsgálata. Fontos kérdés, hogy befolyásolja a Földön a gravitáció által működtetett konvekció és ülepedés hiánya az anyagok kialakulását. A kutatások végcélja, hogy a Földön használható módszereket és anyagokat dolgozzanak ki.

Érdekességek

- A Nemzetközi Űrállomás teljes tömege megközelíti az 500 tonnát (455,8 t).
- Egymástól legtávolabbi két pontja között 108,6 méter lesz a fesztávolság, az űrállomás hossza pedig 79,9 méter lesz.
- Nyomás alá (101,36 kilopascal) helyezett belső térfogata 1200 köbméter, annyi, mint egy Boeing-747 belső tere.
- Darabjait az amerikai űrrepülőgépek, valamint az orosz Proton és Szojuz hordozórakéták 45 részletben szállítják.
- Energiaellátásáról négy napelemes egység gondoskodik, egységenként 23 kW teljesítménnyel. A napelemtáblák felülete 4200 négyzetméter.
- Az elektromos rendszerhez 12,5 km kábelt használnak fel.
- Az elektronikus egységek megépítéséhez 1900 fajta ellenállást, 500 féle kondenzátort és 150 féle tranzisztort használnak.
- Az űrállomásnak négy, a Föld felé néző ablaka lesz.
- Az önálló lakóegységen kívül legfontosabb egységei a hat kutatómodul, melyek közül egy amerikai, egy európai (ESA), egy japán és három orosz.
- Az űrállomás vezérlését 52 számítógép végzi. Ezek közül 16 folyamatosan felügyeli az állomás fizikai állapotát regisztráló 2000 érzékelő adatait. Programjuk nem kevesebb, mint 400 ezer sorból áll.
- Két számítógép gondoskodik a Földet 90 percenként megkerülő állomás mindenkor helyes tájolásáról.
- A repülésirányító számítógépprogram 1,7 millió sorból áll.
- A kanadai gyártmányú, 16,5 m hosszú robotkar teherbírása 125 tonna (természetesen a súlytalanságban „csak” a megmozgatott teher tehetetlenségét kell legyőzni). A robotkar a hosszanti rácsos tartó mentén elmozdítható.



3. ábra
Így nézett ki a Nemzetközi Űrállomás 2001 végén.
A felvétel készítésekor már a negyedik, háromfős
legénység tartózkodott az ISS fedélzetén. (Fotó: NASA)

Ehhez kapcsolódik a folyadékok és gázok súlytalanságbeli viselkedésének kutatása. Jelentősek lehetnek a világűrben végzett égésvizsgálatok földi alkalmazásai, hiszen energiaszükségletünk 85%-át valamilyen égési folyamatból nyerjük. Ha a kutatások eredményeképpen csupán 2%-kal hatékonyabbá tehető az égési folyamat, akkor ez az Egyesült Államok számára évi 8 milliárd dollár megtakarítást jelenthet. Emellett a hatékonyabb égés a környezetszennyezést is csökkenti. Végül, de nem utolsósorban ide tartoznak a biotechnológiai kutatások, mindenek előtt a Földön elérhetőnél nagyobb és hibátlanabb fehérjekristályok növesztése. Ide tartozik a különféle sejt- és szövettenyészetek viselkedésének tanulmányozása, melynek eredményeit például a rákkutatás hasznosíthatja.

Nem marad ki természetesen a tudományos programból a Föld és erőforrásainak vizsgálata sem. Az űrállomás a földfelszín 75%-a fölött rendszeresen elrepül, e területen lakik az emberiség 95%-a. A Föld felé néző ablakokon keresztül lehetővé válik a NASA által évekkel ezelőtt automatikus műholdakkal megkezdett „Küldetés a Föld bolygóhoz” program kiegészítése, a levegőminőség, az éghajlat, a földhasznosítás, az élelemtermelés, valamint az óceánok és édesvizek állapotának megfigyelése.

A kutatási program első fő helyszíne a 8,4 m hosszú és 4,2 m átmérőjű amerikai kutatómodul. Belsejében a kísérleti berendezéseket szabványos, a lehető leggazdaságosabb térkitöltést biztosító alakú rekeszekben helyezik el. Az egység belsejében 24, egyenként mintegy 600 kg tömegű rekesz kap helyet. Közülük 13-ban a kísérleti eszközök kapnak helyet, a többi 11 viszont a műszerek és a kutatási feladatokat végrehajtó űrhajósok számára biztosítja az energiaellátást, a megfelelő hőmérsékletet, páratartalmat, gondoskodik a levegő regenerálásáról és így tovább. A rekeszekben belül a kísérleti eszközök természetesen „menet közben”, a világűrben cserélhetők.

De vajon milyen fizikai környezetet biztosít az űrállomás a kísérletekhez, vagy legalábbis milyen paramétereket ajánl fel a NASA a fedélzeten – jó pénzért – kí-

sérletezni kívánó felhasználóknak? Nos, a fedélzeten mindenek előtt mikrogravitáció uralkodik, vagyis a tapasztalható gyorsulások legalább hat nagyságrenddel kisebbek a földfelszíni nehézségi gyorsulásnál. Ezeknek a gyorsulásoknak több oka van. Egyrészt az űrállomás 400 km közötti magasságában még kimutatható a légköri fékeződés hatása. Ez az égi mechanikai paradoxon néven ismert jelenség következményeképpen gyorsítja az állomás mozgását, amely parányi, de nagyjából állandó gyorsulást hoz létre az űreszközök belsejében. A gyorsulások másik forrása az a körülmény, hogy fizikailag csak az űrállomás tömegközéppontja mozog a Föld körüli tehetetlenségi pályán. A kiterjedt szerkezet távolabbi részei saját, önálló keringési pályájuk mentén szeretnének haladni, ami ugyancsak kicsiny gyorsulások fellépését eredményezheti.

Végül, de nem utolsósorban a különféle fedélzeti berendezések által keltett vibrációk ugyancsak megzavarják a tökéletes súlytalanságot. E rezgések 0,01 és 300 Hz között a legkülönbélebb frekvenciájúak lehetnek. Pontos modellszámítások léteznek arra vonatkozóan, hogy az egyes modulokban milyen hosszú időn keresztül tudják a fenti követelményeket kielégítő mikrogravitációt biztosítani.

A belső környezet az ember számára legkellemebb feltételeket próbálja utánozni. Az átlagos légnyomás 101,4 kPa, amelytől nem engednek meg túl nagy eltéréseket, a nyomásnak mindig 97,9 és 102,7 kPa között kell maradnia. A kabinlégkör összetétele a földfelszínivel megegyező, tehát 78% nitrogént és 21% oxigént tartalmaz. A levegő relatív nedvességtartalma ezzel szemben viszonylag tág határok, 25% és 70% között változhat. A szén-dioxid mennyisége napi átlagban nem haladhatja meg a 0,7%-ot, kivéve a személyzet cseréjének az időszakát, amikor több űrhajós tartózkodik a fedélzeten. Ilyenkor ez az érték 1% fölött is megengedhető.

Kísérleteket nem csak az állomás belsejében, hanem bizonyos esetekben „odakint” is végeznek, így azt sem árt tudni, milyen az ISS külső környezete. Ennek pontos leírásakor nem elég a semleges felsőlégkört, a plazmát, a töltött részecskék által képviselt sugárzást, az elektromágneses sugárzást, a meteorokat, az űrszemetet, a mágneses és a gravitációs teret figyelembe venni, hanem azt is ismerni kell, milyen változást okoz a felsorolt paraméterekben az ISS jelenléte. Pontosan megszabják például, hogy az űrállomást elhagyó gázok legfeljebb az átlátszóság milyen mértékű csökkenését okozhatják a Földet vagy a világűr megfigyelő műszerek látóirányában. A későbbiekben az ISS külső részére olyan speciális műszereket fognak felszerelni, amelyek az utóbbi hatásokat vizsgálják.

E sorok megírásakor csak bizakodhatunk abban, hogy az év végén újra indulnak az űrrepülőgépek, helyreáll az ISS üzemeltetésének megkezdett rendje és tovább folytatódik az építkezés, miközben a tudományos eredményekről is egyre többet hallhatunk.

Csúcsforgalom a geostacionárius pályán

ALMÁR IVÁN, csillagász-úrkutató,
az Úrkutatási Tudományos Tanács elnöke

almar@konkoly.hu

Kulcsszavak: távközlési holdak, űrszemét, pályamódosítás, interferencia

A világűr bizonyos értelemben a világóceánokhoz hasonló közeg. Jogilag mindenki számára egyformán biztosítja a használatot (bár a partmenti vizek ugyanúgy nemzeti szuverenitás alá tartoznak, mint a légkör alsó rétegei, a troposzféra és a sztratoszféra), és az óceánokon haladó járművek ugyanúgy nemzeti zászló alatt hajóznak, mint az űrhajók és űrállomások a világűrben. Közismert, hogy a világóceánokon használt útvonalak közül néhány különlegesen zsúfolt, továbbá stratégiai jelentősége miatt kiemelt fontosságú. Kezdetben senki sem gondolta volna, hogy a világűrben is lesznek ilyen útvonalak, pályák, amelyek stratégiai és gazdasági fontossága vitathatatlan. Éppen a műholdas távközlés gyorsan növekvő igényei tették a geostacionárius pályát (GEO) olyan kritikus „útvonallá”, amelyen egyre nehezebb az újonnan érkezőknek üres helyet találniuk, illetve ahol a használaton kívüli, lerobbant járművek kezdik akadályozni a folyamatos közlekedést.

Mielőtt ezen aktuális és fontos probléma ismertetésére térnénk, érdemes pontosan meghatározni e kitüntetett pálya jellegzetességeit. Legfontosabb tulajdonsága, hogy *geoszinkron*, vagyis hogy rajta a keringési idő pontosan megegyezik a Föld sziderikus (az állócsillagokhoz viszonyított) tengelyforgási idejével (1436 perc). Ez szükséges, de nem elégséges feltétel, mert geoszinkron holdak még keringhetnek különféle excentricitású és hajlásszögű pályákon a Föld körül, és ezek a távközlés szempontjából nem bírnak semmiféle jelentőséggel. A geoszinkron pályák alcsoportja a geoszinkron körpálya, vagyis ha az excentricitás nulla. Ebben az esetben a pálya sugara 42 163 km. Az ilyen pályán mozgó hold esetében, ha a pálya hajlásszöge nem nulla, akkor földfelszíni vetülete nyolcas alakot ír le. Végül, ha a kör alakú geoszinkron pálya hajlásszöge az egyenlítővel nulla, akkor létrejön a különlegesen kedvező adottságú *geostacionárius pálya*, amelyen a Föld tengelyforgásával megegyező irányba elindított test olyan keringést végez, amelynek során földfelszíni vetülete az egyenlítő egyetlen pontjára esik (vagyis a Föld forgása során látszó égi helyzete nem változik). Ez a körülmény rendkívül előnyös a távközlési holdak számára, mert nem kell a követő antennát mozgatni, de hasonló okok miatt előszeretettel használják meteorológiai és csillagászati holdak is.

Éppen ezért jelent problémát az a körülmény, hogy ez a különleges „természeti erőforrás”, vagyis a geostacionárius pálya nem kimeríthetetlen, hanem nagyonis korlátozott terjedelmű. Más szóval nem lehet rajta végtelen számú holdat elhelyezni, mert zavarnák egymás működését. Alapvető jogi problémává vált, amellyel az *ENSZ Világűrbizottsága* hosszú évek óta eredménytelenül foglalkozik, hogy ehhez a természeti erőforráshoz szerezhethet-e jogot olyan állam, amely ma még képtelen lenne ugyan műholdat felbocsátani, de azt reméli, hogy később erre szüksége lenne (viszont addigra a pálya

betelik!). Ezek a főként délamerikai fejlődő államok már ma szeretnének lefoglalni néhány szegmensek országuk területe fölött, de erre a „mindenki számára szabadon hozzáférhető” világűrben egyszerűen nincs jogi lehetőség.

Egy az űrtávközlés számára értékes pálya védelme

Az *űrszemét probléma* két tartományban kritikus: egyrészt alacsony pályán (LEO), ahol értékes műholdak, lakott űrállomások és űrjárművek találhatóak, másrészt a geostacionárius pálya (GEO) közelében. Ez utóbbi, a 35 786 km magasságban az egyenlítő fölött húzódó körpálya, amely nagy értéket képvisel, mert az itt elhelyezett és kellő irányban elindított távközlési vagy meteorológiai holdak együtt haladnak a földfelszínnel (keringési idejük pontosan egy nap), ezért alkalmasak bizonyos területek folyamatos megfigyelésére, illetve a folyamatos kapcsolattartásra. Nem véletlen, hogy jelenleg a működő holdak egyharmada (!) ezen az egyetlen pályán található. A geostacionárius pálya kedvező helyzetű szegmenseiért, amelyeket a *Nemzetközi Távközlési Unió* ítélt oda a pályázóknak, elkeseredett harc folyik. Ugyanakkor nyilván nem lehet egymáshoz túlságosan közel működtetni különféle távközlési holdakat, vagyis a már nem üzemelő, halott holdak a többieket kiszorítva és veszélyeztetve keringenek a GEO-n. Az ilyen űrszemét eltávolítása onnan, ahol már csak bajt okoz, többlet hajtóanyagot igénylő feladat, mert ebben a magasságban a légköri fékezésre már nem lehet számítani.

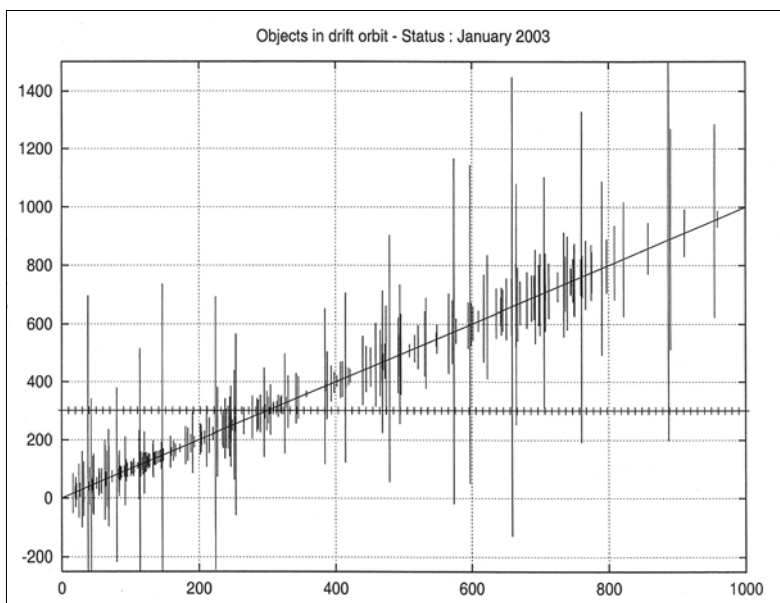
A magukra hagyott testek mozgása a geostacionárius pályán érdekes probléma. Mivel a Föld nem pontosan gömbalakú, még a geostacionárius pályán sem marad örökké egyetlen földfelszíni pont fölött a magára

hagyott hold. Működő, aktív holdak esetében a szükséges parányi pályamódosításokat a fedélzeti mikrohajtóművek segítségével rendszeresen elvégzik, vagyis a mozgását és helyzetét korrigálják. Halott holdak esetében azonban erre nincs lehetőség.

A GEO övezetet úgy szokták meghatározni, mint egy 120 km vastag egyenlítői gyűrűt vagy tóruszt a 35 786 km magasság körül (vastagságát az szabja meg, hogy 15 foknyi eltérés északi vagy déli irányba még megengedett). Ezen a gyűrűn belül azonban létezik két kitüntetett zóna (*librációs pont*), az egyik a 75° keleti hosszúság, másik a 105° nyugati hosszúság fölött. Azért kitüntetettek, mert a Föld egyenlítője nem pontosan kör alakú, hanem enyhén lapult ellipszis (ennek bizonyítása a magyar származású *Izsák Imre* nevéhez fűződik). A Föld gravitációs terének ezen aszimmetriája miatt az említett két librációs hely közelébe sodródnak a geostacionárius pályán magukra hagyva keringő testek. Ez persze ütközési veszélyt jelent mindazon holdak számára, amelyek e sávokban működnek. De a sodródó objektumok ütközésben is eltalálhatnak működő műholdakat, és ha a viszonylagos sebesség meghaladja a 2 km/mp-et, akkor katasztrófa következhet be, amely nagy mennyiségű veszélyes törmelékkel szennyezheti az egész térséget.

1. ábra Sodródó pályán lévő objektumok megoszlása magasság szerint.

Minden egyes függőleges vonal egy egy ilyen űrobjektumot jelöl. A vízszintes tengely mutatja a pálya félnagytegyelének közepes eltérését a geostacionárius pálya magasságától. A függőleges tengely a földközelpont (*perigeum*) és a földtávolpont (*apogeum*) közepes eltérése a geostacionárius pályamagasságtól. Az űrobjektum tényleges magassága e két határérték között ingadozik (amit a függőleges vonalka jelöl). Látható, hogy ha az űrobjektum pályaeccentricitása nagy, akkor áthaladhat a geostacionárius pályán is. Azért fontos ez a szegmens, mert az ajánlások szerint a már nem aktív holdakat olyan pályára kell küldeni („temetői pálya”), amely átlagosan legalább 300 km-rel a geostacionárius pálya fölött van (az ábrán vízszintes vonallal jelölve). Látható, hogy ez a magasságkülönbség sem biztosíték arra, hogy a sodródó hold elkerülje a geostacionárius pályát.



Éppen ezért született már évekkel ezelőtt az az ajánlás, hogy a GEO-n lévő, életük végéhez közeledő holdakat a még meglévő üzemanyaggal olyan „*űrszemét-tároló*” vagy „*temetői*” pályára kell juttatni, amely legalább 300 km-rel a GEO fölött húzódik. Ez elvileg biztosítja, hogy mozgása során később sem fog ütközni a geostacionárius pálya aktív holdjaival. Gyakorlatban azonban sajnos nem ennyire kedvező a helyzet. Igazolható, hogy még a GEO fölött 300 km-rel húzódó „temetői pálya” sem ad teljes biztosítékot arra, hogy a műhold élete során soha nem keresztezi majd a geostacionárius pályát (veszélyeztetve az aktív holdakat). Ez látható az *1. ábrán*, amely azt mutatja be, hogy ha a sodródó űrobjektum pályaeccentricitása viszonylag nagy, akkor időnként áthalad a geostacionárius pályán még akkor is, ha átlagos magassága még az előírt 300 km-nél is nagyobb mértékben tér el a geostacionáriustól.

Nézzük, hogy mennyire tartották magukat az érdekelt úrhatalmak az említett ajánláshoz! Tavaly a NASA büszkén jelentette, hogy az 1980 óta a geostacionárius pályára küldött, már nem működő holdjainak mind-egyikét pályamódosításokkal az ajánlásban szereplő űrszemét-tárolóba helyezték át. A tények azonban ezt nem teljesen igazolják. 2002-ben például összesen 13 űreszköz fejezte be aktivitását a GEO pályán, ebből ötöt valóban áthelyeztek biztonságos pályára, de a többi vagy egyszerűen ott maradt, vagy csak 100-200 km-rel sikerült pályáját megemelni. Egy Intelsat 2 hold műszaki problémák miatt éppenséggel a GEO alá került. Mindezen holdak mozgásuk során időnként elkerülhetetlenül keresztezni fogják a GEO tartományt, veszélyeztetve az ottani tevékenységet. Összességében tehát jelenleg a működésképtelen holdak kétharmada nem kerül az „űrszemét-tárolóba”, s ez az arány évek óta szinte változatlan.

Geostacionárius holdak katalógusa

Igen fontos annak ismerete, hogy mi a pillanatnyi helyzet a kitüntetett szerepű geostacionárius pályán. Az ESA egyik intézménye, a darmstadti ESOC központ vezeti a pontos nyilvántartást *DISCOS* adatbázis néven. 2003 januári adataik szerint a GEO pályán lévő objektumok hat típusba sorolhatók:

- Azok, amelyek pályája, mozgása és helyzete jól ismert, pályahajlásuk az egyenlítőhöz kisebb, mint 0,3°. Ezek pályaelemeit hetente javítják. Számuk 200, bár ezek közül 5 esetben a követés az utolsó félévben már nem sikerült;
- Azok, amelyeknél csak az egyértelmű, hogy melyik hosszúsági kör fölött tartózkodnak, viszont pályahajlásuk viszonylag nagy, és ezért helyzetük észak-déli ingadozást mutat. Számuk 123, ezek közül 45 esetben a követés az utolsó félévben már nem sikerült;

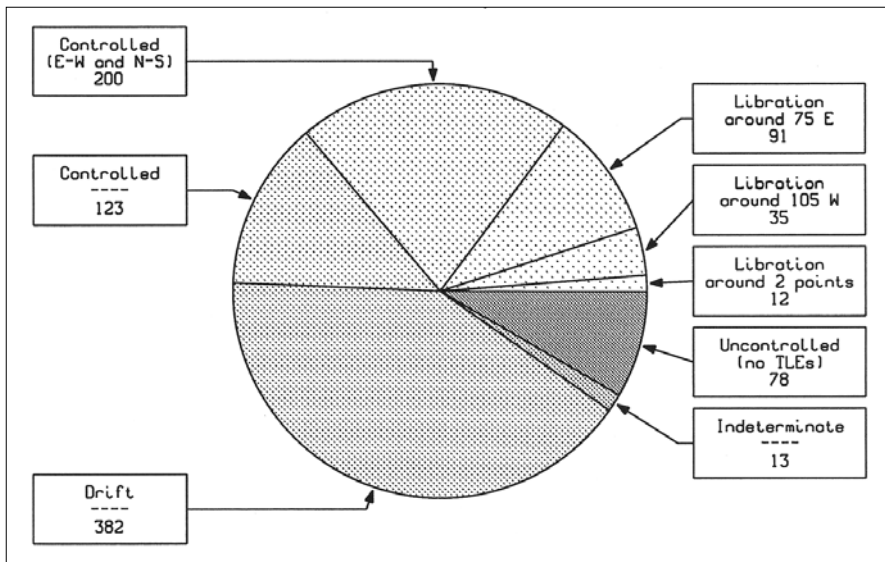
- Szabadon sodródó holdak, melyeknek száma 382;
- Azon objektumok, melyeknél a sodródás a keleti librációs pont körül stabilizálódott (91);
- Azok az objektumok, melyeknél a sodródás a nyugati librációs pont körül stabilizálódott (35);
- Azon objektumok, amelyek hol az egyik hol a másik librációs pont környékén mozognak (12).

Ezen kívül 78 esetben nincsenek 2002-es adatok a pályáról, és a teljesen bizonytalan esetek száma 13. A katalógus szerint tehát összesen 934 objektum van a geostacionárius pályán. Közülük 27 darab 2002-ben került oda (26 hold és 1 rakétafokozat). A katalogizált objektumok típus és a felbocsátás ideje szerinti megoszlását a 2-3. ábra, a különféle típusokba sorolható ellenőrzött holdak hosszúság szerinti megoszlását pedig a 3. ábra, végül a sodródó holdak perigeum (Földközeli) pontjainak – GEO pályához viszonyított – magasság szerinti megoszlását a 4. ábra mutatja.

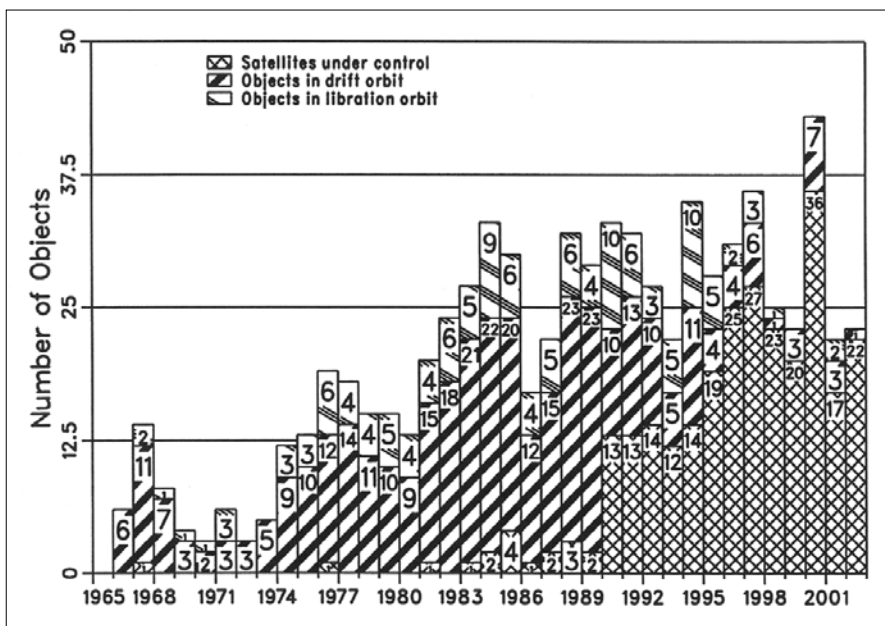
A „halott” holdak követése nemcsak radarral, hanem optikai távcsövekkel is lehetséges, sőt ez az érzé-

kenyebb módszer. Egy 1 m tükörátmérőjű távcső, amelyet Teide Observatory néven az Európai Űrügynökség, az ESA működtet a Kanári Szigeteken, évente több hónapig fényképezi az égi egyenlítőt, hogy ott ismeretlen geostacionárius holdakat fedezzen fel. A munka 1999 óta folyik, és azóta 2000-nél több, eddig nem katalogizált, 1 méternél kisebb objektumot találtak. Ezek egy része felhőket alkot, mivel valószínűleg egy-egy műhold szétesésekor keletkezett. Hasonló távcsöves keresési program Oroszországban és Kínában is folyik.

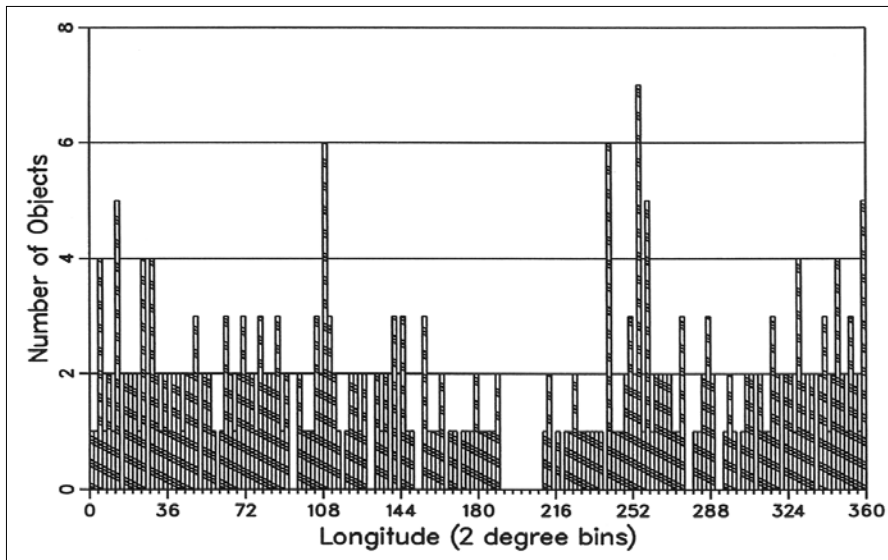
Visszatérve az említett ajánlásokra, illetve az európai szabályzatra, az a cél, hogy ezek mielőbb hivatalosan elfogadott „törvényekké” váljanak, és minden, a GEO pályát használó országra vonatkozzanak. A jelenlegi állapot, amikor a geostacionárius holdaknak csak egyharmada jut el élete végén a „szeméttárolóig” nem tekinthető elfogadhatónak. Az ENSZ Világűrbi-zottsága nagy erőfeszítéseket tesz annak érdekében, hogy az űrszemét-probléma „szabványosítása” mielőbb megtörténjen.



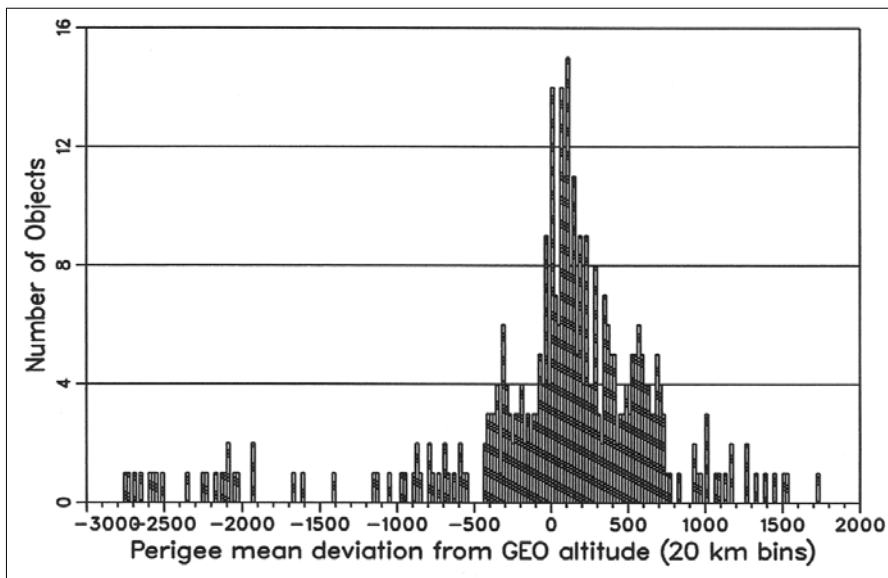
2. ábra
A GEO pályán lévő 934 űrobjektum megoszlása típus szerint (felülről az óramutató járásával ellentétesen: teljesen ellenőrzött, részben ellenőrzött, sodródó, teljesen bizonytalan, nincs pályaadat, mindkét L-pont körüli mozgás, nyugati L-pont körül, keleti L-pont körül).



3. ábra
A GEO pályán lévő űrobjektumok számának megoszlása a felbocsátás éve, és ezen belül típus szerint (felülről lefelé: ellenőrzött, sodródó és librációs holdak).



4. ábra
Az ellenőrzött 273 hold megoszlása hosszúság szerint. A vízszintes tengelyen a hosszúság, a függőlegesen az objektumok száma szerepel.



5. ábra
A sodródó holdak perigeum (földközelpont) magasság szerinti gyakorisági eloszlása – a GEO magassághoz viszonyítva. A vízszintes tengelyen a perigeum magasság eltérése a GEO magasságtól (20 km-enként), a függőleges tengelyen az objektumok száma szerepel.

A helyzet 2003 végén és a távlati kilátások

2000 és 2002 között jelentősen lecsökkent a műholdak pályára juttatása, valamint az új műhold megrendelések száma is. Ennek oka részben az általános gazdasági válság, de az űrtávközlés területén más, speciális körülmények is közrejátszottak. A trend megfordulására nagy hatással volt a mobil távközlést forradalmasítani szándékozó világcégek (Iridium, Globalstar) csődje, amelynek hatására elmaradt csaknem száz új távközlési hold felbocsátása. Ugyanakkor az új generációs holdak élettartama sokkal hosszabbnak bizonyult, mint a korábbiaké, ezért egyszerűen nem is volt igény pótlásukra.

Több éves válság után 2003 szeptemberében a kereskedelmi holdakkal foglalkozó Euroconsult fórum Párizsban fellendülést jósolt a műholdas távközlés területén. Becslések szerint 2006 körül már 2000 új transzponderre lesz szükség, ennek fele a kiöregedő műholdak pótlására szolgál. Már 2005-ben várható, hogy az igények meghaladják a rendelkezésre álló készleteket.

Az előrejelzések szerint 2006-ig évente átlagosan 20-25 új, nagy távközlési holdra érkezik be rendelés, melyek mintegy 150 millió dollár értékűek. Várhatólag hasonló számban kötnek majd szerződéseket műholdak indítására is, esetenként 70-100 millió dollár közötti áron.

A most következő években, az előrejelzések szerint évente átlagosan 15 nagy távközlési holdat juttatnak majd geostacionárius pályára, vagyis a 2004 és 2008 közötti négyéves periódusban legkevesebb 65, de talán 110 új holddal is gyarapodhat a geostacionárius pálya népsége. Az optimista előrejelzések alapja az, hogy 2003-ban nem kevesebb, mint 13 rendelést adtak fel nagy geostacionárius holdakra.

A műholdas távközlési piac évente 80 milliárd dolláros forgalomra számít, ennek túlnyomó része (55 milliárd dollár) a műholdakról közvetlenül az otthonokba sugárzott („direct-to-home”) televíziós adásokból származik. Jelentős piacnövekedésre számítanak Oroszországban, Kínában és Ázsia Csendes-óceáni régiójában.

Naptevékenység és a rádióhullámok terjedése

BENCZE PÁL, ny. tudományos tanácsadó

MTA Geodéziai és Geofizikai Kutatóintézet, Sopron

bencze@ggki.hu

Kulcsszavak: hirtelen ionoszférazavarok, rádióhullámok ionoszférikus és tranzionszférikus terjedése

Az ionosféra a felső légkörnek az a része, ahol elsősorban a Nap elektromágneses sugárzása által előidézett ionizáció következtében szabad elektronok vannak jelen olyan koncentrációban, hogy a rádiófrekvenciás (elektromágneses) hullámok terjedését befolyásolni képesek.

1. Bevezetés

Mivel egy elektronnak az elektromosan semleges atom, vagy molekula elektronburkából való leválasztásához, az ionizációhoz az atom, vagy molekula minőségétől függő energiára (ionizációs potenciál) van szükség, a Nap elektromágneses sugárzásában terjedő energiának ennek megfelelő nagyságúnak kell lennie. Mivel – mint ismeretes – a sugárzásban terjedő energia a hullámhosszúság csökkenésével növekszik, az ionizációhoz szükséges energiát hordozó sugárzásnak mintegy 160 nm-nél kisebb hullámhosszúságúnak kell lennie. Az ilyen hullámhosszúságú sugárzás az ultraibolya sugárzásnak megfelelő hullámhossz tartományánál lényegesen rövidebb, ezért extrém-ultraibolya (EUV) sugárzásnak szokták nevezni.

Mint ismeretes, a naptevékenység az időben változik és ezek a változások időbeli lefolyásukat tekintve egyrészt többé-kevésbé periodikus jellegűek, másrészt szabálytalan lefolyásúak és véletlen jellegű előfordulásúak. A naptevékenység többé-kevésbé periodikus időbeli lefolyású változásai a kvázi 11 éves naptevékenységi (napfolt) ciklus és a Nap tengely körüli forgásával összefüggő 27 napos változás. A Nap elektromágneses sugárzása által közvetített energiát kifejező

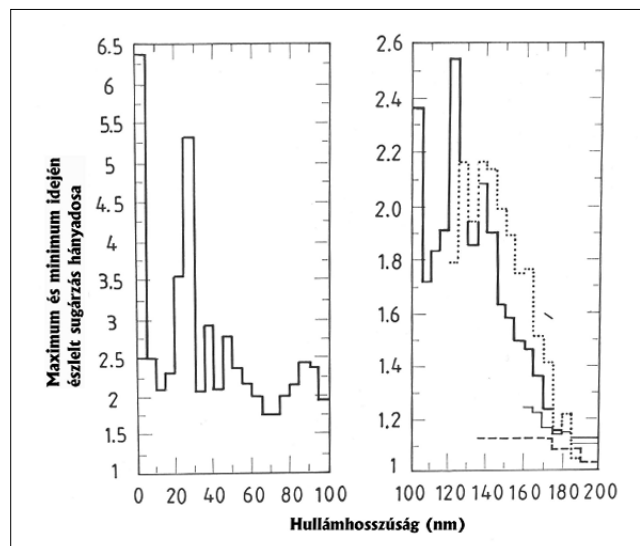
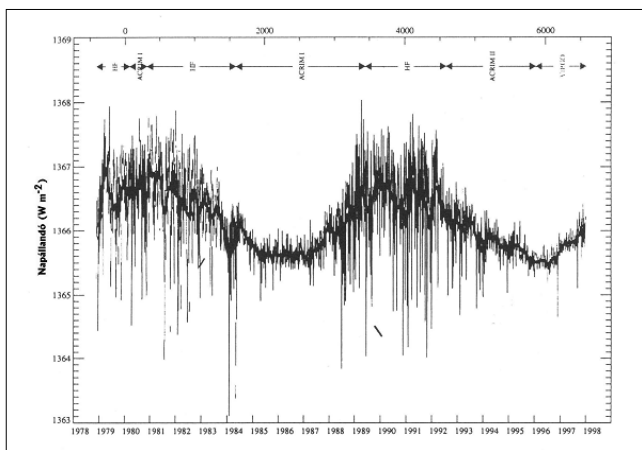
mennyiség a napállandó, azt az energiát fejezi ki, amely a Föld légkörének külső határán merőleges beesés esetén egységnyi felületre egységnyi idő alatt jut. Ennek a mesterséges holdak segítségével meghatározott 11 éves változását látjuk az 1. ábrán.

A változás nagysága mintegy 0,13%. A napállandóval kifejezett energia 51% az infravörös, 40% a látható, 9% ultraibolya sugárzás formájában jelenik meg. Szabálytalan időbeli lefolyásúak és véletlen jellegű előfordulásúak a napkitörések. A naptevékenység változásával a Nap elektromágneses sugárzása is változik. A változás azonban a sugárzás spektrumának csak egy részét érinti. A mesterséges holdakon elhelyezett sugárzásmérő eszközöknek köszönhetően ma már tudjuk, hogy a naptevékenység változásának a hatása csak a sugárzás spektrumának rövid hullámhosszúságú részében, az extrém-ultraibolya és a röntgen sugárzásban, illetve az igen nagy hullámhosszúságú, rádiófrekvenciás sugárzásban észlelhető.

2. ábra

A Nap elektromágneses sugárzásának a naptevékenységi ciklus maximuma és minimuma idején a 200 nm-nél kisebb hullámhosszúságokon észlelt intenzitása hányadosának változása a hullámhosszúsággal (Bencze, 1994)

1. ábra A napállandó (besugárzás erőssége) változása 1979 és 1998 között (Pap és Fröhlich, 1999)



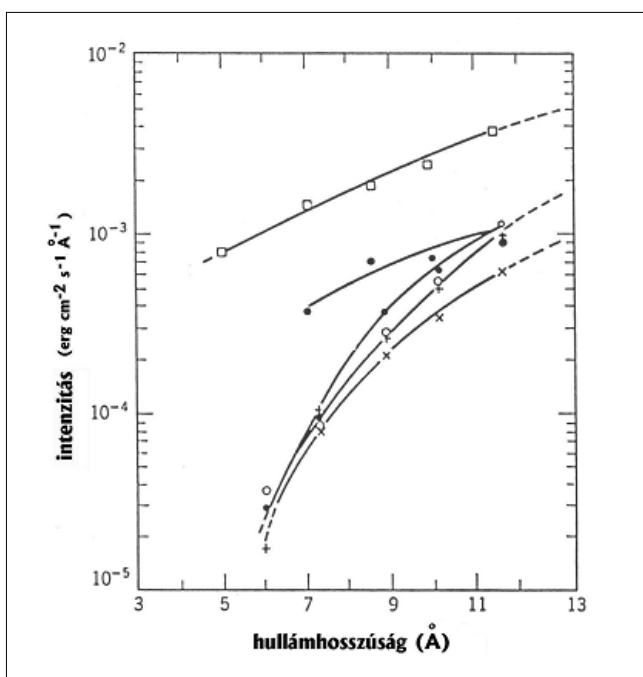
A Nap ugyanis rádiócsillag, rádiófrekvenciás elektromágneses sugárzást is bocsát ki. Leegyszerűsítve a dolgokat azt mondhatjuk, hogy a naptevékenység változásának a hatása annál nagyobb, minél kisebb a hullámhosszúság. A naptevékenység növekedésével a sugárzás erőssége az extrém-ultraibolya hullámhosszúságú sugárzásnál kisebb hullámhosszúságoknál kezd el növekedni és a hullámhosszúság csökkenésével növekszik. A legnagyobb mértékű a sugárzás erősségének a növekedése a röntgensugárzás tartományában észlelhető (2. ábra).

Az eddig elmondottak értelmében tehát a naptevékenység kvázi 11 éves ciklusának és a 27 napos változásnak megfelelően a Nap elektromágneses sugárzásának az erőssége is változik, de csak az extrém-ultraibolya és a röntgensugárzásnak megfelelő hullámhosszakon. Ami a napkitöréseket illeti, a Nap elektromágneses sugárzásának a növekedése az extrém-ultraibolya és röntgen tartományban rövid időtartamú, csak mintegy 1 óráig tart (3. ábra).

Miután a fentiekben arról szó volt, hogy az ionizációt, a szabad elektronok koncentrációját elsősorban a Nap elektromágneses sugárzása, illetve annak hullámhosszúsága és erőssége határozza meg, a naptevékenység változásai az ionoszférában is tükröződnek.

Az ionoszférában azonban nemcsak a Nap elektromágneses sugárzása idézi elő az ionizációt, hanem az elektromos töltéssel rendelkező részecskék fluxusa, a részecske, vagy korpuszkuláris „sugárzás” is, amely a Naptól és a tejútrendszerből (galaxisból) származik. A Nap korpuszkuláris sugárzását alkotó részecskék – főként protonok, elektronok – energiaspektruma elég széles, több GeV-től mintegy 100 eV-ig terjed (az eV az az energia, amellyel 1 V-nyi potenciálkülönbség egy elektron energiáját megnöveli).

3. ábra A Nap röntgen sugárzásának a változása egy napkitörés idején



A Nap esetében az energiaspektrumban a legnagyobb energiájú részecskék erős napkitörésekkel (ezeket proton fléreknek is szokták nevezni) vannak kapcsolatban, amelyek ritkák. Az ennél kisebb energiájú részecskék közepes, vagy a gyenge napkitörések idején észlelhetők. A legkisebb energiájú részecskék a Nap koronájából származnak és a korona magas (több millió K°) hőmérséklete által okozott állandó hőtágulással függenek össze. Mivel a Föld a Nap óriási kiterjedésű koronájában (a Nap légkörének külső részében) kering, az említett hőtágulást a Föld körüli térségben a Nap felől „fújó szélként” érzékeljük és napszélnek nevezzük.

A másik a Földet érő korpuszkuláris sugárzás a tejútrendszerből származik és részecskéinek energiája 10⁵eV-től 10²⁰eV-ig terjed. A galaktikus kozmikus sugárzást protonok, hélium atommagok, továbbá könnyű, közepes és nehéz atommagok alkotják. Mind a Nap korpuszkuláris sugárzását alkotó, mind a galaktikus kozmikus sugárzásban terjedő részecskék bejutása a Föld légkörébe energiájuktól függ. Minél nagyobb a részecske energiája, annál nagyobb mélységig, akár a Föld felszínéig is eljuthat. Ezt a behatolást azonban a Föld mágneses terének mágneses dipólussal közelíthető belső része korlátozza. A behatolás lehetősége a Földrajzi szélességgel növekszik.

Az elmondottakból következik, hogy a Nap elektromágneses sugárzásán kívül a Nap korpuszkuláris és a galaktikus kozmikus sugárzás ionizáló hatása is érvényesül a légkörben. Átlagosan Egy levegő molekula ionizációjához átlagosan 24 eV energia szükséges.

2. Az ionoszféra szerkezete és a rádióhullámok terjedése

Mint azt a bevezetésben már említettük, a különböző gázok ionizációjához különböző energia szükséges. A levegő összetétele a magassággal változik. A magasság növekedésével mintegy 110 km magasságig a levegőt alkotó gázok koncentrációja egymáshoz viszonyítva nem változik. Erről a légkörben működő keverő mozgások (turbulencia) gondoskodnak. 110 km felett azonban ezek a keverő mozgások a magasság további növekedésével gyorsan háttérbe szorulnak, megindulhat a gázoknak a Föld nehézségi erőterében történő molekulasúly szerinti elkülönülése. Ennek következtében a nagyobb molekulasúlyú argon, oxigén és nitrogén molekulák koncentrációja a magassággal gyorsabban csökken, mint az ezeknél kisebb molekulasúlyú oxigén atomok, hélium és hidrogén molekulák koncentrációja. Így a magassággal változik a legnagyobb koncentrációjú gáz típusa.

Az ionoszféra kialakulása a Nap elektromágneses sugárzása és az elektromos szempontból semleges légkör közötti kölcsönhatás eredménye. Az ionoszféra tehát abban a magasságban jön létre, ahol a Nap elektromágneses vagy korpuszkuláris sugárzása még az ionizációhoz elegendő energiát hordoz és a légkör

magasság növekedésével csökkenő sűrűsége még elegendő a kölcsönhatás, vagyis az ionizáció létrejöttéhez. Ez a magasságtartomány kb. 60 km-től megállapodás értelmében 1000 km-ig terjed (4. ábra).

Az ionizáció következtében keletkező elektronok és ionok sűrűsége a magasság változásával rétegződést mutat. Az állandó rétegeket alulról felfelé az ABC betűvel jelölik. A legalacsonyabban fekvő, vagy ionoszféra alsó részében megkülönböztethető egyik rétegződés a D tartomány (60-90 km). A D tartomány kialakulását részben a galaktikus kozmikus sugárzás, részben a Nap kemény röntgensugárzása által okozott ionizáció idézi elő.

Ez azzal függ össze, ahhoz, hogy az ionizáló sugárzás ilyen mélyre, mintegy 60 km-ig hatolhasson be a légkörbe, nagy energiájúnak kell lennie. Az ionizáció eredményeként az elektronok mellett nagyrészt molekuláris oxigén ionok (O_2^+) és nitrogénionok (NO^+) keletkeznek. A D tartományban az elektronok és ionok koncentrációja a magasság növekedésével parabolaszerű növekedést mutat.

A D tartományban az elektronsűrűség az ionizáló sugárzás megszűnésével az éjszakai órákban nagyon alacsony szintre csökken. A D tartomány felett az elektronsűrűség magassággal történő változásában jól megkülönböztethető rétegződésként jelentkezik az E tartomány. Az E tartományban (90-150) az E réteg képezi a maximális elektronsűrűséget. Az E réteg felett, mintegy 110 és 150 km között az elektronsűrűség alig változik. Az éjszakai órákban itt az elektronsűrűség csökkenése (valley) is előfordulhat, amely az ionoszféra vizsgálatára még ma is leggyakrabban alkalmazott módszerrel, az ionoszféra függőlegesen kisugárzott változó frekvenciájú (1-20 MHz) rádióhullámokkal történő szondázásával nem mutatható ki. Az E tartományban a semleges légkör összetétel-változásának megfelelően a legnagyobb koncentrációban előforduló O_2^+ és NO^+ ionok mellett a magasság növekedésével növekszik az O^+ ionok koncentrációja. Az E tartomány felett található F tartományban (150-1000 km) az elektronsűrűség tovább növekszik, a legnagyobb koncentrációban jelenlevő ion pedig az O^+ lesz.

A nappali órákban a nyári hónapokban két rétegződés különböztethető meg az F tartományban. A 180 km körül fellépő F1 réteg a maximális ionizációnak megfelelő rétegződés, míg a magasabban 250 km körül ki-

alakuló F2 réteg az ionoszférában a maximális elektronsűrűséget képviseli. Mivel az F1 réteg kialakulása az ionizációval függ össze és az ionizációt előidéző, Napból érkező elektromágneses sugárzás a nappali órákra korlátozódik, a megvilágítottság megszűnésével az F1 réteg is feloszlik. Az F2 rétegben az elektronsűrűség éjszakai fennmaradása a töltésszemlegesítés (rekombináció) kis sebességével függ össze. Az F2 réteg felett az elektronsűrűség a magasság növekedésével exponenciális csökkenést mutat, amelyet az előbbiekben említett ionoszféraszondázással már nem lehet követni.

3. A naptevékenység hatásai az ionoszférára és a rádióhullámok terjedésére

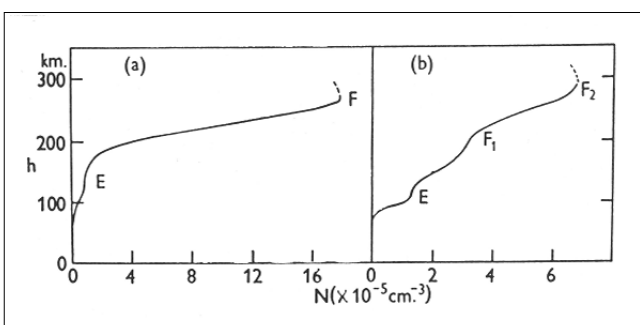
A naptevékenység hatásait két részre oszthatjuk, a Nap elektromágneses sugárzásának a naptevékenységgel összefüggő változásai és a Nap korpuszkuláris sugárzásának a naptevékenységgel történő változásai hatására.

3.1. A Nap elektromágneses sugárzásának hatása a rádióhullámok terjedésére

Amint azt a bevezetésben már említettük, a Nap elektromágneses sugárzásának a változásai részben a naptevékenység többé-kevésbé periodikus változásaihoz kapcsolódnak, részben véletlen jellegű előfordulásúak. Az elektromágneses sugárzás többé-kevésbé periodikus változásai, mint a kvázi 11 éves naptevékenységi ciklus, vagy a 27 napos tengelykörüli forgással összefüggő sugárzás változás mindkét esetben a 2. ábra alapján az elektromágneses sugárzás extrém ultrabolya és röntgen sugárzásának a naptevékenységgel történő növekedését, illetve csökkenését idézi elő. Ennek megfelelően növekszik, illetve csökken az elektronsűrűség az ionoszféra minden tartományában.

Az elektronsűrűség naptevékenységgel összefüggő változásának kifejezésére empirikus formulák állnak rendelkezésünkre minden rétegződésre vonatkozóan. Az elektronsűrűség növekedése a rádióhullámok terjedésében a frekvencia és az elektronsűrűség egymáshoz viszonyított nagyságától függően a rádióhullámok erősödését és gyengülését is okozhatja. A rádióhullámok amplitúdójának változása, abszorpciója az ionoszférába való belépéstől a visszaverődés magasságáig, illetve visszaverődést követően az ionoszférából való kilépésig a rádióhullámok által az ionoszférában megtett úton előidézett abszorpcióból (non-deviatív abszorpció) és a visszaverődés környezetében létrejövő abszorpcióból (deviatív abszorpció) tevődik össze. Ha a visszaverődési magasság alatt az ionoszférában számottevő az abszorpció, mint például az E rétegből történő visszaverődés esetén a D tartományban nappal, akkor a non-deviatív abszorpció dominál. Ha a visszaverődés magassága alatt nem jön létre számottevő abszorpció, mint a D tartományban éjszaka, az E rétegből

4. ábra Az elektronsűrűség (N) változása a magassággal (h) (Ratcliffe, 1960)



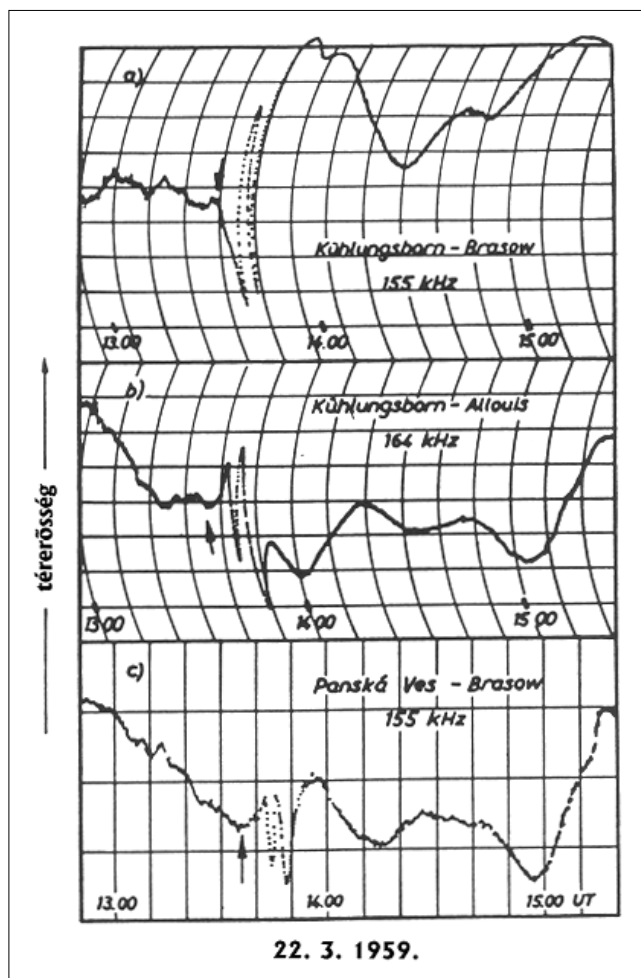
történő visszaverődés esetén a deviative abszorpció a uralkodó. Ez a helyzet a rádióhullámok hosszú (LF) és középhullámú (MF) sávjában. Minden esetben figyelembe kell venni azt is, hogy például hosszú távú összeköttetés esetén a visszaverődés nappali ionoszférában, vagy éjszakai állapotú ionoszférában történik-e. Az utóbbi helyzet a kedvezőbb. A forgalmazás, illetve vételi lehetőség ezeken a frekvenciákon naplementétől napkeltéig kedvezőbb, mint a nappali órákban.

Az F1 réteg esetében azt mondhatjuk, hogy mivel csak a nappali órákban van jelen és akkor is csak a nyári hónapokban, a F1 réteg felhasználhatósága átvitel szempontjából korlátozott és a nappali órákban alatta kialakult ionoszféra tartományokban létrejövő non-deviative abszorpció következtében gyenge vételi viszonyokra számíthatunk mind az MF, mind a HF hullámhossz sávban. Az F2 réteg felhasználásával történő forgalmazás esetén a rövidtávú összeköttetések esetén a nappali órák szintén kedvezőtlenek. Hosszú távú forgalmazásnál a visszaverődés az éjszakai állapotú ionoszférában történhet és ez javíthatja a vételi viszonyokat.

A Nap elektromágneses sugárzásának a naptevékenységgel összefüggő periodikus változásai a hosszú periódus következtében lassú lefolyásúak. Így a rádióhullámok terjedésére gyakorolt hatásuk is lassan változik, napról-napra történő változása szinte nem is észlelhető. Az elektromágneses sugárzás napkitörésekkel összefüggő véletlen előfordulású, gyors növekedése azonban már viszonylag gyors és a rádióhullámok terjedése szempontjából kedvezőtlen változásokat hozhat létre. Szerencsére ez a növekedés csak rövid ideig (~1 óra) tart (lásd 3. ábra).

A napkitörések által az ionoszférában előidézett változásokat összefoglaló névvel hirtelen ionoszférikus zavaroknak (SID – sudden ionospheric disturbances) nevezik. Ezek a zavarok szinte a teljes rádiófrekvenciás tartományban észlelhetők. A LF sávban a villámok elektromágneses sugárzásától származó légköri rádiózaj (atmospheric radio noise) szintje általában növekedni szokott (SEA – sudden enhancement of atmospheric, atmospheric-nek vagy röviden sferics-nek nevezik egy villám elektromágneses sugárzásának azt a részét, amely a Föld felszíne és az ionoszféra alsó határa által képezett hullámvezetőben terjed). A rádióhullámok ugyanis a Nap megnövekedett extrém ultraibolya és röntgen sugárzásával összefüggő ionizációnövekedés következtében a D tartomány felső és az E tartomány alsó részében verődnek vissza. Ez csökkenti az abszorpció hatását. A VLF sávban a Nap elektromágneses sugárzásának a növekedése a rádióhullámok amplitúdójában is észlelhető. Ezt a jelenséget hirtelen amplitúdó anomáliának nevezik (SFA – sudden field anomaly).

Az SFA relatív fázismérés útján is kimutatható, amennyiben feltételezzük, hogy a felületi hullám fázisa nem változik. Mivel a megnövekedett ionizáció következtében csökken a visszaverődés magassága (a napkitöréssel járó elektromágneses sugárzásváltozás a rönt-



5. ábra
Napkitörés hatása a hosszúhullámú (LF) rádióhullámok terjedésére, hirtelen fázis és amplitúdóváltozás (SFA) (Entzian, 1966)

gen tartományban idézi elő a legnagyobb változást) az ionizáló sugárzás behatolása a légköbe megnő. Ennek a visszavert rádióhullámok útjának a rövidülése az eredménye, amely az eredő térerősségben fázis, illetve amplitúdóváltozással jár (5. ábra).

Mivel a forgalmazás legnagyobb része az F2 réteg felhasználásával történik, ezért a legfontosabb a napkitörésekkel járó elektromágneses sugárzásnövekedés hatása a HF sávban, amelyet rövidhullámú „elhalkulás”-nak (SWF – short wave fade-out) neveznek. A rövidhullámú „elhalkulás” az F2 réteg felhasználásával történő forgalmazást teljesen lehetetlenné teszi, amennyiben a HF rádióhullámokat a Nap röntgen tartományban megnövekedett elektromágneses sugárzása által a D és E tartományban létrehozott megnövekedett elektronsűrűség rétegű „elnyeli”.

A SWF tehát ily módon akár egy órára is megszűnteti a forgalmazás lehetőségét. A hirtelen ionoszféra zavarokhoz sorolható még a kozmikus rádiózaj abszorpciójának hirtelen megnövekedése (SCNA – sudden cosmic noise absorption), amelyet a HF tartományban lehet észlelni, ahol az ionoszféra más részben átlátszó a rádióhullámok számára. Megemlíthető még a hirtelen frekvenciaváltozás (SFD – sudden frequency deviation).

A napkitörésekkel járó elektromágneses sugárzásnövekedés hatása a rádióhullámok terjedésére annál nagyobb, minél közelebb van a visszaverődés pontja a sugárzás függőleges beesési pontjához (subsolar pont).

3.2. A Nap korpuszkuláris sugárzásának hatása a rádióhullámok terjedésére

A Nap korpuszkuláris sugárzásának a naptevékenységgel összefüggő változása már mélyrehatóbb és hosszabb ideig tartó változásokat hoz létre az ionoszférában. Míg az elektromágneses sugárzás napkitöréssel kapcsolatos növekedése a napkitörés időpontjától számított 8 perc múlva észlelhető a Föld nappali oldalán, addig a korpuszkuláris sugárzás növekedésének átlagosan két napra van szüksége, hogy elérje a Föld környezetét. Ez az idő a napkitörés helyétől és erősségétől függ. Ha a napkitörés a napkorongnak a Föld felől nézve a bal (azaz a keleti) oldalán jön létre, a korpuszkuláris sugárzásváltozás elkerüli a földet, így háttalan marad.

A korpuszkuláris sugárzás változásának a hatása csak akkor érvényesül, ha az a látható napkorong Föld felől nézve jobb (azaz nyugati) oldalán keletkezik. Az utóbbi esetben a napkitörés időpontjától számítva annál rövidebb idő múlva észlelhető a korpuszkuláris sugárzás változása, a részecskék fluxusának a növekedése és a hatás az ionoszférában annál nagyobb, minél erősebb a napkitörés. A korpuszkuláris sugárzás növekedését tulajdonképpen a Naptól kidobódott anyag bolygóközi térben felhőként történő terjedése idézi elő. Ez a felhő a Föld mágneses terében bonyolult folyamatokat indít el. Ezeknek a folyamatoknak a következménye az ionoszférában is észlelhető ionoszférikus vihar (a geomágneses viharral egyidőben). Az ionoszférikus vihar közepes földrajzi szélességeken a forgalmazásra alkalmazott F2 rétegben általában az elektronsűrűség gyakran több napig tartó csökkenésének formájában nyilvánul meg.

Kis földrajzi szélességeken az ionoszférikus vihar az elektronsűrűség növekedéseként észlelhető. Az ionoszféra többi tartománya közül a napkitöréssel járó korpuszkuláris sugárzásnövekedésnek – a Föld mágneses terében elindított folyamatokat tekintve – csak a D tartományban van még nagyobb közepes földrajzi szélességeken hatása. Itt ugyanis az ionoszférikus vihar időszakában az elektronsűrűség több napos, akár 10 napig is eltartó növekedését idézi elő. Ami az ionoszférikus viharok a rádióhullámok terjedésére gyakorolt hatását illeti, közepes földrajzi szélességeken az F2 réteg segítségével történő forgalmazás kedvezőtlenebbé válását idézi elő. Ezt még növelheti a D tartományban megnövekedett elektronsűrűség által okozott abszorpció.

Összefoglalva a naptevékenység változásaival változó elektromágneses és korpuszkuláris sugárzás rádióhullámok terjedésére gyakorolt hatása az ionoszféra állapotának a változásain keresztül érvényesül. A terjedési viszonyok kedvezőtlenebbé válásával, az F2 réteg felhasználásával nagy távolságra történő forgal-

mazás hatékonyságának csökkenése várható az elektromágneses sugárzás napkitöréssel való növekedése esetén (SWF).

A rádióhullámok abszorpciójának ezzel kapcsolatos növekedése a nappali oldalon ugyan rövid ideig tart, de zavarja a forgalmazás folyamatosságát. A MUF (maximum usable frequency) a megnövekedett abszorpció ellensúlyozó hatása növekedhet. A korpuszkuláris sugárzás napkitörést követő növekedésének következményeként az elektronsűrűség közepes földrajzi szélességeken fellépő csökkenésével a MUF csökken. Annak ellenére, hogy a D tartományban a rádióhullámok abszorpciója növekszik. Ugyanakkor kis szélességeken az elektronsűrűség növekedése miatt a MUF növekszik. Erre abban az esetben kell ügyelni, ha az adótól délre fekvő vevő felé történik a forgalmazás. Ha a rádióhullámok terjedésének az útja északi irányban, a sarkvidéken keresztül vezet, erős abszorpcióval kell számolni, amely a D tartományban létrejövő elektronsűrűség-növekedéssel függ össze.

4. Rádióhullámok transzionszférikus terjedésével összefüggő ionoszférikus hatások

Eddig a rádióhullámoknak az ionoszféra közvetítésével történő terjedésével, illetve a naptevékenység által előidézett ionoszférikus változások hatásával foglalkoztunk. Az űrkorszak beköszöntével azonban egyre elterjedtebbé vált a rádióhullámok transzionszférikus terjedésének alkalmazása. A mesterséges holdakkal, emberes űrrepülésekkel összefüggésben a kapcsolattartás csak transzionszférikus terjedés útján lehetséges. Az űreszközök alkalmazása szükségessé tette az energiafelhasználás minimális értékre való szorítását érdekében az adóteljesítmény csökkentését, a transzionszférikus kapcsolat fenntartásához pedig a frekvencia növelését.

A frekvencia növelését nemcsak az a tény tette szükségessé, hogy a rádióhullámok átjussanak az ionoszférán, hanem az is, hogy az ionoszférában minél kisebb veszteséget szenvedjenek. A csökkentett adóteljesítmény mellett, csak így lehet megfelelő jel/zaj viszonyt elérni. A transzionszférikus terjedés alkalmazása azonban még így sem problémamentes. A frekvencia növelésével a hullámhosszúság csökken és előtérbe kerülnek az ionoszféra elektronsűrűségében mutatózó, különböző térbeli kiterjedésű irregularitások. Addig míg a rádióhullámok hullámhosszúságához viszonyítva ezeknek az irregularitásoknak a mérete elhanyagolható volt, a terjedést nem befolyásolhatták. Amint azonban a rádióhullámok hullámhosszúsága az irregularitások méretéhez közelít, nem terjedést kedvezőtlenül befolyásoló jelenségek (diffrakció, szóródás) léphetnek fel. Az ionoszférában az irregularitások két fő típusát különböztethetjük meg. Az egyik a szporadikus E réteg, a másik a spread F jelenséget létrehozó irregularitások.

4.1. Az ionoszféra sporadikus E (Es) rétege

Már az elnevezés is jelzi, hogy ennek az ionoszféra E tartományában keletkező rétegződésnek az előfordulása nem szabályszerű. Az előfordulással kapcsolatban elmondható, hogy a Nap bármely órájában észlelhető, de az előfordulás a nyári hónapokban a leggyakoribb, a teli hónapokban még egy-egy napot tekintve is ritka. Az Es rétegek előfordulásának a száma a naptevékenység növekedésével csökken, közepes földrajzi szélességen nyáron a naptevékenységi maximum időszakában mintegy 20-30%-kal kevesebb az előfordulás. A geomágneses tevékenységgel az előfordulás alig változik. Egyébként a rétegződés élettartama egy fél napnál is hosszabb lehet. A rétegződés magassága a nap folyamán változik, szinte szabályszerűen a reggeli óráktól az E réteg feletti magasságokból kiindulva az esti órákra magasságából fokozatosan veszítve.

Inkoherens és koherens radarmérések azt mutatták, hogy az Es rétegekben a rétegbe beágyazódva a réteg elektronsűrűségénél nagyobb elektronsűrűségű „foltok” fordulnak elő, amelyek egymástól több kilométer távolságban követik egymást a rétegben. Ennek alapján, mivel az Es rétegek vastagsága általában kicsi (km nagyságrendű), hullámterjedés szempontjából az Es réteget vékony diffrakációs rácsnak tekinthetjük. A rács legfontosabb paramétere a „foltok”, mint rácsponatok közötti átlagos távolság. Ennek a távolságnak a rádióhullámok hullámhosszához viszonyított nagysága határozza meg az Es rétegnek a terjedésre gyakorolt hatását. A HF és VHF sávban az Es rétegek nagy távolságokra történő forgalmazást tesznek lehetővé, míg az UHF sávban a rádióhullámok szintillációját idézik elő.

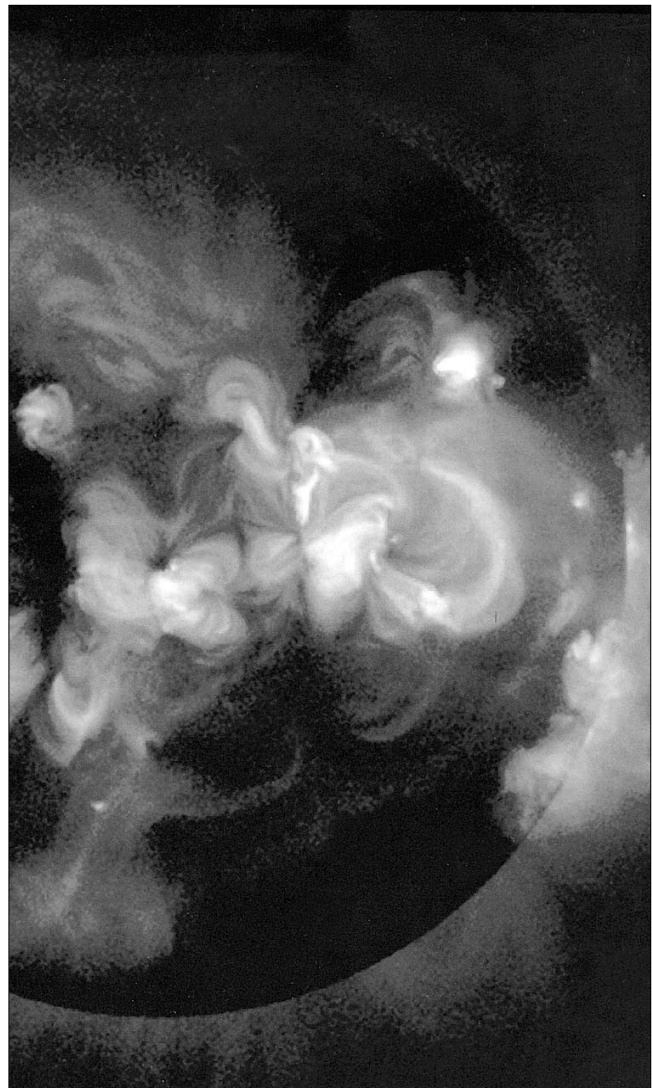
4.2. A spread F jelenséget előidéző irregularitások

A spread F jelenséget a változó frekvenciájú, függőleges irányban kisugárzott rádióhullámokkal végzett ionoszféraszondázás ionogramjain az ionoszféra F tartományából érkező szórt visszaverődések hozzák létre. A szóródás egyrészt annak a következménye, hogy visszaverődések nemcsak függőleges irányból, hanem attól kissé eltérő irányból is érkeznek, másrészt az adóantenna „látókörén” belül változik az elektronsűrűség. Az elektronsűrűség változását ún. plazma instabilitások hozzák létre. Ezek nemcsak az F tartomány magasságára kiterjedő elektronsűrűség-irregularitásokat hoznak létre, hanem az irregularitások a mágneses erővonalmenti kiterjedéssel is rendelkeznek. A spread F jelenség nagyrészt az éjszakai órákban fordul elő és télen gyakoribb, nyáron ritka. A spread F előfordulása a naptevékenységgel általában alig változik.

Összefoglalva az elmondottak a rádióhullámok transzionoszférikus terjedésének felhasználása szempontjából arról adhatnak felvilágosítást, hogy napszakot és évszakot tekintve mikor a legkedvezőbbek a körülmények. Az ionoszférikus irregularitások előfordulása a transzionoszférikus összeköttetés számára a nyári nappali órákat teszi a legalkalmasabbá, bár az Es rétegek jelenléte éppen a nyári hónapokban hathatza varólag.

Irodalom

- [1] Bencze P. (1965):
Kandidátusi értekezés, Sopron.
- [2] Bencze P.(1994):
Légkörfizika, Kézirat, Sopron.
- [3] Entzian, G. (1966):
Sonneneruptionseffekte im Langwellenbereich. Vorträge der Sommerschule Untere Ionosphäre, Kühlungsborn, 1964 (ed. E. A. Lauter).
NKG der DDR, Deutsche Akademie der Wissenschaften zu Berlin, Berlin.
- [4] Knuth, R. (1966):
Spezielle Untersuchungen zum Nachwirkungseffekt in der Langwellenabsorption. Vorträge der Sommerschule Untere Ionosphäre, Kühlungsborn, 1964 (ed. E. A. Lauter). NKG der DDR,
Deutsche Akademie der Wissenschaften zu Berlin.
- [5] Pap, J. M. Fröhlich, E. (1999):
Total solar irradiance variations.
J. Atmos. Solar-Terr. Phys., 61, pp.15-24.
- [6] Ratcliffe, J. A. (1960):
Physics of the Upper Atmosphere.
Academic Press, New York



Elektromágneses impulzusok terjedésének vizsgálata különböző közegekben

ERHARDTNÉ FERENCZ ORSOLYA * és FERENCZ CSABA **

* ELTE (Geofizikai Tanszék) Űrkutató Csoport, tudományos munkatárs

** MTA-ELTE Geoinformatikai és Űrtudományi Kutató Csoport vezetője

ELTE Környezetfizikai Tanszékcsoporthoz

spacerg@sas.elte.hu

Kulcsszavak: űrkutatás, hullámterjedés, plazmaszféra, rádiójelek

Az űrkutatás, a távközlés és számos más kutatási terület fontos részét képezi az elektromágneses impulzusok terjedésének vizsgálata különböző közegekben. Ez a vizsgálat magában foglalja a tranziens, bekapcsolási jelenségeket is. A cikk röviden bemutatja a Maxwell-egyenletek megoldásának módszerét általános alakú jeleket feltételezve, anizotróp plazmában, szabad-téri valamint vezetett hullámok esetén, homogén illetve térben inhomogén közeget feltételezve, néhány fontos modell-számítási eredményt is szemlélítve.

1. Bevezetés

A hullámterjedésben az impulzusok különböző közegekben történő terjedésének hagyományos tárgyalása az ismert monokromatikus megközelítéseken alapul, alkalmazva a Maxwell-egyenletek megoldása során az $\exp(j\omega t)$ típusú jelalakra vonatkozó megoldásokat (ahol t az időt, ω a körfrekvenciát jelöli). Ezekben a levezetésekben az impulzust, mint különböző frekvenciájú monokromatikus jelek szuperpozícióját írják le (pl. [1]).

A megoldási módszerek azokat a fogalmakat, paramétereket használják fel, amelyek kizárólag monokromatikus megoldások esetén definiálhatóak (permittivitás, diszperziós egyenlet stb.) Továbbá a Fourier-transzformációt úgy alkalmazzák, hogy nem veszik figyelembe a jel tranziens jellegét, amennyiben az idő szerinti integrál alsó határértékét ugyan zérusnak veszik, ám nem veszik figyelembe a kezdeti értékeket, tehát ezt a transzformációt (ami így inkább Laplace, mint Fourier) matematikailag inkorrekt módon alkalmazzák impulzusok esetére (pl. [2]). Egy valóban általános alakú tranziens jel (impulzus) azonban sohasem monokromatikus, a kezdeti értékek épp a tranziens jelleg miatt nem hagyhatóak figyelmen kívül, és semmiféle olyan megközelítés nem használható fel a korrekt megoldás során, mely kiindulásként monokromatikus jelalakot tételez fel.

Cikkünk olyan új megoldást mutat be, amely az Inhomogén Alapmódusok Módszerét (ang. rövid: MIBM, [3,4]) alkalmazva úgy oldja meg a Maxwell-egyenleteket, hogy elkerüli a korábbi módszerek monokromatikus megközelítéseit. A modellek egyrészt anizotróp plazmában történő síkhullám-terjedésre vonatkoznak, másrészt vákuummal töltött négyszög keresztmetszetű csőtápvonalon fellépő vezetett hullámokra. Az előbbi modell jól írja le a Föld magnetoszférájában is megfigyelhető, villámok által (is) gerjesztett ELF-VLF frekvencia-tartományba eső jelek terjedését (whistlerek), és az úgynevezett TiPP-jelenséget (Transionospheric Pulse Pairs) a magasabb frekvencia-tartományban [5]. Az utóbbi pedig többek között a Föld-ionoszféra hullámvezetőben fellépő impulzus-terjedést (szferixek) modellezi hatékonyan.

További érdekes és mostanáig megválaszolatlan kérdés a monokromatikus és nem-monokromatikus jelek (pl. impulzusok) terjedésének pontos leírása tetszőlegesen inhomogén közegekben.

Monokromatikus elektromágneses jelek inhomogén közegben történő terjedésének hagyományos hullámterjedési modelljei – például az eikonál-egyenlet, a W.K.B. módszer, az általánosított terjedési vektor stb. – közös és alapvető pontatlanságot hordoznak magukban a jel fizikai szerkezetének koncepcióját illetően [1]. Ezekben a megközelítésekben a megoldást az előre haladó és a reflektált jelrészek összegeként írják fel, ahol ezek a jel-részek önmagukban, külön-külön is megoldásai a Maxwell-egyenleteknek.

A valóságban azonban csak a teljes energia, azaz az előre haladó és a reflektált jel együttese elégíti ki a Maxwell-egyenleteket. Tehát a valódi, teljes megoldásnak mindig tartalmaznia kell az összes fellépő módust.

Jól ismert tény, hogy egy lineáris differenciálegyenlet-rendszer megoldásainak összege szintén megoldása az egyenletrendszernek. Azonban ez nem jelenti azt, hogy egy, az egyenletrendszert kielégítő megoldásnak valamilyen elvi megközelítés alapján elkülönített részei önmagukban automatikusan kielégítenék az eredeti egyenleteket. Mivel az inhomogenitás jelenlétében mindig fellép a reflexió jelensége, a Maxwell-egyenleteket csak és kizárólag a terjedő és a reflektált jelrész összege elégíti ki, e jelrészek külön-külön nem.

A cikkben bemutatunk új, zárt alakú megoldásokat tetszőlegesen erősen inhomogén közegben (például inhomogén előmágnesezett plazma, amíg a hullámfront definiálható marad) terjedő és reflektálódó monokromatikus és nem-monokromatikus (impulzus) jelekre. Ezek a megoldások pontosan leírják a terjedő és reflektált jelrészek energiaviszonyait. Alkalmazási példaként rövid impulzusnak az ionoszféráról történő reflektálódását mutatjuk be különböző elektron-sűrűség profilok esetén.

Tekintve a cikk összefoglaló jellegét, csak a számítások és modellek alapösszefüggéseire, a megoldások

pontos alakjának ismertetésére és néhány numerikus eredmény bemutatására szorítkozunk, eltekintve a részletes levezetésektől.

2. Impulzusok terjedése anizotróp plazmában

Az általános alakú nem-monokromatikus jellel (impulzussal) gerjesztett síkhullámok anizotróp előmágnesezett plazmában történő terjedésének megoldása az Inhomogén Alapmódusok Módszerét és a többdimenziós Laplace-transzformációt használja fel, közvetlenül a Maxwell-egyenletekből kiindulva. A teljes elméleti levezetés megtalálható például [6]-ban.

A vizsgált közeg lineáris, a gerjesztő jel időben és a terjedés irányában tetszőleges alakú síkhullám. Amint az a hálózat-elméletből is ismert, egy lineáris rendszer Dirac gerjesztésre adott válasza a hálózat átviteli függvénye. Más gerjesztések hatása így az átviteli függvény és a gerjesztés konvolúciójával meghatározható. Így a legfontosabb tehát meghatározni a Diracra adott választ a különböző közegekben.

A terjedés a modellben az előmágnesező térrel párhuzamos. A plazma egykomponensű (elektron), illetve többkomponensű (elektron és egy vagy több fajta pozitív ion), temperált, hideg és időinvariáns. A plazma és a girofrekvenciát szokott módon ω_p és ω_b jelöli, Z_0 pedig a vákuumbeli hullámimpedancia. A gerjesztés a plazmán kívül, vákuumként figyelembe vett rétegben lép fel, a két réteget a modellben határfelület választja el egymástól (1. ábra).

A megoldás során a Maxwell-egyenletekből és a jelközeg kölcsönhatási egyenletből indulunk ki, teljesen általános jelalakot feltételezve. A hely és idő szerinti Laplace-transzformálás során a differenciálegyenletekbe automatikusan bekerülnek a kezdeti értékek, melyek ismeretlen mennyiségek. Az Inhomogén Alapmódusok Módszerét alkalmazva, és a Heaviside-disztribúcióval kapuzva a modell egyes tér-szegmenseiben fellépő térerősségeket, a Maxwell-egyenletek automatikusan két csoportra esnek szét. Az egyik csoport az egyes szegmenseken belül érvényes megoldásokat (alapmódusok) adja meg, míg a másik csoport a szeg-

menseket elválasztó határfelületeken érvényes úgynevezett csatoló-egyenletek rendszere. Itt válik döntően fontossá a kezdeti értékek figyelembevétele, mivel ezeket a kezdeti értékeket éppen a csatoló-egyenletek ki-elégítésével kapjuk meg, így nyerve a megoldás teljes és pontos, zárt alakját. Nyilvánvaló, hogy valódi, térben és időben tranziens jelek esetén soha nem hagyhatóak figyelmen kívül ezek a kezdeti értékek. Bizonyos modellekben ugyan nulla értékűnek vehetők, ám ez csak speciális feltételek fennállása esetén igaz.

A gerjesztés spektrumát az alábbi alakban kapjuk meg:

$$I_{x0}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\int_0^{x_0} J_0\left(\xi, t - \frac{x_0 - \xi}{c}\right) d\xi \right] \cdot e^{-j\omega t} dt \quad (1)$$

Az elektronplazmában fellépő elektromos és mágneses térerősségek pedig a következők szerint adódnak:

$$E_z(x, t) = -\frac{Z_0}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} I_{x0}(\omega) \frac{k_0(\omega)}{k_0(\omega) + k_1(\omega)} e^{j[\omega t - k_1(\omega)(x-x_0)]} d\omega, \quad (2)$$

$$H_y(x, t) = \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{+\infty} I_{x0}(\omega) \frac{k_1(\omega)}{k_0(\omega) + k_1(\omega)} e^{j[\omega t - k_1(\omega)(x-x_0)]} d\omega.$$

ahol

$$k_1(\omega) = \frac{1}{c} \sqrt{\frac{\omega\omega_b\omega_p^2 + \omega^2(\omega_p^2 + \omega_b^2 - \omega^2)}{\omega_b^2 - \omega^2}} = k_0 \sqrt{1 + \frac{\omega_p^2}{\omega(\omega_b - \omega)}}, \quad k_0 = \frac{\omega}{c} \quad (3)$$

A többkomponensű plazmában a térerősség-komponensek az alábbiak:

$$E_{ze} = -\frac{Z_0}{4\pi} \int_{-\omega_{\max}}^{\omega_{\max}} \frac{k_0(\omega)}{k_0(\omega) + k_1(\omega)} I_{x0}(\omega) \cdot e^{j[\omega t - k_1(\omega)(x-x_0)]} d\omega \quad (4)$$

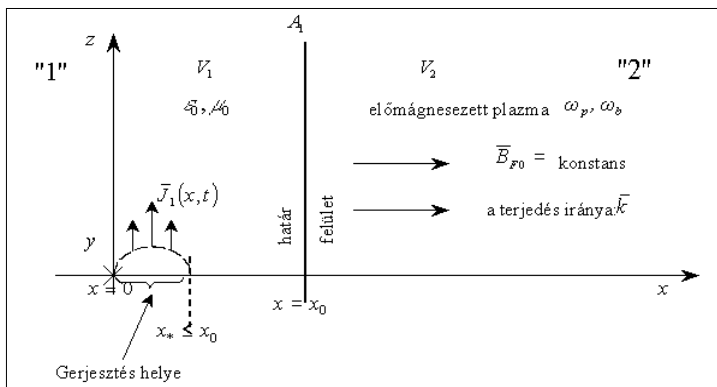
$$E_{zi} = -\frac{Z_0}{4\pi} \int_{-\omega_{\max}}^{\omega_{\max}} \frac{k_0(\omega)}{k_0(\omega) + k_3(\omega)} I_{x0}(\omega) \cdot e^{j[\omega t - k_3(\omega)(x-x_0)]} d\omega$$

ahol (5)

$$k_1 = \frac{1}{c} \sqrt{\frac{-\omega^2(\omega_p^2 + \omega_{be}^2 - \omega^2) + \omega\omega_p^2\omega_{be} + \omega^2 \sum_{i=1}^n \frac{\omega_{pi}^2}{\omega_{bi}^2 - \omega^2} - \omega \sum_{i=1}^n \frac{\omega_{pi}^2\omega_{bi}^+}{\omega_{bi}^2 - \omega^2}}{\omega_b^2 - \omega^2}}$$

$$k_3 = \frac{1}{c} \sqrt{\frac{\omega^2 \sum_{i=1}^n \frac{\omega_{pi}^2}{\omega_{bi}^2 - \omega^2} + \omega \sum_{i=1}^n \frac{\omega_{pi}^2\omega_{bi}^+}{\omega_{bi}^2 - \omega^2} - \omega\omega_p^2\omega_{be} + \omega^4 - \omega^2(\omega_p^2 + \omega_{be}^2)}{\omega_{be}^2 - \omega^2}}$$

1. ábra Az alkalmazott modell



Néhány modellszámítási eredményt láthatunk az 2-4. ábrákon.

Az 2. ábrán egy detektált és egy számított elektron-whistler dinamikus spektruma és időfüggvénye látható. A modell nagyon pontosan illeszthető a mért adatokhoz, akár a gerjesztő villámimpulzus jelalakjának meghatározását is beleértve.

A 3. ábrán az úgynevezett ion-whistler és az elektron-whistler dinamikus spektruma együttesen látható egy mért és egy számított esetben. Az új, pontos megoldás segítségével lehetővé vált az

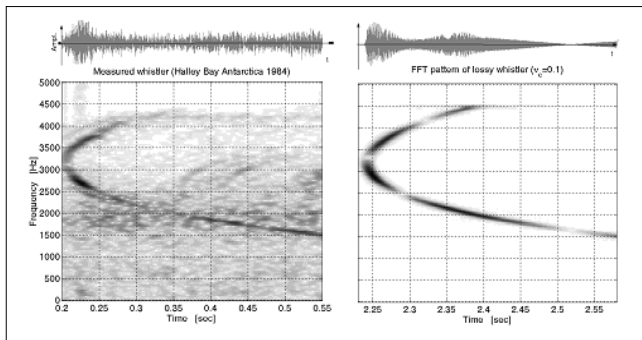
ion-whistlerek keletkezésének leírása, spektrális viselkedésük megértése.

Az új modell alapján igazolható, hogy az összes korábbi elmélettel szemben az ion-whistler nem az elektron-whistlerből keletkezik polarizációfordulással, hanem önálló, független jel. A spektrumában látható felhasadások nem önálló módusok, hanem az ioneloszlástól függően fellépő szingularitások. Mindez egy minden korábbi, monokromatikus alapú leírásnál pontosabb modell megalkotását tette lehetővé, amiből egyrészt a gerjesztő jelalakra, másrészt az ioneloszlásra kaphatunk pontos információkat.

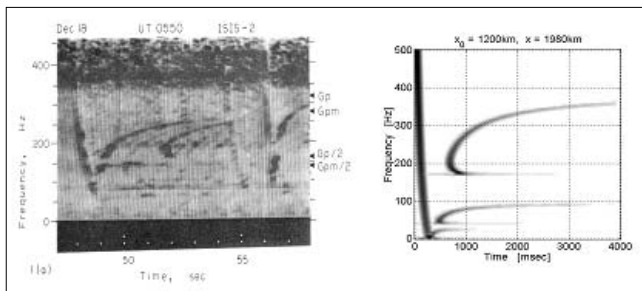
A 4. ábrán a TiPP (Transzionoszférikus Pulzus Pár) jelenség detektált dinamikus spektruma látható, mellette pedig egy, az új modell segítségével számított szimulált TiPP.

Erre a jelenségre mostanáig semmiféle magyarázat nem állt rendelkezésre. Azonban az új modellben – kihasználva, hogy rendkívül flexibilisen változtatható a gerjesztő jelalak – négyszög-impulzus gerjesztést felté-

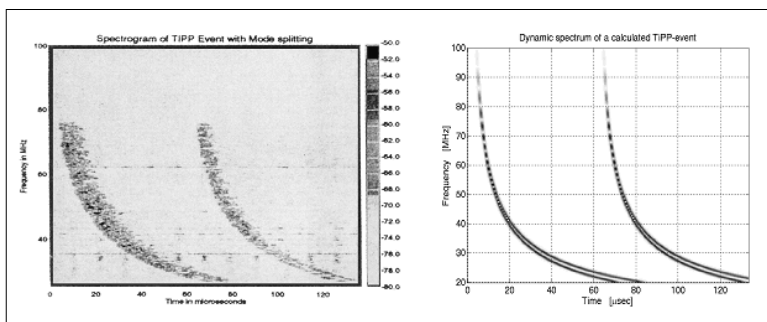
2. ábra Mért (British Antarctic Survey) és számított elektron-whistler időfüggvénye és dinamikus spektruma



3. ábra Mért (ISIS-2 műhold fedélzetén) és számított elektron- és ionwhistler dinamikus spektruma



4. ábra Mért (Alexis műhold fedélzetén) és számított TiPP dinamikus spektruma



telezve megkapjuk a szimulált eredményt. Az elméleti magyarázat konzisztensen illeszkedik fizikai, hullámterjedési ismereteink sorába. Az alacsony frekvenciatartományban is fellépő kétféle módus (ion- és elektron-whistler) a nagyfrekvenciás tartományban ismét terjedni kezd. Ez látható az egyes úgynevezett „megawhistlerekben” látható kettős spektrális nyomvonalban. Azonban amíg egy Dirac gerjesztés egyetlen „megawhistlert” okoz, a négyszögimpulzus ki- és bekapcsolása során, azaz a jel fel és lefutó éle mentén két megawhistler jelenik meg a spektrumban. Természetesen finomabban is illeszthető az egyes mérésekhez a szimulált modell, változtatva a gerjesztés alakját és a plazmaparaméterek értékét.

3. Impulzus terjedése hullámvezetőben

A vizsgált modell egy négyszög-keresztmetszetű, vákuummal kitöltött, tökéletesen vezető fémfalal határolt cső-tápvonal.

A gerjesztés általános alakú, térben és időben transziens, ám tartalmazza a vezetettség tényéből adódó megszorításokat. A megoldás során újra az MIBM és a Laplace-transzformáció eszközeit hívjuk segítségül. A részletes matematikai levezetés megtalálható [7]-ben.

A gerjesztő áramsűrűséget az alábbi alakban vesszük fel:

$$\vec{J}_1 = J_{1x} \cdot \vec{i} + J_{1y} \cdot \vec{j} + J_{1z} \cdot \vec{k}$$

$$|\vec{J}_1| = \delta(t) \cdot \delta(x) \cdot B_1(y) \cdot B_2(z) \tag{6}$$

ahol $B_1(y)$ és $B_2(z)$ a határfeltételeket magukban foglaló általános burkolófüggvények (figyelembe véve, hogy a falaknál a gerjesztésnek nulla értékűvé kell válnia):

$$B_1(0) = B_1(a) \equiv 0 \quad \text{és} \quad B_2(0) = B_2(b) \equiv 0 \tag{7}$$

A burkolók felírhatók a Fourier-sorokkal az alábbi alakban:

$$B_1(y) = \sum_{m=0}^{\infty} C_m \cdot e^{jm \frac{\pi}{a} y} \tag{8}$$

$$C_m = \frac{1}{2a} \int_{-a}^a B_1(y) \cdot e^{-jm \frac{\pi}{a} y} dy$$

és

$$B_2(z) = \sum_{n=0}^{\infty} C_n \cdot e^{jn \frac{\pi}{b} z} \tag{9}$$

$$C_n = \frac{1}{2b} \int_{-b}^b B_2(z) \cdot e^{-jn \frac{\pi}{b} z} dz$$

ahol C_m és C_n a Fourier-együtthatók, a és b a hullámvezető geometriai paraméterei, m és n egész számok:

$$m = 0, \pm 1, \pm 2, \dots$$

$$n = 0, \pm 1, \pm 2, \dots \tag{10}$$

A térerősség-komponensek tehát a következő alakban határozhatók meg:

$$\begin{aligned}
 H_x(t, x, y, z) &= \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \sum_m \sum_n \frac{P_- C_m C_n}{k_x(\omega)} \cdot e^{jT_+} \cdot e^{jM} \cdot e^{jN} - \sum_m \sum_n \frac{P_- C_m C_n}{k_x(\omega)} \cdot e^{jT_-} \cdot e^{jM} \cdot e^{jN} \right\} d\omega \\
 H_y(t, x, y, z) &= \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \sum_m \sum_n C_m C_n \sin\alpha \cdot e^{jT_+} \cdot e^{jM} \cdot e^{jN} + \sum_m \sum_n C_m C_n \sin\alpha \cdot e^{jT_-} \cdot e^{jM} \cdot e^{jN} \right\} d\omega \\
 H_z(t, x, y, z) &= \frac{-1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \sum_m \sum_n C_m C_n \cos\alpha \cdot e^{jT_+} \cdot e^{jM} \cdot e^{jN} + \sum_m \sum_n C_m C_n \cos\alpha \cdot e^{jT_-} \cdot e^{jM} \cdot e^{jN} \right\} d\omega \\
 E_x(t, x, y, z) &= \frac{-1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \sum_m \sum_n \frac{P_+ C_m C_n}{\omega \epsilon_0} \cdot e^{jT_+} \cdot e^{jM} \cdot e^{jN} + \sum_m \sum_n \frac{P_+ C_m C_n}{\omega \epsilon_0} \cdot e^{jT_-} \cdot e^{jM} \cdot e^{jN} \right\} d\omega \\
 E_y(t, x, y, z) &= \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \sum_m \sum_n \frac{[(-m\pi/a)P_+ - \epsilon_0 \mu_0 \omega^2 \cos\alpha] C_m C_n}{\epsilon_0 \omega k_x(\omega)} \cdot e^{jT_+} \cdot e^{jM} \cdot e^{jN} - \right. \\
 &\quad \left. - \sum_m \sum_n \frac{[(-m\pi/a)P_+ - \epsilon_0 \mu_0 \omega^2 \cos\alpha] C_m C_n}{\epsilon_0 \omega k_x(\omega)} \cdot e^{jT_-} \cdot e^{jM} \cdot e^{jN} \right\} d\omega \\
 E_z(t, x, y, z) &= \frac{1}{4\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left\{ \sum_m \sum_n \frac{[(-n\pi/b)P_+ - \epsilon_0 \mu_0 \omega^2 \sin\alpha] C_m C_n}{\epsilon_0 \omega k_x(\omega)} \cdot e^{jT_+} \cdot e^{jM} \cdot e^{jN} - \right. \\
 &\quad \left. - \sum_m \sum_n \frac{[(-n\pi/b)P_+ - \epsilon_0 \mu_0 \omega^2 \sin\alpha] C_m C_n}{\epsilon_0 \omega k_x(\omega)} \cdot e^{jT_-} \cdot e^{jM} \cdot e^{jN} \right\} d\omega
 \end{aligned} \tag{11}$$

ahol

$$P_+ = m \frac{\pi}{a} \cos\alpha + n \frac{\pi}{b} \sin\alpha \quad P_- = -m \frac{\pi}{a} \cos\alpha + n \frac{\pi}{b} \sin\alpha$$

$$T_+ = \omega t + k_x(\omega) \cdot x \quad T_- = \omega t - k_x(\omega) \cdot x$$

$$M = m \frac{\pi}{a} y \quad N = n \frac{\pi}{b} z \tag{12}$$

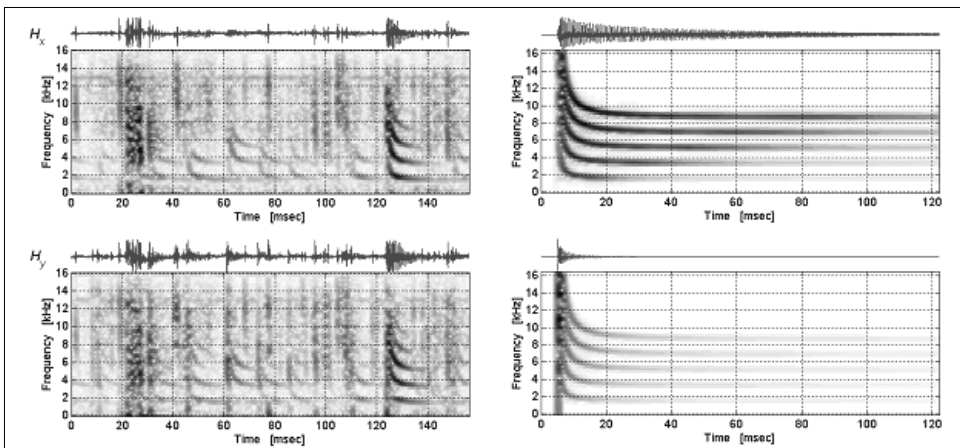
$$k_x(\omega) = \sqrt{\epsilon_0 \mu_0 \omega^2 - \left(m \frac{\pi}{a}\right)^2 - \left(n \frac{\pi}{b}\right)^2}$$

Fontos és szemléletes alkalmazási példa a fenti eredményekre a Föld-ionoszféra hullámvezetőben fellépő, villámimpulzusok által gerjesztett vezetett jelek (szferixek) modellezése. Ezt a légköri réteget a hullámterjedési vizsgálatokban általában vákuumként veszik figye-

lembe. A hullámvezetőt két végtelenül jól vezető párhuzamos fémfalal modellezzük. A gerjesztés felírásánál időben és térben a terjedés irányában Dirac-függvény-nyel számolunk, a burkoló-függvényeknél pedig 5 felharmónikust veszünk figyelembe, ám fontos megjegyezni, hogy mindkét feltételezés rugalmasan változtatható.

Az 5. ábrán látható egy villámok által gerjesztett szferix-sorozat detektált időfüggvénye és dinamikus spektruma, mellette pedig a modellszámítás eredménye.

Amint az az ábrából is látható, a modell nagy pontossággal írja le a jelenséget, és további nagy előnye a gyorsaság és a rugalmasan változtatható paraméterek. Az egyes módusok közötti frekvencia-távolságból a hullámvezető geometriai mérete (azaz az ionoszféra alsó határának a felszíntől mérhető távolsága) határozható meg, a beesés iránya pedig abból, hogy a különböző irányú térkomponenseknél a nulladrendű módus nulla vagy nem-nulla értékű.



Azaz, korrigálva a (feltételezhetően kalibrált) mért térkomponenseket egy változtatható nagyságú szögfüggő faktoral, a beérkezés iránya nagy pontossággal meghatározható. A szferix által megtett távolság (azaz a gerjesztő villám helye) pedig a diszperzió mértékéből becsülhető meg.

5. ábra
Mért (Marion-szigetek) és számított szferixek dinamikus spektruma és időfüggvénye

4. Monokromatikus jelek terjedése és reflektálódása inhomogén közegekben

A korábbi, inhomogén közegekre vonatkozó hullámterjedési elméletek (például a W.K.B.-eljárás, a csatolt W.K.B. módszer, az általánosított terjedési vektor, az eikonal-egyenlet stb.) alapvető félreértést hordoznak magukban a jel fizikai szerkezetét illetően, aminek eredményeként ezek a megoldások pontos számítások esetén önellentmondásra vezetnek, továbbá ez a vitatható érvényességük is erősen korlátozott. Ugyanis, például a W.K.B. eljárást következetesen végiggondolva belátható, hogy a kiinduló feltételrendszer érvényesítése a Maxwell-egyenletekben helyfüggetlen, konstans jel-amplitúdót eredményez, miközben ez inhomogén közegekben elvileg lehetetlen.

Az ellentmondás abból a feltételezésből ered, hogy ezek az eljárások feltételezik a terjedő és a reflektálódott jelerészek függetlenségét, azaz úgy tekintenek az inhomogén közegben terjedő jelre, mintha az a reflektálódott résztől függetlenül a Maxwell-egyenletekből levezethető lenne. Ekkor azonban valójában homogén közeget tételeznek fel. Emiatt be kell vezetni járulékos egyéb megszorításokat a jel energia-struktúráját illetően.

Még szemléletesebben észlelhető ez a gond akkor, amikor azt tapasztaljuk, hogy az így kapott megoldás csak az úgynevezett „gyengén” inhomogén közegekben ad hozzávetőleg pontos leírást. Az ellentmondás feloldására tett kísérlet a csatolt hullámok módszere, azonban egzakt megoldás a kérdésre e módszerekkel (elvileg hibás kiindulásuk miatt) egyáltalán nem nyerhető. Az itt csak röviden összegzett gondolatmenet részletes matematikai bizonyítása megtalálható [8]-ban.

Az új megoldási módszer elkerüli ezeket az ellentmondáshoz vezető feltételezéseket, és mind a terjedő, mind a reflektált energiárészre zárt alakú, pontos formulát ad. A gondolatmenet sarokköve az Inhomogén Alapmódusok Módszere, melyben lényeges és alapvető gondolat, hogy nem az alapmódusok elégítik ki a Maxwell-egyenleteket, összegüként azonban felírható a fizikailag is létező jel. Csak ez az eredő összeg elégíti ki a Maxwell-egyenleteket.

$$\bar{G}(\vec{r}, t) = \sum_i G_i(\vec{r}, t), \quad (13)$$

ahol

$\bar{G} = \bar{E}, \bar{D}, \bar{H}, \bar{B}$ és i a létező módusok száma.

Eltekintve a részletes matematikai levezetéstől, a megoldási módszer olyan nem-Riccati típusú differenciálegyenlet-rendszerre vezet, amely szukcesszív approximációval megoldható. Az szukcesszív approximáció első lépése (nulladrendű közelítés) visszaadja a jól ismert W.K.B. alapmegoldást, amikor a reflektált jelerész kiinduló értéke nulla (az „1” index jelöli az előre terjedő energiárészt, a „2” index tartozik a reflektálódott részhez):

$$E_1(x) = C\sqrt{Z_0(x)} \quad \text{ahol } C = \text{konstans} \quad (14)$$

$$E_2 = \frac{E_{10}}{2} \sqrt{Z_0(x)} \int_x^{x_M} \frac{d(\ln Z_0)}{du} e^{-j2 \int_0^u k(v) dv} du \quad (15)$$

A szukcesszív approximáció következő lépését elvégezve egyre pontosabb formulák adódnak. A jelerészek közti energiacsatolás jól látható a további approximációs lépésekkel nyerhető formulák szerkezetében. Az elsőrendű közelítést elvégezve az inhomogén közegben előre terjedő jelre az alábbi összefüggés adódik (16):

$$E_1 = E_{10} \sqrt{Z_0(x)} \left\{ 1 - \frac{1}{4} \int_0^x \frac{d(\ln Z_0)}{du} e^{j2 \int_0^u k dv} \left[\int_u^{x_M} \frac{d(\ln Z_0)}{dw} e^{-j2 \int_0^u k dv} dw \right] du \right\} \quad \text{stb.}$$

5. Impulzusok terjedése és reflektálódása inhomogén plazmában

A vizsgált közeg inhomogén, anizotróp, elómágnesezett, hideg elektronplazma [9]. A gerjesztést az alábbi alakban vesszük fel (azonosan (1)-el):

$$I_{x=0}(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-x_0}^0 J_0 \left(l, t + \frac{l}{c} \right) dl \left\{ e^{-j\omega t} dt \right\} \quad (17)$$

A megoldás alapja hasonló a monokromatikus esetben leírthoz, és szukcesszív approximációval megoldható differenciálegyenlet-rendszerre vezet. Az approximáció első lépésében a reflektált jelre adódó megoldás az alábbi (18):

$$E_{z2}(x, t) = -\frac{j}{8\pi} \int_{-\infty}^{\infty} \left[\frac{C_0(\omega)}{\sqrt{k(x, \omega)}} \int_{\xi}^x \frac{1}{2k(u, \omega)} \frac{\partial k(u, \omega)}{\partial u} e^{-2j \int_0^u k(v, \omega) dv} du \right] e^{j \left(\omega t + \int_0^x k(h, \omega) dh \right)} d\omega$$

ahol

$$C_0(\omega) = I_{x=0}(\omega) \frac{k_0(\omega) \sqrt{k(x=0, \omega)}}{k_0(\omega) + k(x=0, \omega)} \quad (19)$$

$$k(x, \omega) = \frac{1}{c} \sqrt{\frac{\omega \omega_b(x) \omega_p^2(x) + \omega^2 [\omega_p^2(x) + \omega_b^2(x) - \omega^2]}{\omega_b^2(x) - \omega^2}} \quad (20)$$

A megoldás szerkezetében, az egymásba ágyazódó integrálokban nyomon követhető, hogy a terjedő és a reflektálódó energia szoros, pontról pontra változó kapcsolatban van egymással, e jelerészek önállóan nem tudnak létezni.

Az új elméleti modell és megoldás megnyitotta az utat a numerikus modell-számítások előtt többek között az ionszféra-mérések szimulálásához. Ilyen szimulációs számítás eredménye látható a 6/a. ábrán, ahol lineárisan változó elektron-sűrűség profil esetén fellépő reflektált jel időfüggvénye és dinamikus spektruma látható egy adott helyen. Az alkalmazott gerjesztés Dirac-delta. Lineáris girofrekvencia-változás esetén kialakuló reflektált időfüggvény és dinamikus spektrum látható a 6/b. ábrán.

Az eredmények azt mutatják, hogy a reflexió mértéke és viselkedése követi az adott sűrűség-profilt, és szinte „pillanatképet” kaphatunk a közeg inhomogenitásának jellegéről. Így kiemelten fontos ez az eredmény az ionoszonda-mérések értékelésénél is. A jel viselkedése az alacsonyabb és a magasabb frekvenciatartományokban hasonló az előre terjedő jeléhez, az alacsonyabb tartományban whistler-típusú, míg a magasabb tartományban a TiPP-nek megfelelő jellegű a jel spektruma. Jól látható, hogy a reflexió mindaddig folyamatos, amíg az impulzus által gerjesztett jel előre terjedve teljesen át nem halad az inhomogenitáson (a diszkrét vonalak az FFT-képben a numerikus számítás véges felbontóképességéből erednek).

Ez az eredmény minden olyan területen alkalmazható, ahol fontos a reflektált jel pontos alakja, a reflexió mértéke, és az energetikai mérleg ismerete.

6. Konklúziók

A bemutatott új elméleti hullámterjedési modellek és megoldási módszerek segítségével meghatározhatók valóban tetszőleges alakú, térben és időben behatárolt, tranziens gerjesztéssel létrehozott hullámok homogén és tetszőleges mértékben inhomogén, bonyolult közegekben, illetve vezetett jelek és nem vezetett síkhullámok esetén. Számos fontos alkalmazási területen nagy pontossággal írják le ezek a megoldások a regisztrált jelenségeket.

A módszerek általánosak, rugalmasan adaptálhatók az adott hullámtani feladathoz, és frekvenciatartománytól függetlenül érvényes eredményt adnak. Fontos továbblépést jelentene, ha sikerülne a módszert általánosítani nem-lineáris problémákra is.

Tekintettel arra, hogy napjainkban szinte minden kutatási területen lényeges az impulzusok vizsgálata, így ezek az eredmények fontos új irányokat nyitnak meg. Ilyen például az aknakeresés, mint alkalmazási terület, de megemlíthetjük a jelfeldolgozó eszközöket és számítógépeket is, valamint a nagysebességű optikai átvitelt. Ebben a kérdésben a következő lényeges lépés a kör keresztmetszetű hullámvezetőkben terjedő rövid impulzusok vizsgálata. További fontos, jelenleg is vizsgált terület az anizotróp plazmával töltött homogén illetve inhomogén csőtápvonalon terjedő impulzusok leírása. Ez kiemelkedő jelentőségű a magaslégkörü, geofizikai mérések interpretálása során.

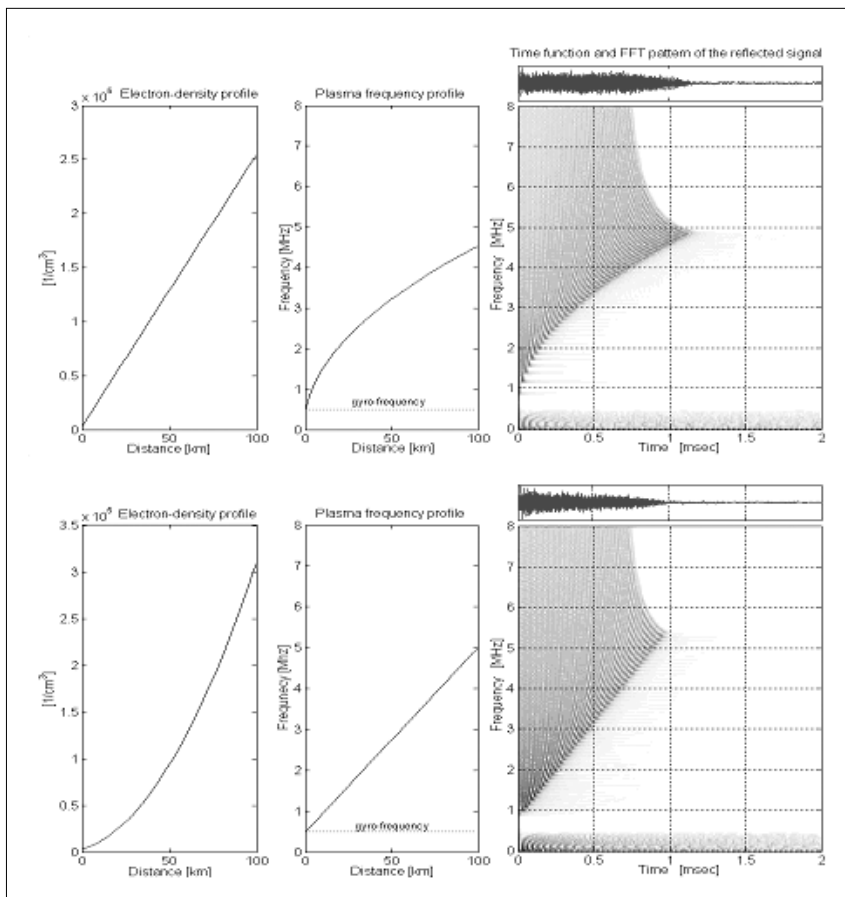
A bemutatott modell-számítási eredmények és a regisztrált jelenségek között figyelemre méltó korreláció tapasztalható. E modellek egyik eredménye egy alapjaiban új, konzisztens fizikai interpretáció megalkotása számos mért jelenség keletkezésének magyarázataként (például whistlerek, TiPP-jelenségek). Épp ezért kiemelten fontosak a műholdak fedélzetén elvégzendő szélessávú elektromágneses mérések, és ezek (főleg az ismeretlen eredetűeknek véltek) hullámtanilag pontos kiértékelése. Reményt keltő irány a kutatásokban továbbá a feltételezeten földrengéseket megelőző magaslégkörü anomalisztikus elektromágneses jelek vizsgálata, amely hosszabb távon magában rejtheti egy hatékonyabb földrengés-előrejelzés elméleti alapjait is. A megalkotott új modell alkalmazhatósága e tekintetben is érdemi előrelépést jelent.

Mind a monokromatikus jelek, mind a rövid impulzusok terjedésének pontos elmélete fontos lehet az űreszközök és a földi irányítás közötti kommunikáció és adat-továbbítás során is.

Az általános érvényű módszer és különösen az inhomogén közegekre történő alkalmazása megváltoztatta a terjedő elektromágneses energia fizikai szerkezetéről és természetéről alkotott képet. Tudomásul kell vennünk, hogy fizikailag korrekt alakban kell feltételeznünk a keresett megoldást ahhoz, hogy a Maxwell-egyenleteknek valódi, pontos, ellentmondásoktól mentes megoldását megtalálhassuk. Einstein szavaival szólva [10]:

„Az általános érvényű módszer és különösen az inhomogén közegekre történő alkalmazása megváltoztatta a terjedő elektromágneses energia fizikai szerkezetéről és természetéről alkotott képet. Tudomásul kell vennünk, hogy fizikailag korrekt alakban kell feltételeznünk a keresett megoldást ahhoz, hogy a Maxwell-egyenleteknek valódi, pontos, ellentmondásoktól mentes megoldását megtalálhassuk. Einstein szavaival szólva [10]:

6. ábra
Számított reflektált jel spektruma és időfüggvénye különböző elektron-sűrűség és plazmafrekvencia profilok esetén



„Egy fizikai elmélet bármely komoly megfontolásánál figyelembe kell venni azt a különbséget, ami a mindenféle elmélettől független objektív valóság és az adott elmélet által alkalmazott fizikai koncepció között fennáll.”

Irodalom

- [1] Budden K.G.: Radio waves in the ionosphere; Cambridge University Press, London 1966.
- [2] Yeh, K. C., Liu, C. H.: Theory of Ionospheric Waves, International Geophysics Series, Vol. 17., pp.23–28., Academic Press New York and London, 1972.
- [3] Ferencz, Cs.: Elektromágneses hullámterjedés, Akadémiai Kiadó, Budapest, 1996.
- [4] Ferencz Cs.: Electromagnetic wave propagation in inhomogeneous media: Method of Inhomogeneous Basic Modes; Acta Technica Ac.Sci.H., Vol. 86(1-2), pp.79–92. 1978.
- [5] Rodger, C.J.: Red sprites, upward lightning, and VLF perturbations, Reviews Geophys. 1999., 37, 3, 317.
- [6] Ferencz Cs., Ferencz O.E., Hamar D., Lichtenberger J.: Whistler Phenomena, Short Impulse Propagation; Kluwer Academic Publishers, Astrophysics and Space Science Library, Dordrecht, 2001.
- [7] Ferencz, E. O.: Impulzus-terjedés vizsgálata vákuummal kitöltött csőtápvonalon, Híradástechnika, Vol. 2004/1, pp.19–24.
- [8] Ferencz Cs.: Real solution of monochromatic wave propagation in inhomogeneous media, in press, Pramana Journal of Physics, 2003.
- [9] Ferencz O. E.: Full-wave solution of short impulses in inhomogeneous plasma, submitted to Pramana Journal of Physics, 2003.
- [10] Einstein A., Podolsky B. and Rosen N.: Physical Review, 47, pp.777–780. (1935)

In memoriam

HORVÁTH IMRE (1936-2004)

A szakmában nagyon sokan becsültük, tiszteltük és szerettük Horváth Imrét, akinek állapotát aggódva kísértük figyelemmel, míg márciusban le nem győzte régóta húzódott súlyos betegsége. Egyetlen munkahelye a BHG Híradástechnikai Vállalat és annak jogelődje volt. Ide 1959-ben az Átviteltechnikai Fejlesztési Osztályra lépett be. Hamarosan ismert és közbecsülésben álló szakember lett, amihez Egyesületünkben végzett munkája is hozzájárult. Abban az időben vitte ki a gyár fiókos kivitelű, rövidesen már félvezető alapú, egyre több csatornás vivőhullámú berendezéseit a piacra, melyek létrehozásában egyre jelentősebb szerepet játszott. Mindazonáltal 1964-ben, amikor az átviteltechnikai gyáregység a Telefongyárba került, ő a BHG-ban maradt és az elektronikus telefonközpontok fejlesztésébe kapcsolódott be. A szakmai ismereteket szorgalmasan gyűjtötte, támaszkodva külföldön szerzett angol nyelvtudására. Tanulmányozta a külföldi szakirodalmat, a CCITT ajánlásokat és azok előkészítő anyagait. 1965 után, a Telefonközpont fejlesztési osztályon a tárolt programvezérlés elsajátítása végett szervezett szemináriumon tartott jelentős előadásokat. A Fejlesztési Intézetben a Rendszertechnikai Főosztályt vezette, ahol fontos feladata volt a közben a vállalatba beolvasztott Elektromechanikai Vállalat fejlesztési témáinak átvétele. Az onnan átvett fejlesztő mérnökökkel indította meg a digitális központok fejlesztését. Közben onnan került a vállalat átszervezése után az 1.sz. gyárba főmérnöknek, a gyár vezetőjének kívánságára. Itt kitűnt szervezőképességével és gyakorlati felkészültségével. Reggel a napot a gyár végigjárásával kezdte, ebben a vállalat háború alatti vezérigazgatójának példáját követte. Ahol szükséges volt, tanácsaival segített, és ha kellett, intézkedett a felbukkant akadályok elhárítására.

Amikor az 1.sz. gyár vezetője más beosztásba lépett elő, Horváth Imrét örömmel fogadták vissza a Fejlesztési Intézetbe. Rövidesen a CCITT XI. sz. Tanulmányi Bizottságának tagja lett, ahol értékes munkát végzett részvételével a digitális központok együttműködését megszervező protokollok kidolgozásában. E megbízásától csak elhatalmasodó betegsége miatt lett kénytelen megválni.

A híradástechnikai iparág külkereskedelmi vállalata, a Budavox gyakran szervezett szemináriumokat külföldi piacain. Ezeket sokszor tartott előadásokat, és tapasztalataival segítette e szemináriumok tartalmi és formai tökéletesítését.

Kommunikatív és kitűnő kapcsolatteremtő volt, ezért szinte mindenkivel jóban volt, akivel a munkája összehozta. Munkatársai, beosztottai, főnökei szerették, mint mindenkivel barátságos, segítőkész kollégát. Eljutott a műszaki igazgató helyettesi beosztásig.

Egyesületünkben jelentős szerepet játszott munkabizottságok tagjaként, figyelmet keltő hozzászólásaival, mint a Távközlési Klub vitáinak aktív résztvevője. Az ITU munkájában szerzett tájékozottságára támaszkodva, Egyesületünkben gyakran tartott előadást az ott folyó munkáról. Legnagyobb hatást a „Missing Link” című tanulmányról és a Bangemann-jelentésről tartott beszámolója gyakorolta, de az ISDN-nel is sok tagtársunk egyesületünkben Horváth Imre segítségével ismerkedett meg részletesen. Eredményes munkáját 1979-ben Egyesületünk Puskás Tivadar díjjal jutalmazta. Híradástechnika c. folyóiratunkban tartalmaz cikkei, köztük úti beszámolóit jelentek meg. Szakirodalmi tevékenységét ezenkívül nyugdíjba vonulása után a MATÁV műszaki lapjában, a Magyar Távközlésben is folytatta.

Kedvenc sportja volt a futball. Gyári barátaival gyakran elment futbalozni, a Vasas csapatában is jól szerepelt, közel kerülve ahhoz, hogy a nemzeti válogatott tagja legyen.

Sajnálatos betegsége folyamatosan hatalmasodott el rajta, míg végül viszonylag fiatalon vagyunk most kénytelenek búcsút venni tőle.

Köszönünk Imre mindent, amit kaptunk Tőled, nyugodjál békében!

Horváth Gyula

Az elektromágneses hullámterjedési mérések és modellek szerepe az űr kutatásban

FERENCZ CSABA*, E. FERENCZ ORSOLYA**, HAMAR DÁNIEL**,
LICHTENBERGER JÁNOS**, STEINBACH PÉTER***

* MTA-ELTE Geoinformatikai és Űrtudományi Kutatócsoport, ELTE Környezetfizikai Tanszékcsoport;

** ELTE (Geofizikai Tanszék) Űrkutató Csoport;

*** MTA-ELTE Geoinformatikai és Űrtudományi Kutatócsoport;

spacerg@sas.elte.hu

Kulcsszavak: whister, hullámterjedés, SAS-műszer

A cikk az élet szinte minden területén egyre fontosabbá váló elektromágneses hullámterjedési mérési-vizsgálati eljárások kiemelt szerepét mutatja be az űr kutatásban és az alkalmazásokban. Pontosabban ezek közül a földi életet és annak biztonságát is érintő területen: a plazmaszféra kutatásokban, az űridőjárási vizsgálatokban és a szeizmikus kockázatok műholdas előrejelezhetősége kutatásában. Az e munkákba tartozó elméleti modell-fejlesztésekkel és alkalmazási eredményekkel az előző írás, míg a jelen cikk a földi és műholdas mérésekkel és a felfeldolgozási feladatokkal foglalkozik.

1. Bevezetés

A komplex, kutatást és műszaki fejlesztést is magába foglaló, űrben végzendő méréseket is remélő űrtevékenység hazánkban 1961. szeptemberében kezdődött a Budapesti Műszaki Egyetemen azzal, hogy öt harmadéves hallgató sokak döbbenetére Rakétatechnikai Tudományos Diákkört alakított [1], s a kezdetektől foglalkoztak elektromágneses (e.m.) hullámok terjedés-vizsgálatával is. 1965-ben geofizikus hallgatók is csatlakoztak a csoporthoz, köztük az e területen korai haláláig kitaró Tarcsai Györggyel (1943-1998), aki néhány év múlva a hullámterjedési kutatások részeként az akkor világszerte a plazmaszféra vizsgálata céljából meginduló ELF-VLF (Extra Low Frequency – Very Low Frequency) mérések és értelmezésük mellett kötelezte el magát [2].

Az ELF-VLF vizsgálatok és a máig folytonosan végzett (általánosabb) e.m. hullámterjedési kutatások egyik eredménye, hogy ma hazánk e kutatások és gyakorlati alkalmazásaik terén érdemi szerepet játszik a világ űrtevékenységében [3]. A hullámterjedési vizsgálatok azért váltak kiemelten fontossá, mert a plazmaszféra, azaz a magaslégkör folyamatos monitorozását teszik lehetővé. Márpedig a magaslégkör a Nap és a bolygóközi tér, valamint a földi alsólégkör és a felszíni, felszínközeli geomágneses aktivitás közötti energetikai kapcsolatot éppen a felsőlégköri folyamatok biztosítják. Mindezek a hatások pedig megjelennek élettani-társadalmi jelenségeinkben (pl. baleseti statisztikák), a létfontosságú technikák működési zavaraiiban (pl. áramellátási zavarok), az időjárás hosszabb távú alakulásában stb. Ezért is lendült fel az utóbbi években az úgynevezett űridőjárás kutatása, ami a felsőlégkörre, valamint a Napra és a bolygóközi térre vonatkozó vizsgálatokat fogja össze.

E téren a folyamatos monitorozás alapvetően fontos. Erre e.m. hullámterjedési eszköz áll a rendelkezésünkre. Ugyanis a troposzférában az időjárás egyik folyamatos kísérőjelenségeként állandóan villámlik valahol. A villámok keltette impulzusok az alsólégkörben

kezdenek terjedni, de átjutva az ionoszférán a földi mágneses tér által előmágnesezett plazmában terjednek a felsőlégkörben (plazmaszféra). A plazmaszféra szerkezete miatt többé-kevésbé követik a „mágneses erővonalak” menetét, s így ezen ELF-VLF tartományú jelek visszajutnak, újra az ionoszférán át, és a földfelszín-ionoszféra hullámvezetőben rövidebb-hosszabb utat megtéve vehetők az e célból létesített mérőhelyeken. Ezeket a jeleket hívjuk 'whistler'-eknek.

A vett jelszerkezet részben a gerjesztéstől, részben a terjedés során átvárt közegtől, azaz a plazmaszféra állapotától függ. Persze ugyanezek a jelek vehetők műholdak fedélzetén is, s így további fontos információkhoz juthatunk. De tudjuk venni a felszínen a villámok jeléből a plazmaszférába át nem jutott részt is, a közvetlen jelet ('spheric'), amelynek ismerete segíti a whistler értékelését, s amely ugyanakkor folyamatosan információt nyújt az ionoszféra alsó része (D réteg alja) állapotáról. A folyamatos monitorozáshoz azonban nemcsak természetes e.m. jelek állnak a rendelkezésünkre, hanem a földi VLF rádióadóink jelei is. Ezek is természetesen a földfelszín-ionoszféra hullámvezetőben terjednek, s ugyanakkor a fázis és amplitúdó helyzetük ismert módon stabil. Így az ionoszféra-troposzféra közötti ionizációs-energetikai csatolás folyamatáról e paramétereik megváltozása hordoz információt, mivel ha például a visszafele úton a troposzférába leérkező whistler töltött részecskéket csatol be a troposzférába, ez eltorzítja a földfelszín-ionoszféra hullámvezető alakját, megváltoztatva ezzel a terjedő VLF rádiójel fázisújtját.

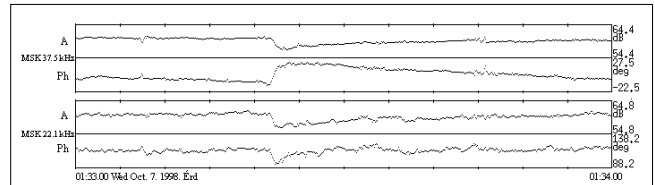
Az elmondottakból világos, hogy e téren, amelynek hatásai hosszabb távon mind a gazdaság, mind az életminőség terén fontosak, egyidejűleg van szükség minél több műhoddal végzett hullámterjedési mérésre és folyamatos földfelszíni jelregisztrálásra. Az űrben és a földön mért adatokból pedig akkor tudunk elegendően pontos eredményre jutni, ha az e.m. hullámterjedési elméleti modelljeink valóban pontosak. Itt már nem hagyatkozhatunk arra, hogy valamit durva közelítéssel szá-

molunk ki, becsülünk meg, s utána majd a fejlesztés során tapasztalati úton beállítjuk a kívánt értéket. Itt ha az elméleti modell pontatlan vagy rossz, akkor hamis adatokat kapunk a plazmaszféráról, a felső- és az alsólégkör energetikai csatolásáról. Ezért a hullámterjedési elmélet több érdemi új eredménye éppen ezekhez a kutatásokhoz kapcsolódva született meg [4,5,6]. A terület erősödésének további lendületet adott az a tapasztalat, hogy a szilárd föld folyamatait, azaz a szeizmikus eseményeket (földrengéseket, vulkánkitöréseket) ULF-VLF e.m. jelenségek előzik meg illetve kísérik. Ezért ma már e kutatásoknak a műholdas katasztrófa-előrejelzés lehetőségének feltárásában is alapvető szerepe van. Hazánk e területen a vezető kutatóhelyek közé tartozik.

2. Földi mérések

A whistlerek földi regisztrálása itthon már az 1960-as évek végén elkezdődött Tihanyban. Ma egyidejűleg folyik a regisztrálás Tihanyban, Nagycenken és Budapesten. A munka értelmesebben azonban csak kiterjedt nemzetközi együttműködés részeként folytatható. Így, a kedvezőtlen körülmények ellenére már az 1970-es években sikerült brit kutatókkal, a British Antarctic Survey-jel máig eredményes együttműködést kezdeni, mely ma már sokkal szélesebb körű, kiterjed Délafrikára, Indiára, Újzéländra, Oroszországra, Japánra, Finnországra, Franciaországra és az Egyesült Államokra is.

A mért jelek alakja és dinamikus spektruma (FFT) a magaslégköri terjedési út különbözőségei és hossz-eltérése miatt a különböző vételi helyeken eltérő. A villám keltette impulzus a plazmaszférán áthaladás után jellegzetes, fűtyszerű jellé alakul, innen a neve is. Ez a dinamikus spektrumban jól látszik (1. ábra). Azt is látjuk azonban, hogy a jelalak pontos kiméréséhez, ami a terjedési jellemzőkön át a plazmaszféra paraméterei (alapvetően az elektronsűrűség) meghatározásához kell, jellemzően 20-40 kHz-es mintavételi frekvencia szükséges, mind a földi állomásokon, mind műholdakon, s az e.m. jeleknek 6 (3 elektromos és 3 mágneses) térkomponense van. De még nem teljeskörű jelmérés esetén is illik legalább 1 elektromos és 2 mágneses komponens



2. ábra
Izlandi (37.5 kHz) és skóciai (22.1 kHz) VLF jeladók jelen megjelenő amplitúdó és fázis trimpi effektus keskenysávú felvétel egy részletén (Érd)

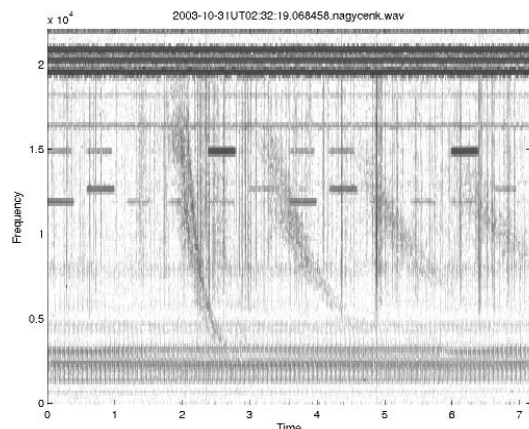
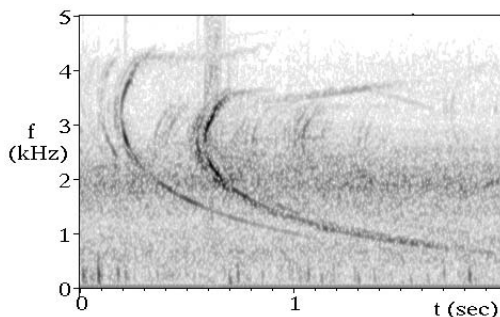
megmérni a földi állomásokon. Ez napi 24 órás folyamatos regisztrálás esetén akkora adattömeget jelentene, ami még ma is kezelhetetlen, s akkor még nem kerestük ki a whistlereket, nem mértük ki az alakjukat és nem számoltunk belőle plazmaszféra paramétert.

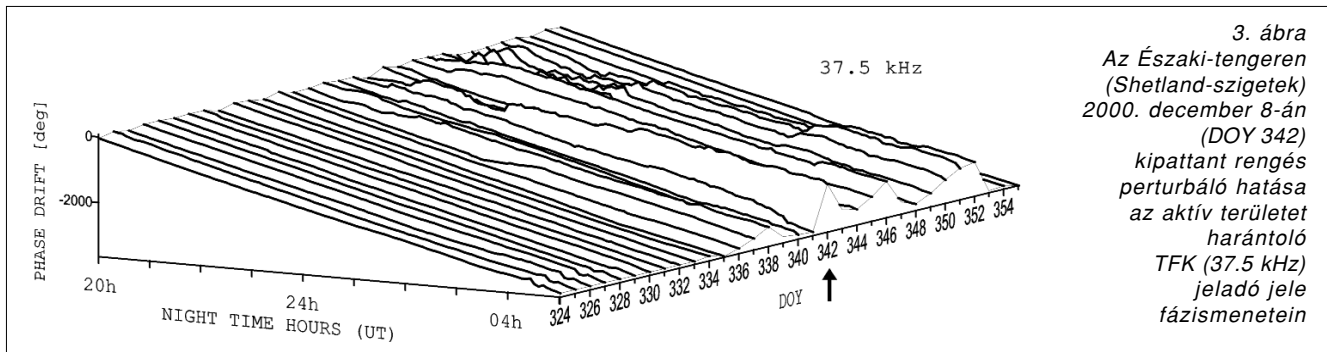
Ezért az első évtizedekben, s a világ legtöbb részén ma is csak óránként 1-2 percre kapcsolták-kapcsolják be a vevőket, s vesz amit vesz, hiszen akkor is teljes pontossággal kell regisztrálni, amikor csak zaj, spheric és zavarnak minősülő mesterséges eredetű jel érkezik a vevőbe. Így is vettek-vettünk whistlereket, mert mint ma már tudjuk, naponta ezer körüli nagyságrendben érkeznek egy-egy helyre whistlerek. Ezért a hullámterjedési elmélet pontossága mellett a másik kulcskérdés a jelfelismerés és adatfeldolgozás vált, hiszen a folyamatos monitorozást kell elérnünk.

A trimpik esetében részben hasonló a helyzet. Anynyiban egyszerűbb, hogy a földi VLF adó jelének vevőbe érkezési vivő-fázishelyzete és vivő-amplitúdója mérése sokkal lassúbb mintavételezéssel is lehetséges, részben mert az adók keskenysávúak, részben mert a vivőjel fázisa és amplitúdója lassabban változik, elég 50-100 ms-ként, esetleg s-ként mintát venni. A 'trimpi' az elmondott okokból előálló, jellegzetes fázis és amplitúdó változás (2. ábra).

Mivel a VLF adók adott helyen települtek, s a vett jel csak az adó-vevő útvonalat szondázza, célszerű egyidejűleg több (4-5), különböző irányból érkező VLF adó-jelét venni. Még így is megoldható volt a folyamatos regisztrálás, de a trimpik azonosítása és értékelése ugyanúgy gond, mind a whistlerek esetében. Úgymond kézi módszerekkel csak esettanulmányok végezhetőek,

1. ábra
Az Antarktiszon (Halley Bay) 1984-ben regisztrált whistler csoport (balra) és a nagycenki obszervatóriumban 2003-ban rögzített többszörös whistler sorozat (jobbra)





teljes, folyamatos feldolgozás és értékelés nem. Ma hazánkban működik Európa egyetlen, több állomásból álló trimpi-vevő hálózata (Penc, Budapest, Érd, Tihany). Ezért e helyzet feloldása számunkra (is) égető. Ugyanakkor unikálisak a lehetőségek is. A regisztrátumok vizsgálata a terjedési útra vonatkozó információk mellett más eredményeket is hoz. Példaként földrengéssel korreláló keskenysávú VLF jelenséget mutatunk (3. ábra), amely egyben a műholdas vizsgálatok előkészítésében is fontos.

Látható, hogy a feladat lényege (a földi méréseknél) már nem a mérés maga, hanem a folyamatos regisztrálás adatfogyadási és feldolgozási oldalról megoldása, s a mért jelek folyamatos értékelése. A legnagyobb korlátozást a whistler mérések folytonos végzésének lehetetlensége okozta. Ennek megoldására sikerült a whistlereket igen nagy biztonsággal (körülbelül 95%-os valószínűséggel) felismerő szoftvert (úgynevezett automata whistler detektor [7]) kifejleszteni, amely az állomásokon futtatva folyamatosan figyeli a beérkező jelet, felismeri az erősen zajos és zavaró jelekkel, spherics-szel, ipari és egyéb emberi eredetű jelekkel terhelt környezetben a beérkező whistlereket, whistler csoportokat és tárolja a pontos jelalakokat e jelek beérkezése alatt, míg a whistler-mentes időszakokban a vevő figyel, de jelet nem tárolunk. A trimpi esetében most fejlesztjük az automata trimpi detektort. A vett értékes adatsorokat most már át lehet nézni, s a különösen érdekes jeleket eseti (kutatási) értékelésnek alávetni.

Azonban a plazmaszféra folyamatos monitorozásához (rutin analíziséhez) nincs szükség a vett jelek minden részletre kiterjedő elemzésére, „csak” az alapvető terjedési út, azaz plazmaszféra paraméterek meghatározására minden whistlerből. Mivel naponta a vett whistlerek száma, amióta az automata detektor fut, ezer körüli, e feladat elvégzését is automatizálni kell. Ez összetett hullámterjedési és jelalak felismerési-elemzési feladat, amelynek teljes megoldásához közel állunk. Alapja az a több évtizedes tapasztalat, amelyet a whistlerek korábbi, eseti elemzésében szereztünk [3].

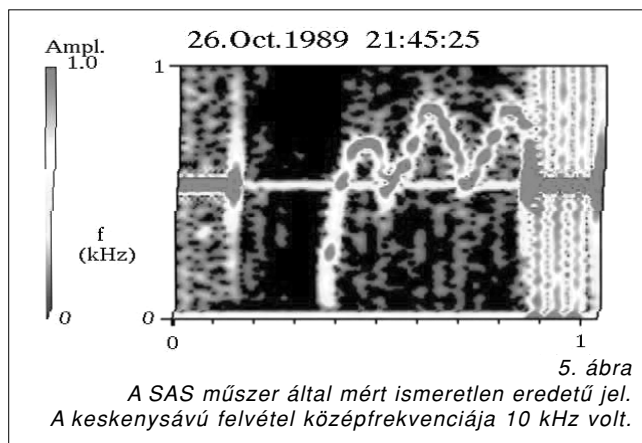
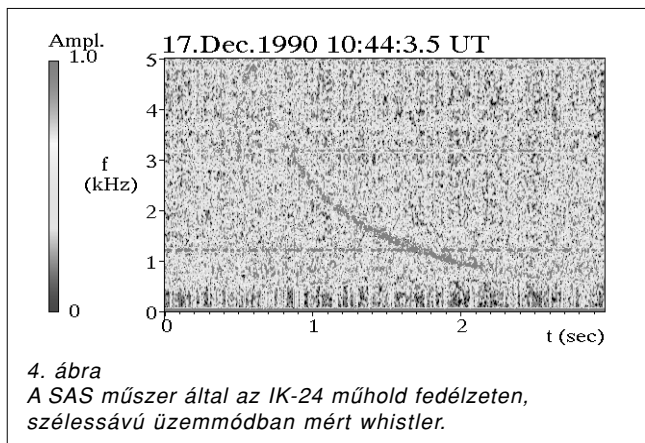
Ennek első lépései Tarcsai György nevéhez fűződnek, akinek sikerült módszert találnia a whistlerek dinamikus spektrumban megjelenő alakja valamely elméleti jelalakkal történő legjobb összeillesztésére, s így meghatározni a plazmaszféra legfontosabb (terjedési) paramétereit. További előrelépést hozott a radartechnikában jól ismert és sikeres illesztett szűrés átültetése e

jelek szerkezete vizsgálatára. Az utolsó lépés a teljesen automatikus értékelés, amelynek megoldásán dolgozunk. Az automatikus értékelés azonban nem helyettesíti az egyes esetek, valamiért behatóan elemzendő whistlerek részletekbe menő, közvetlen kutatói részvétellel zajló tanulmányozását. Minél többet mérünk ugyanis, annál több, az energia-transzportot illetve a terjedés pontos leírását érintő különös jelenséggel, illetve értelmezési problémával találkozunk szembe magunkat. Ugyanez a helyzet a trimpi vizsgálatában. Vagyis egyfelől megszületik az űridőjárási kutatás számára szükséges folyamatos plazmaszféra és troposzféra-plazmaszféra csatolás monitorozás, másfelől elmélyül a tudásunk a különös esetek vizsgálata kapcsán mind a hullámterjedés tényleges lezajlása megismerésében, mind a hullámterjedés elméleti leírásában, ami viszont az általános és áramkör-fejlesztési mérnöki gyakorlat számára is fontos.

3. Műholdas mérések

Mind a párhuzamosan futó e.m. hullámterjedési kutatásból, mind a whistler-kutatásból, s az addig csak mások által végzett szórványos műholdas whistler-vizsgálatokból már kezdetben is tudtuk, hogy nagyon fontos és informatív lenne műhold fedélzetén pontosan kimérni az éppen ott terjedő, ELF-VLF sávú e.m. jelek alakját, s összevetni egyidejű, a földfelszínen, hasonlóan pontosan mért jelekkel. Láttuk azonban a földi mérések leírásakor, hogy e mérések elvégzéséhez nagy működési sebességű elektronika kell, s azt műhold fedélzetén alkalmazhatóan kis fogyasztással és kellő megbízhatósággal csak az 1980-as évekre tudtuk megoldani. A műholdfedélzeti hullámelemző műszerünk, amely a BME-vel együttműködésben készült és a vett jelek pontos időbeli alakját méri és tárolja, a SAS (Signal Analyzer and Sampler) 1989-ben startolt és éveken át működött sikeresen az Interkozmosz-24 („Aktív”) műhold fedélzetén [2].

Műholdak fedélzetén a műszerek működési időtartamát nemcsak a mérés elvégezhetősége, hanem az adatok Földre lehozatala is korlátozza. Ugyanis a műhold-Föld csatornkapacitás is korlátozott, s a földi követőállomásokon csak addig vehetők az adatok, amíg a műhold átvonul. Így, még műhold-műhold átvitelre is gondolva, ami a kisebb kutató-holdak esetén még ma



sem jellemző üzemmód, a műhold-Föld kapcsolat tényleges ideje legtöbbször kisebb vagy sokkal kisebb, mint 24 óra. Ezért a SAS is csak nagyon korlátozott időszakokban mért, de így is sok értékes információt szolgáltatott. Mért whistlereket is és más, furcsa alakú jeleket is (4. és 5. ábrák). (Jelenleg az ESA Cluster holdjai véghezkiterjedt és nagyon informatív hullámterjedési méréseket. Ezekben nincs részünk.)

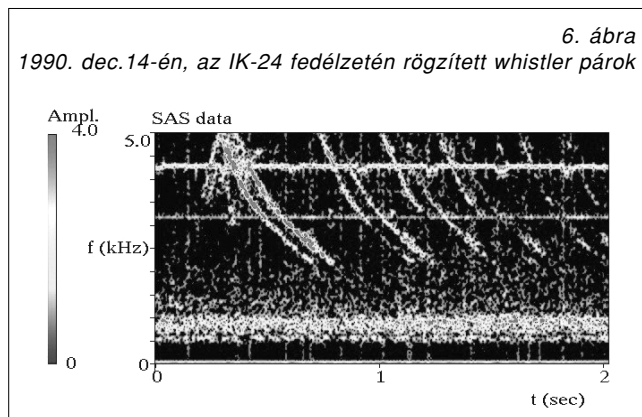
A mért jelek elemzése és földi mérésekkel összevetése fontos információkat szolgáltatott [8]. Többek között sikerült mind a SAS-sal, mind egyidejűleg a Földön venni páros whistler csoportot és elemezni a jeleket (6. ábra). Ugyanakkor mindmáig nyitott kérdés maradt, ráadásul olyan, amelyik a plazmaszférikus hullámterjedés lényegi alapjait érinti, hogy az esetek többségében a műholdon olyan whistlereket veszünk, amelyek a régebbi hullámterjedési modellek szerint nem a műhold pályáját átmetsző mágneses erővonal mellett kellene terjedjenek, hanem máshol. (Ez az úgynevezett L-diszkrépancia, lásd részletesebben pl. [5]-ben.) De mégis ott vesszük ezeket a jeleket a műholdnál.

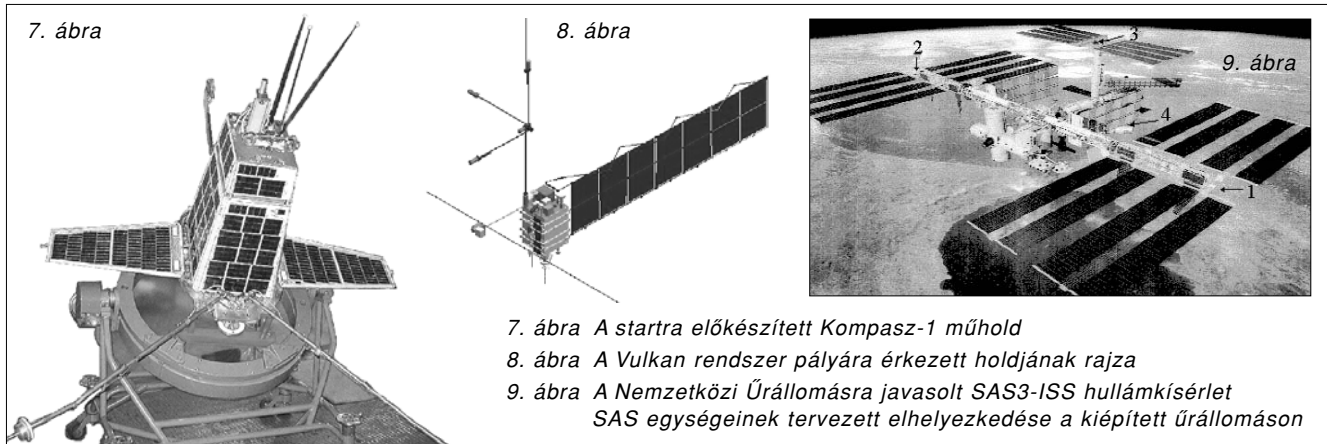
A válasz mind a hullámterjedés elméletét, mind a plazmaszféráról alkotott képünket érinti. Úgy tűnik az újabb elméleti modelljeink szerint, hogy ezek a jelek nem a mágneses erővonal mentén, hanem attól eltérően terjednek, s a Föld mágneses tere leírására sem használható egyszerű dipólus modell a számításokban, hanem sokkal pontosabb multipólus leírás szükséges. A furcsa alakú jelek is nagyon fontosak, mert mind a keletkezésük, mind a műholdig terjedés után mérhető alakjuk eddig fel nem tárt folyamatok vizsgálatához nyitja meg az utat. Így többek között az esetleges szeizmikus eredet lehetőségét is vizsgálni kell. Mivel pedig mind a fedélzeti, mind a párhuzamos földi mérésekben a nagyon pontos jelalakot mérjük ki, ezért az értékeléshez nagyon pontos, korrekt e.m. hullámterjedési megoldások (modellek) kellene. Így e kutatás egyik fontos eredménye a korábbiaknál sokkal pontosabb, a Maxwell egyenletek egzakt megoldásait tartalmazó modellek bonyolult terjedési körülmények között, pl. [4-6]. Így a régi célok, a plazmaszféra vizsgálata mellett újak is megjelentek, nevezetesen más jelenségeket, elsősorban a szeizmikus aktivitást kísérő e.m. jelenségek feltárása és monitorozása, az e.m. hullámterjedés alap-

kérdéseinek kísérleti ellenőrzése e hatalmas „labor”-ban, a plazmaszféra pontos szerepének leírása a Nap és a bolygóközi tér, valamint az alsóléggör és a felszín közötti energetikai csatolásban (‘úridőjárás’)...

Mindezek miatt a sikeres SAS-műszert továbbfejlesztettük és alkalmassá tettük a korábbi tapasztalatok alapján informatívabbnak tűnő mérések elvégzésére. A fejlesztett változatok egyike a SAS2, amely ULF-VLF mérések végzésére alkalmas [2] a néhány tized Hz - 20 kHz közötti sávban. A műszer már csak tartalék üzemmódban mér úgy, mint korábban a SAS, azaz mechanikusan ismétlődően méri a bejövő jelet rövid időszakokban. Az alapvető üzemmódban folyamatosan méri a teljes bejövő jel (zaj) spektrum (1-10s-os) átlagát, továbbá figyeli, hogy jött-e be a háttértől eltérő jel (e.m. esemény), s ha igen, azt tárolja és továbbítja. Így mind whistlereket, mind furcsa alakú jeleket ki tud választani és mérni. De mód van arra is, hogy csak whistlereket vegyen és mérjen [7], hiszen földi körülmények között már jól és megbízhatóan fut az automata whistler-detekció. Ezzel a folyamatos monitorozás műszer oldali része biztosított, már csak a műhold-Föld csatornkapacitást kell hozzá kialakítani. Ezért a SAS2 műszert meghívták az orosz vezetéssel megvalósuló, a szeizmikus jelenségek előrejelzését és a plazmaszféra vizsgálatát célzó Kompassz és Vulkan műholdas projektekbe.

A Kompassz-1 (7. ábra) 2001. végén indult, de a műhold szolgálati rendszere meghibásodott a pályára érés után, még a kísérletek, a SAS2 bekapcsolása előtt. A Kompassz-2 várhatóan 2005. januárjában startol, remél-





7. ábra

8. ábra

9. ábra

7. ábra A startra előkészített Kompass-1 műhold

8. ábra A Vulkan rendszer pályára érkezett holdjának rajza

9. ábra A Nemzetközi Űrállomásra javasolt SAS3-ISS hullámkísélet SAS egységeinek tervezett elhelyezkedése a kiépített űrállomáson

jük több sikerrel. A Vulkan rendszer 8 műholdból áll majd, az első startja 2005. végére várható (8. ábra).

A másik új változat a SAS3 műszer, amelyet a Nemzetközi Űrállomásra (ISS) tervezett kísérlethez alakítottunk ki. A műszer a SAS2 olyan továbbfejlesztése, amely a már leírt ULF-VLF mérések mellett nagyon nagy sebességgel is tud mintákat venni a bejövő jelekből. Ennek nem az a célja, hogy magasabb frekvenciájú jeleket is mérjünk, bár ehhez is megnyithatja majd az utat, hanem az, hogy a bejövő ULF-VLF hullámfrontot az ISS egymástól távoli pontjain egyszerre véve és mérve (9. ábra) meg tudjuk határozni a beérkezések közötti pontos időeltérést (teljes kiépítésben) mind a 6 komponensen. Így a hullámfront térbeli elhelyezkedése és haladása kimérhető [5]. Ez a kísérlet alapvető hullámterjedési kérdések kísérleti ellenőrzésére ad módot, ami a jövőben mind az elektronikában és rádiózásban, mind a kutatásban, így az űrkutatásban és alkalmazásokban is, pontosabb modellekhez és új lehetőségekhez nyitja meg az utat. A SAS3 első, még csak két (egy elektromos és egy mágneses) komponenszt mérő változata az Obszhanovka projekt keretében repül, várhatóan 2005-ben, az ISS fedélzetén.

Az új lehetőségektől sokat remélünk egyrészt az űridőjárás vizsgálatok terén, másrészt a szeizmikus jelenségek pontos előrejelezhetősége megoldásában. Ezek pedig új műholdas szolgálatok megjelenését eredményezhetik már a közeli jövőben, ugyanolyan érdemi előrelépést jelentve, mind amilyent a műholdas hírközlés, a műholdas helymeghatározás vagy a műholdas földfigyelés (távérzékelés) jelentett az elmúlt évtizedekben.

4. Kitekintés

A trendek és a saját aktivitásunk, s tudományos céljaink és azok várható haszna az elmondottakból megítélhető. Azonban az is látszik, hogy mindezek alapja a világ más részein újra nagy felfutásban lévő hullámterjedés elméletinek nevezhető, valójában a folyamatok lejátszódásának alapjait és (fizikai) értelmezését érintő kutatások, amelyek eredményei a fúziós kísérletektől a gyors áramkörökön és jeltovábbításon át a természet vizsgálatáig minden területet érintenek. Vagyis a fen-

tebb leírt feladatok korrekt megoldásához rendbe kell tenni végre a hullámterjedés elméletét, amelyhez Maxwell-ék, Lorentz-ék, a XX. század kezdeti évtizedei óta alapvetően újat keveset tettünk hozzá. Most már nem lehet a felmerült problémákat sem elkerülni, sem gondolati kísérletekkel áthidalni, mert a mérnöki realizálás és a geofizikai-űrfizikai alkalmazás utolérte az elméletet. Ez már a jelenben és a közeli jövőben is sokat ígérő helyzet. Mi sem tudjuk (s nem is akarjuk) kivonni magunkat mindebből; az elméleti előrelépéseinkről ezen szám előző cikkében láthatunk összegzést.

Irodalom

- [1] Both E., Horváth A.: 50 éves a magyar űrkutatás; Magyar Űrkutatási Iroda, Budapest 1996.
- [2] Ferencz Cs.: A SAS; Űrtevékenység Magyarországon, Magyar Űrkutatási Iroda, Budapest 2002., pp.31–40.
- [3] Carpenter D.L.: Remote sensing the Earth's plasmasphere; The Radio Science Bulletin, URSI, Gent 2004., No.308, pp.13–29.
- [4] Ferencz Cs.: Real solution of monochromatic wave propagation in inhomogeneous media; Pramana J. Physics, 2004. 62, pp.1–13.
- [5] Ferencz Cs., Orsolya O.E., Hamar D., Lichtenberger J.: Whistler phenomena, Short impulse propagation; Kluwer Academic Publishers, Dordrecht 2001.
- [6] Ferencz O.E. and Ferencz Cs.: A new treatment of the propagation and reflection of electromagnetic signals; URSI XXVIIth General Assembly, Maastricht 2002.
- [7] Lichtenberger J., Ferencz Cs., Hamar D., Steinbach P., Bodnár L.: Automatic whistler detector: First results; IAGA-IASPEI Joint Sci. Conf., Hanoi 2001. (Abstr. 80., G2. 07, 1888).
- [8] Lichtenberger J., Tarcsai Gy., Pásztor Sz., Ferencz Cs., Hamar D., Molchanov O.A., Golyavin A.M.: Whistler doublets and hyperfine structure recorded digitally by the Signal Analyzer and Sampler in the Active satellite; J. Geophysical Research, 96, 21.149–21.158. (1991)
- [9] Ferencz O., Ferencz Cs.: Elektromágneses impulzusok terjedésének vizsgálata különböző közegekben, Híradástechnika, Vol. 2004/5. pp.18–24.

Űreszközök fedélzeti autonómiájának kialakítása a naprendszer távoli objektumainak kutatásához

BAKSA ATTILA tudományos munkatárs

Központi Fizikai Kutató Intézet RMKI, Űrtechnikai osztály
baksa@rmki.kfki.hu

Reviewed

Kulcsszavak: űrszonda, autonóm működés, hibatolerancia, többfeladatos valós idejű operációs rendszer

A naprendszer távoli objektumainak eredményes űrszondás kutatása magas fokú autonómiát követel meg az adott űreszköz-től, ami a processzorok fejlődésének köszönhetően szoftver úton valósítható meg. Egy távoli égitest felszínén tevékenykedő űreszköz bonyolult feladatainak sokasága szükségessé teszi egy átfogó vezérlési modell kialakítását, amely megfelelő sebességgel képes kezelni a gyors környezeti eseményeket, mégis rugalmasságot biztosít egy hosszú távú küldetés változó igényei számára. Kidolgozott modellünket a Rosetta űrszondán alkalmaztuk, amely 2004. március 2-án sikeresen kilépett bolygónk gravitációs teréből.

Napjainkban indulnak olyan űreszközök, amelyek kihasználva a legújabb technológiai vívmányok adta lehetőségeket, távoli világok kutatását kezdik meg ebben az évtizedben. A legújabb fejlesztésű elektronikai eszközök, úgy mint alacsony fogyasztású, nagyteljesítményű processzorok, FPGA-k, magas hatásfokú napelem cellák és nagy energiasűrűségű akkumulátorok megjelenése lehetővé teszik olyan objektumok felszíni tanulmányozását, amelyek az éltető napenergiától és egyben Földünkötől távol roják köreiket naprendszerünkben.

A problémák

A nagy távolságok elérése nemcsak az űreszközök hajtóműveit állítja komoly feladat elé, hanem a kommunikációt biztosító rádiórendszereket is, amelyek segítségével a kapcsolatot tarthatjuk égi küldöttünkkel. Amíg például a Mars bolygót kutató felszíni járművel, átlagosan húsz perc holtidővel tarthatja a kapcsolatot a földi operátor személyzet, addig a távolabbi objektumokat kutató szondák rádió válasziideje több óra is lehet. Amíg tehát egy földközeli űreszköz földi központú vezérlése elfogadható szabályozási holtidővel rendelkezik, addig az energiaszegény külső naprendszerben tevékenykedő eszköz nem hagyatkozhat a több órás késéssel érkező földi vezérlő jelekre.

Különös figyelemmel kell lennünk az űreszköz energia felhasználására, mert a naprendszer alacsony hőmérsékletű külső övezetében, jelenlegi elektronikus berendezéseinknek folyamatos fűtésre van szükségük, üzemképességük fenntartásához. Ez azt jelenti, hogy a szonda működtetése várakozó állapotban is rendkívül energia igényes. Adott esetben akár az is előfordulhat, hogy a szűkös energiaforrások következtében napokig tart annak az energiamennyiségnek az összegyűjtése, ami mindössze néhány óra üzemidőt biztosít a tudományos kutatások elvégzéséhez, hacsak nem használunk radioaktív energiaforrást.

Belátható tehát, hogy egyrészt nem pazarolhatjuk az energiát földi parancsokra való tétlen várakozásra, másrészt pedig elfogadhatatlan a váratlan események több órás késéssel történő megoldása, hiszen kritikus esetben ennyi idő alatt rendszerünk akár működésképtelenné is válhat.

Megoldás

Jelenleg egyetlen megoldást tudunk ezeknek problémáknak a megoldására. Növelnünk kell az űreszköz autonómiáját. Olyan intelligenciával rendelkező adaptív fedélzeti rendszert kell beépítenünk, amely:

- Folyamatosan biztosítja az előre megtervezett tudományos műveletek végrehajtását
- Rugalmasan alkalmazkodik az előre nem tervezhető időigényű folyamatokhoz
- Önállóan reagál a nem várt külső eseményekre és teljes megoldást ad vészhelyzetek kezelésére
- Fenntartja a rendszer energia egyensúlyát és gondoskodik az összegyűjtött tudományos adatok tárolásáról energiamentes állapotban is

Csak a fenti tulajdonságokkal rendelkező kutatóeszköztől várhatunk tudományos eredményekben gazdag és üzembiztos működést olyan távoli helyen, mint például egy üstökös felszíne.

A korábbi űrszondák, amelyeket égitestek felszínének kutatásához terveztek, nem rendelkeztek olyan mértékű intelligenciával, hogy távolabbi helyeken is hosszabb időre sikerrel bevethették volna őket. Nagyon nehéz volt több napos önálló feladatsor megvalósítása, mert hiányzott a váratlanul bekövetkező események megoldásához szükséges számítási teljesítmény. Napjainkban a mikroelektronika rohamos fejlődésével, olyan űrminősítésű, alacsony energiaigényű és nagyteljesítményű processzorok jelentek meg, amelyek lehetővé teszik nagymértékű autonómia szoftver úton történő

megvalósítását. Magas szintű mesterséges intelligencia algoritmusok beépítéséhez természetesen még ezek az erőforrások sem nyújtanak elegendő számítási kapacitást, de megfelelő absztrakcióval olyan összetett viselkedésmódot sikerült kialakítanunk, amely a körülményeknek megfelelő válaszidővel képes a valószerű események kezelésére és az űreszköz feladatainak hosszú távon történő irányítására.

Alapvető megfontolások

Autonóm fedélzeti szoftver logika kialakításánál kiemelten fontos a szoftver rendszer hibatoleranciájának mértéke. A szoftver modell tervezésénél ezért feltétlenül figyelembe kell venni a következő irányelveket:

- Biztonságos működés érdekében a mért környezeti értékek hihetőségi vizsgálatát el kell végezni (határérték vizsgálatok), hasonlóan szükséges a vezérelt változók érvényesítés előtti érték ellenőrzése.
- A belső modellnek érzékelnie kell a környezetében előforduló hibákat. A szoftver csak érvényes környezeti modellt használhat fel. Indulás alatt, leállás-kor és átmeneti hibák esetében sem használhat érvénytelen adatokat.
- Minden elképzelhető eseményre léteznie kell állapot átmenetnek. Ez a feltétel a nagyszámú lehetséges esemény, illetve a teljes várható eseményrendszer alacsony jóslhatósági fokának következtében rendkívül nehezen teljesíthető a hagyományos modellekkel. Kidolgozott modellünk újszerűsége abban rejlik, hogy megoldást kínál az állapotátmenetek és állapotok későbbi, akár éles, üzem közbeni pontosítására.
- Minden állapot kezelésénél/vizsgálatánál időhatárokat kell alkalmazni (time-out) a feltétlen átmenetek elérésére.
- A kritikus, nem megszakítható állapotokban való futásidőt minimalizálni kell a reakcióidő alacsony szinten tartása érdekében.
- Ismétlődő akcióknak hurokban kell lenniük.
- Az esetleges hibás állapotot létrehozó téves parancsok veszélyét minimalizálni kell, ezért minden esetben teljes parancs dekódolást kell végezni.
- Nem létezhet a modellben teljes leállást létrehozó (csak ki/be kapcsolással feloldható) logikai útvonal.

A feladat

Részletesen tanulmányoztuk egy feltételezett távoli kisbolygó vagy üstökös felszínén leszálló kutatóegység központi számítógépével szemben támasztott lehetséges követelményrendszert, amely funkcionalitás szerint a következő csoportokra bontható:

- A célobjektum megközelítése és a leszállás folyamatának felügyelete vagy akár közvetlen vezérlése.
- A leszállóegység energia és hő egyensúlyának fenntartása.

- A tudományos műveletek irányítása.
- A tudományos adatok gyűjtése a fedélzeti műszerektől valamint az adatok átmeneti tárolása.
- Kapcsolattartás a Földdel vagy az esetleg közelben tartózkodó rádiójelű átjátszását biztosító úgynevezett orbiter egységgel, parancsfogadás és a tudományos adatok továbbítása.
- Hibatolerancia biztosítása, a beépített redundanciák kezelésével.

A különböző részterületeket átvizsgálva arra a következtetésre jutottunk, hogy az egyes területek egymással összefüggő hatást gyakorolnak a rendszerre. Ezért olyan központi logika kialakítása szükséges, mely kapcsolatot biztosít az egyes feladatkörök között. Egy olyan bonyolult központi logika, amely a fenti feladatok koordinálására képes nehezen írható körül, ezért szükséges a modell absztrakciója.

A modell

Absztrakciónk alapja, hogy különválasztottuk a rendszer statikus és dinamikus viselkedését, ami számos előnyt nyújt az űrszondákon alkalmazott korábbi megközelítésekkel szemben.

Ez a megoldás minimalizálja a szondához küldendő vezérlő információ mennyiségét, hiszen a statikus és dinamikus viselkedést leíró algoritmusok nagy számú kombinációját lehet létrehozni kis számú parancs segítségével. Ez azért fontos, mert a bolygóközi szondák esetében – a nagy távolság miatt – a parancs adatátvitel sebessége maximum 10-2000 kbit/mp, és ugyanakkor a kapcsolat is gyakran csak 10 percre tartható fenn elfogadható jel/zaj viszony mellett. Fontosnak tartottuk továbbá, hogy a központi logika az űrszonda működésének bármelyik fázisában áttervezhető legyen, a tudományos küldetési tervek változásainak megfelelően.

Ezért mindkét modellt önálló alapegységek halmozására bontottuk tovább, amelyek elnevezése MSO (Mission Sequencing Object). Ezzel az absztrakció olyan alapkövéhez jutottunk, amelyek egyrészt lehetővé teszik az űrszondák földi parancsokon úgynevezett *telekommandokon* keresztüli adatfeltöltéséhez való igazodást, másrészt a földi küldetés tervezési csoport számára egy részleteiben áttekinthető leíró nyelvezetet biztosít ember és gép között.

Az alapegységek (MSO) kapcsolatát úgy alakítottuk ki, hogy azok egymástól függetlenül kezelhetők legyenek tervezési, transzport és üzemi fázisaik alatt egyaránt. Méretüket pedig úgy terveztük meg, hogy egy-egy MSO egyetlen telekommand formájában az űreszköz fedélzetére juttatható legyen. A leendő űreszköz fedélzeti szoftvere számára olyan adattárolási formát dolgoztunk ki, amely a magas hibatolerancia érdekében redundáns adattárolás mellett, hatékony helykihasználással biztosítja a szükséges MSO elemek gyors elérését.

A statikus modell

A statikus modell állítja elő a rendszer aktuális üzemi állapotát és alapegysége az SMSO (Static Mission Sequencing Object). Egy-egy SMSO a következő állapot paramétereiket állítja elő:

- Az aktuális működési üzemmód egymásnak ellentmondó tulajdonságainak szabályozása:
 - működési sebesség,
 - hibatolerancia foka,
 - energiatakarékosság mértéke.
- Az űreszköz fedélzeti berendezéseinek és tudományos műszereinek aktuális állapota a küldetés fázisának megfelelően
- Az egyes berendezések szolgálati adatainak gyűjtésére vonatkozó paraméterek
- Adatmennyiség kvóták felállítása a fedélzeti adattároló kapacitás mindenkor optimális (hatékony) elosztása érdekében
- A fedélzeti berendezések működés közbeni jogainak korlátozása, a kritikus üzemi szekciók védelme érdekében
- Prioritási sorrend felállítása az üzemelő berendezések között a következő szempontok szerint:
 - energiaellátás,
 - adattárolási kapacitás,
 - kiszolgálási sebesség.

A dinamikus modell

A dinamikus modell a bekövetkező eseményekre adandó válaszokat, valamint a statikus modell állapotainak átmenetét írja le. Alapegysége az DMSO (Dynamic Mission Sequencing Object), amely a következő állapot átmeneti paramétereiket állítja elő:

- Hivatkozás az aktuális rendszer állapotot leíró SMSO elemre
- A várt és váratlan események észlelését leíró tartalom
- Az eseményekre adandó közvetlen válaszok leírása, amelyek az esemény súlya szerint a következők lehetnek:
 - beavatkozó algoritmus,
 - hibaelhárító algoritmus,
 - hibakezelő algoritmus,
 - folyamat újraindító (recovery) algoritmus,
 - vész üzemmód algoritmus.
- Időzítések és timeout események leírása
- Kapcsolatok és elágazások leírása, amelyek aktivizálódhatnak egyrészt a küldetés terveinek megfelelően, másrészt a váratlan külső események hatására. A következő kapcsolatok és elágazás típusok létrehozására van lehetőség további DMSO-elemek felé:
 - láncolt kapcsolat,
 - szubrutin szintű elágazás,
 - ugrás szintű elágazás.

Megvalósítás

Modellünket a Német Űrrepülési Intézet, a DLR (Deutsches Zentrum für Luft- und Raumfahrt) felkérésére, az ESA (European Space Agency) üstökös kutató Rosetta űrszondájának fedélzetén alkalmaztuk, a Philae nevű leszállóegység fedélzeti számítógépének szoftver rendszerét fejlesztettük. Az elméleti modell sok paraméterét kellett a leszállóegységet irányító fedélzeti számítógép, úgynevezett CDMS (Command and Data Management Subsystem) fizikai adottságaihoz igazítani, de a modell logikai felépítését pontosan adaptálni tudtuk.

Modellünk rugalmasságára különösen szükség van a Philae fedélzetén, mivel a küldetés pontos tudományos menetrendje a rendkívül sok bizonytalansági tényező miatt még nem kidolgozott. Ennek ellenére a szoftver rendszer fejlesztése és tesztelése mégis jóval a kilövés előtt lezárulhatott. A leszálló egység végleges viselkedésének leírása és az előállított a MSO elemek fedélzetre töltése elvégezhető lesz a rádiórendszeren keresztül akkor is, amikor a Rosetta orbiter egysége már alaposan feltérképezte az üstökös magjának tulajdonságait. Modellünk nyújtotta lehetőségekkel reméljük, hogy a Philae leszállóegység sikeresen teljesíti majd a leszállás és a felszíni működés feladatait egy mindhárom tengelye körül bukfencező jéghegyen, amellyel új korszakot nyit majd az űrkutatás történetében.

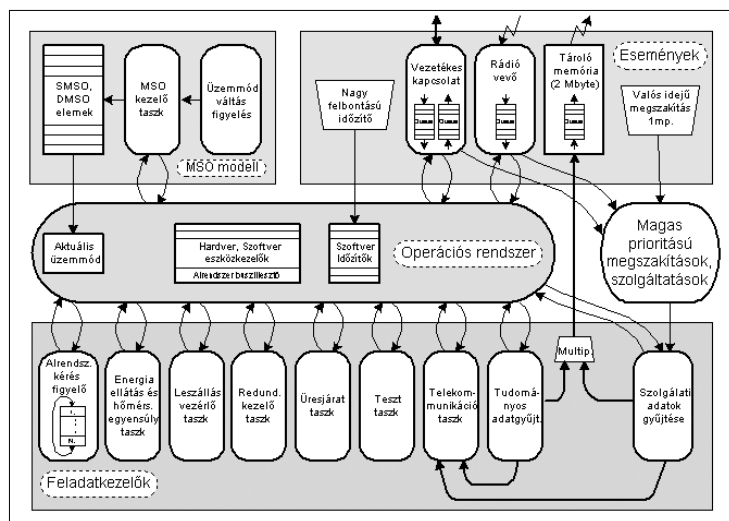
A megvalósítás környezete

A fedélzeti számítógéphez teljesen egyedi multitaszkos operációs rendszert fejlesztettünk ki, amelyre a számítógépben használt különleges processzor (Harris RTX 2010RH) miatt volt szükség. A leszállóegység feladatainak közvetlen vezérlését nyolc szinten egyedi fejlesztésű applikációs taszk végzi. A feladatok koordinálását és az applikációs taszkok algoritmusainak átfogó irányítását az itt ismertetett MSO alapú modell végzi. Az 1. ábra az MSO modell és operációs rendszer illetve az applikációs taszkok kapcsolatát mutatja.

A fedélzeti számítógép hardver és szoftver elemeinek általános ismertetése megjelent a Magyar Elektronika folyóirat 2002. decemberi és 2003. januári számában.

A Rosetta-küldetés

Az ESA szervezésében futó Rosetta-küldetés az üstökösök kutatását tűzte ki célul. A Rosetta űrszonda a 67P/Churyumov-Gerasimenko üstökös közelébe és tudományos méréseket végez körülötte. Az űrszonda 2004. március 2-án sikeresen elhagyta Földünket egy Ariane 5 hordozó rakéta fedélzetén és megkezdte évtizedes utazását célja felé. Az üstökös megközelítése 2014 év elején várható, Földünktől 500 millió kilométer távolságban.



1. ábra
Az MSO modell és az operációs rendszer kapcsolata

Az üstökös részletes feltérképezése után 2014. novemberében a Philae nevű leszállóegység (2. ábra) különválik a keringő egységtől és leereszkedik az üstökös felszínére.

2. ábra
A Philae leszállóegység



Sikeres talajt érés után megkezdji kutatómunkáját, 10 tudományos műszerrel a fedélzetén. Berendezésével képes az üstökös anyagából mintát venni, azt mikroszkóp, spektrométer és gáz-analizátor segítségével vizsgálni, akusztikus- és radar-hullámokkal az üstökös belső szerkezetét tanulmányozni, mágneses és plazmafizikai vizsgálatokat végezni, valamint panoráma és sztereó kamerákkal fotókat készíteni és azokat a Földre továbbítani. Optimális viszonyok mellett a leszállóegység több hónapon keresztül folytathatja méréseit, lehetővé téve így számunkra, hogy nyomon követhessük a folyamatot, amikor egy üstökös „életre kel” nap-hoz közeledő pályaszakaszán.

Köszönetnyilvánítás

A Rosetta projektben való részvételünket a Magyar Űrkutatási Iroda segítette, amelyért ezúton szeretnénk köszönetünk nyilvánítani.

Irodalom

- [1] Ron S. Kenett, Emanuel R. Baker: Software Process Quality , New-York 1999.
- [2] David P. Youll: Making Software Development Visible, Chichester 1990.
- [3] H. Dean Drake, Duane E. Wolting: Reliability Theory Applied to Software Testing Hewlett-Packard Journal, April 1987
- [4] Gregory A. Krugel: Project Management Using Software Reliability Growth Models Hewlett-Packard Journal, June 1988.
- [5] Gregory A. Krugel: Validation and Further Application of Software Reliability Growth Models Hewlett-Packard Journal, April 1989.
- [6] Savio Chau, Abhijit Sengupta, Tuan Tran, Ali Backhshi: Ultra Long-life Spacecraft for Long Duration Space Exploration Missions Space Technology, Vol. 23, 2003.
- [7] Baksa Attila, Balázs András, Pálos Zoltán, Szalai Sándor, Várhalmi László: A Rosetta Lander központi vezérlő és adatgyűjtő számítógépe Magyar Elektronika, 2002. december
- [8] Baksa Attila, Balázs András, Pálos Zoltán, Spányi Péter, Szalai Sándor, Várhalmi László: A Rosetta leszállóegység fedélzeti szoftverrendszere Magyar Elektronika, 2003. január-február



A Rosetta Lander központi vezérlő és adatgyűjtő számítógépe

DR. SZALAI SÁNDOR *, BALÁZS ANDRÁS **

* KFKI RMKI Űrtechnikai Laboratórium vezetője
szalai@rmki.kfki.hu

** KFKI RMKI Számítógép Fejlesztési Osztály tudományos vezetője
balazs@rmki.kfki.hu

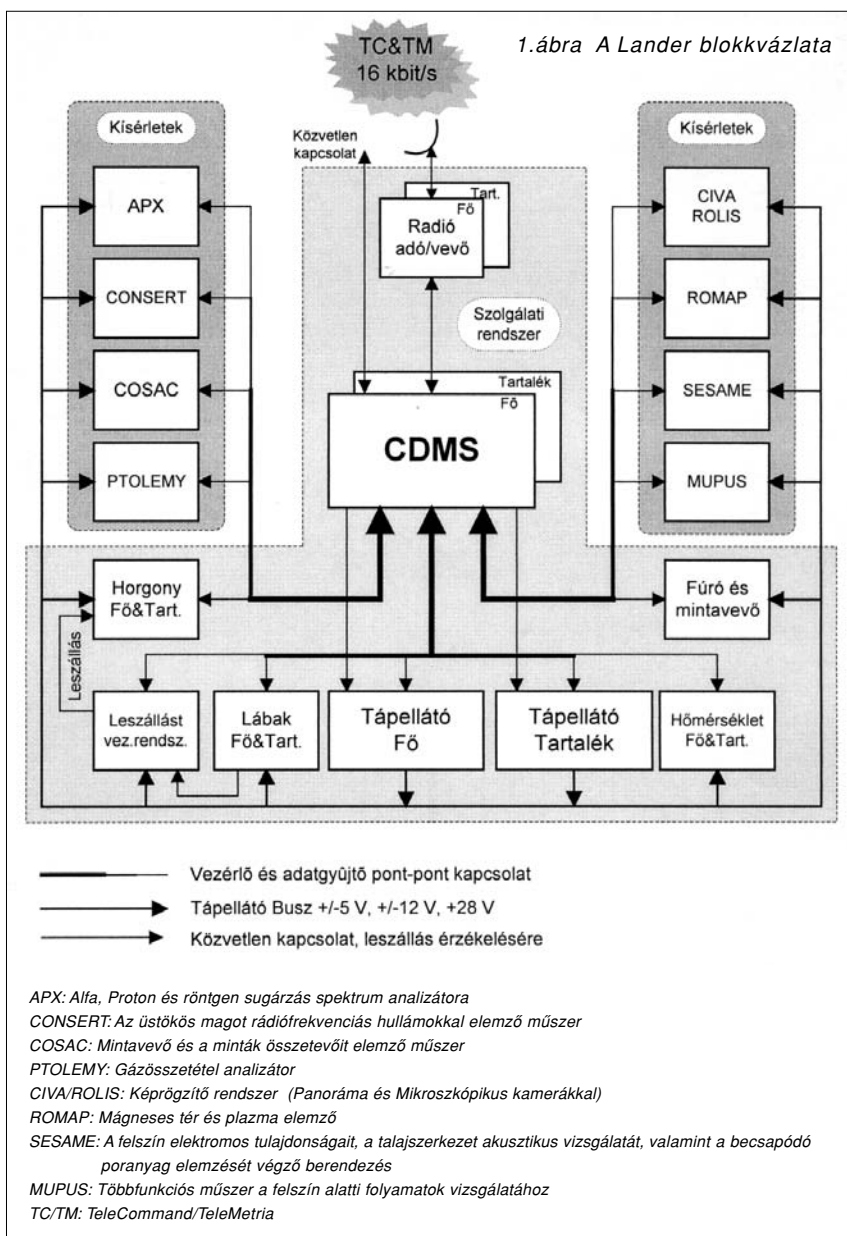
Kulcsszavak: leszállóegység, vezérlő és adatgyűjtő rendszer, sugárzásálló processzor, hibajavító memória

Az Európai Űrügynökség Rosetta űrszondája 2004. március 2-án megkezdte közel tízéves utazását a Csurimov-Geraszimenko üstököshöz. Az üstökösök Naprendszerünk legérdekesebb égitestjei közé számítanak és kutatásuk pontosítja a Naprendszer korai állapotáról alkotott ismereteinket. Az üstökös közelébe a szonda két részre válik szét, egyik részere (Orbiter) az üstökös körül kering, a másik, a Philae nevet viselő egység (Lander) pedig leszáll az üstökös felszínére. A Rosetta leszállóegysége lesz az űrkutatás történetében az első műszeregyüttes, amely puhán leereszkedik egy üstökös magjára és ott működése során az üstökös aktivitásának változását is vizsgálni tudja.

Három intézet – a garchingi Max-Planck Institut für Extraterrestrische Physik, a helsinki Finnish Meteorological Institute és a budapesti KFKI RMKI – fogott össze a Rosetta Lander központi vezérlő és adatgyűjtő rendszerének (Command and Data Management Subsystem, CDMS) kifejlesztésére.

A finn kutatók vállalták a „nagy” kapacitású tároló (Mass Memory, MM) fejlesztését és gyártását, a KFKI RMKI kutatói és az SGF Kft. közösen végezték a fedélzeti számítógép és annak szoftverrendszerének kifejlesztését, míg a német kutatók a számítógép drága űrminősítéssel rendelkező alkatrészeinek beszerzését és magának repülő számítógépnek a gyártását vállalták magukra. A számítógépek legyártott moduljait a magyar mérnökök mérték be, tesztelték és integrálták rendszerbe. A központi számítógépből három úgynevezett laboratóriumi, két minősítő, egy repülő és egy földi referencia példány készült.

A számítógép feladata az autonóm működés és a földdel való kommunikáció biztosítása. A kettős feladatkör egy sor bonyolult algoritmust és ugyanakkor nagyfokú flexibilitást biztosító vezérlő szoftver kifejlesztését igényelte. A rádiójelek vételi lehetősége szakaszos, a kommunikációban fellépő több órás holtidők olyan megoldásokat igényeltek, amelyek felismerik az esetleges hibaeseményeket és megteszik a szükséges lépéseket azok elhárítására.



Az energiafogyasztás minimalizálása és a nagyfokú megbízhatóság voltak a legnagyobb prioritással figyelembe vett követelmények a rendszer kialakításánál. A fogyasztás azért különösen kritikus mivel az űrszonda a Naptól 3,5 csillagászati egység távolságra találkozik az üstökösrel és így alacsony a napelemek által szolgáltatott energia mennyisége. A fedélzeten ugyan van a Földről vitt telep, de annak energiája feltehetőleg csak három – négy napig tartó működést biztosít a tíz évet meghaladó tárolás után. Hasonlóan az alkalmazott másodlagos, újratölthető akkumulátorok kapacitása is csökken a hosszú utazás során.

A nagyfokú megbízhatóság érdekében olyan alkatrész bázist kellett választani, beleértve magát a processzort is, amely rendelkezik sugárzásálló úrbeli használatra minősített kivitellel. A szükséges feladatokat szükségessé tették a legalább 16 bites processzor alkalmazását. A Harris cég RTX2010 típusú processzora a legkisebb fogyasztású a 16 bites űrminősítésű processzorok közt.

Azonban ez a processzor választás jelentős nehézséget és többlet munkát jelentett a szoftver fejlesztésben. A processzor architektúrája a már feledésbe merült, tisztavirág életű, stack (verem) orientált úgynevezett Forth programozási nyelv alkalmazására optimalizált. A beszerezhető fejlesztői környezet igen korlátozott szolgáltatásokat nyújtott. Nem állt rendelkezésre az adatgyűjtési feladatok ellátásához elengedhetetlenül szükséges valós idejű, sok feladatos operációs rendszer (real-time multitasking kernel) ezt „házilag” kellett kifejleszteni.

Ezután kezdődött csak a konkrét feladatokat elvégző felhasználói (applikációs) taszkok elkészítése. A rendszer magja *round robin* elven működik és osztja szét az erőforrásokat a futásra váró feladatok közt. A Lander egyszerűsített funkcionális blokkvázlata az 1. ábrán látható.

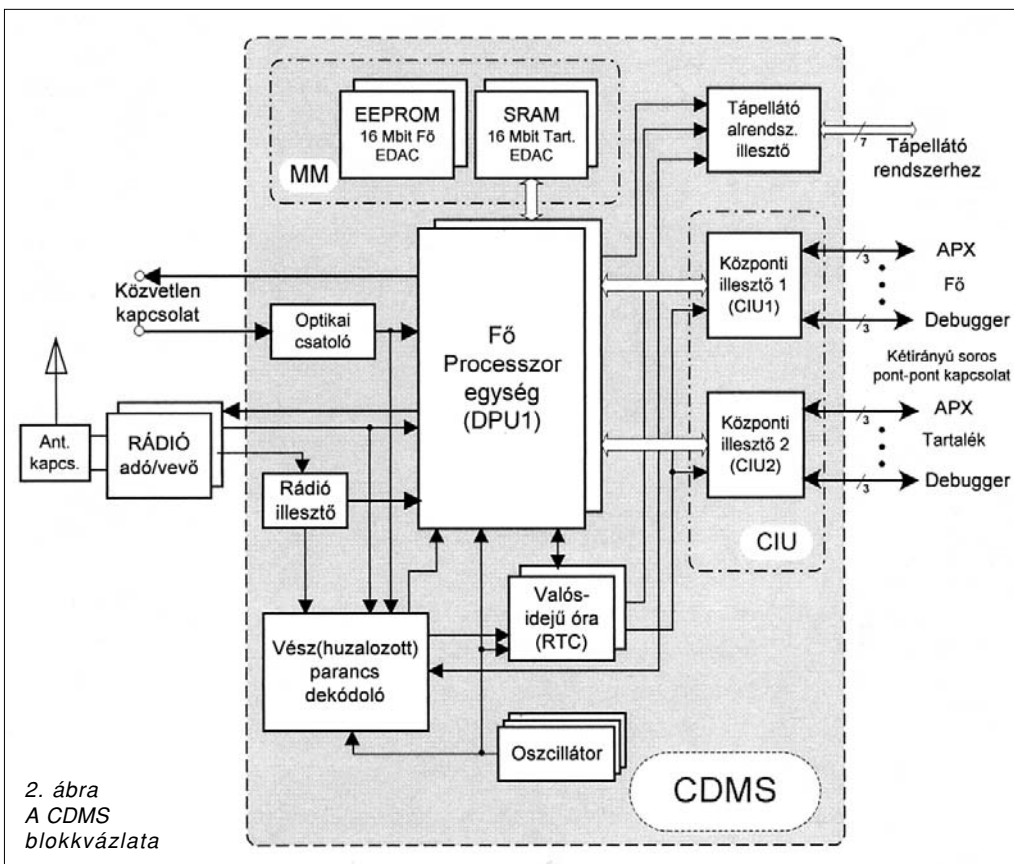
A hibátűrő képességre vonatkozó követelmény miatt, tartalékolt architektúrával kialakított CDMS számítógép blokkvázlata a 2. ábrán látható.

A processzor (*Data Processing Unit, DPU*) háromféle típusú memóriát tartalmaz (3. ábra). Az egyszer írható PROM tartalmaz egy minimális működést biztosító programot tömörített formában. A 6 MHz-es határ frekvenciával rendelkező processzor 3 MHz-en működik a megbízhatóság javítása érdekében. Az elektromosan újra írható EEPROM-ban található a teljes funkcionális biztosító program, a működési szekvenciákat leíró táblázatok, az újraindításhoz, illetve vezérlési feladatok átvételéhez szükséges adatterületek. Itt található továbbá az utólag felmerülő működtetési követelmények megvalósításához, illetve az esetleges szoftver hibák orvoslásához szükséges program módosítások, az úgynevezett *patch*-ek. Induláskor egy összetett – közvetlenül a PROM memóriából futó – algoritmus dönti el, a processzorok sorrendjét valamint, hogy az egyes processzorok a PROM vagy EEPROM memóriából, javítások használatával vagy azok nélkül futtassák-e szoftver rendszerüket.

A kiválasztott program konfigurációt a processzor feltölti a RAM memóriába és ezután a program innen fut. A nagyenergiájú részecskék hatására esetlegesen fel-

lépő bithibák hatásának kiküszöbölésére a 16 bites szavak Hamming kódolással tárolódnak a RAM és az EEPROM memóriákban. A processzor hiba-felismerő algoritmusát pedig egy úgynevezett *watchdog timer* segíti.

Más fedélzeti alrendszerek és a tudományos berendezések adatainak gyűjtése valamint vezérlésük pont-pont kapcsolatú, tartalékolt, három vezetékes összeköttetésekön keresztül valósul meg. Az adatátvitel egy a Mil-1553 szabványhoz hasonló protokoll szerint történik. Ez a protokoll a mikroprocesszor nélküli fedélzeti alrendszerek számára is egységes kommunikációs formát tesz lehetővé.



A Lander energiaellátó alrendszerét egyrészt az egységes adatátviteli csatornán, másrészt közvetlen vezetékeken keresztül vezérli a számítógép. Magát az energiaellátást biztosító alrendszert a Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Úrkutató csoportja fejlesztette.

A tartalékolt rádió adó-vevők kezelését, egy robusztus mechanizmust megvalósító csupán kis integráltságú áramköri elemeket tartalmazó rész biztosítja. A leszálló egységnek automatikusan észlelnie kell az orbiter egység kommunikációs szándékát, mégpedig olyan módon, hogy a rádió láthatóságon kívüli holtidőkben minimalizálja a rádiórendszer magas energiaigényét, ezért ez az áramkör időről időre váltakozva bekapcsolja a rádióvevőket függetlenül a processzortól, amely az előre megadott várható láthatósági időpontjában próbálja felépíteni a kapcsolatot az orbiter egységgel. Amíg a leszállóegység az orbiteren van közvetlen vezetékes kapcsolaton keresztül vezérelhető és állapota ellenőrizhető.

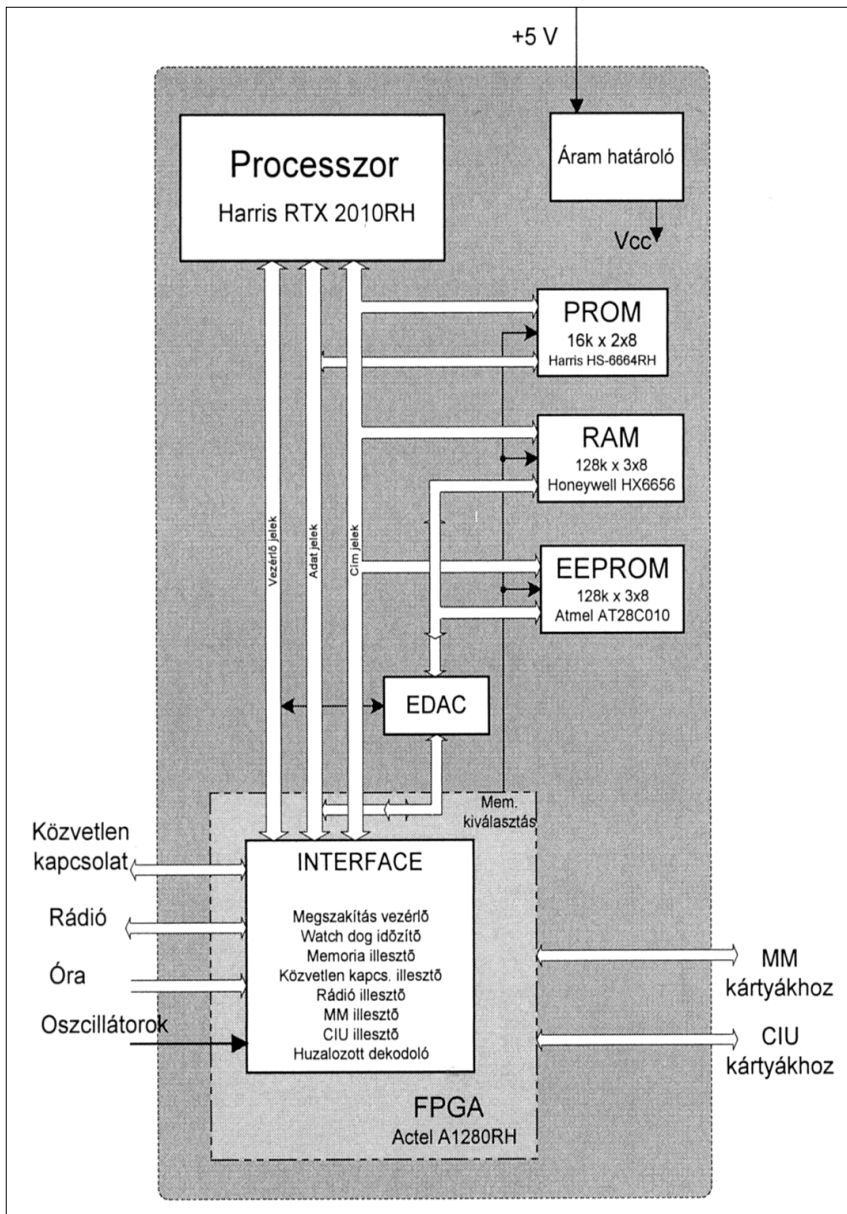
A processzorok közti átkapcsolás szintén egy kritikus eleme a rendszernek, amely döntéshozatali logikája alacsonyintegráltságú elemekből áll. A fedélzeti hibás döntés elhárítására a „huzalozott” (processzor nélküli) parancsértelmező beavatkozhat. Földi parancsal a processzor bekapcsolásakor működésbe lépő döntési algoritmus is felülírható, melyik memóriából és javításokkal vagy anélkül töltődjek be a futására kerülő program. Ez lehetővé teszi, hogy hibás program feltöltés esetén a PROM memóriából elinduljon a rendszer és újra tölthető legyen az EEPROM memória.

Az üstökösre történő leereszkedést, a felszínre érkezést érzékelő és a talajhoz rögzítés folyamatait végző alrendszereket közvetlenül felügyeli a számítógép. Hibás működés észlelése esetén azonnal beavatkozik és megpróbálja a tartalék rendszerekkel befejezni a leszállást. A számítógép felszíni működése teljesen autonóm, akár napokig irányíthatja a tudományos kísérletek menetét, földi beavatkozás nélkül. A kísérletek adatait pedig a tároló memóriában megőrzi és a legközelebbi rádió kapcsolat alkalmával az orbiter segítségével továbbítja a Földre.

A Lander működésre vonatkozó vezérlési megoldásokról a jelenszámban megtalálható szoftver ismertető cikk szól részletesen.

Irodalom

- [1] Dependable computing on Rosetta Lander; Attila Baksa, András Balázs, Zoltán Pálos, Sándor Szalai, László Várhalmi; EWDC2000; 12. May 2000, Budapest
- [2] Embedded System on Rosetta Spacecraft; Attila Baksa, András Balázs, Zoltán Pálos, Sándor Szalai, László Várhalmi; Msy'02 Conference; 3-4. October 2002, Winterthur
- [3] Embedded System on Rosetta Spacecraft; Attila Baksa, András Balázs, Zoltán Pálos, Sándor Szalai, László Várhalmi; DASIA 2003 Data Systems In Aerospace Conference; 2-6. June 2003, Prague



3. ábra
A processzorkártya blokkvázlata

Sugárdózis-mérés égen és földön

APÁTHY ISTVÁN úrkutató-mérnök

KFKI Atomenergia Kutatóintézet
apathy@sunserv.kfki.hu

Kulcsszavak: ionizáló sugárzás, dózisterhelés, kozmikus sugárzás, dozimetria

Gyakran hallhatók hírek, olvashatók újságcikkek a bennünket érő káros sugárzásokkal kapcsolatosan. Állandó téma az ózonlyukak növekvő mérete, ami miatt a Nap ultraibolya sugárzásának (a nap-eredetű sugárzás egyik elektromágneses komponensének), ennél fogva a bőrrák kialakulási veszélyének fokozottan ki vagyunk téve. Olvashatunk, hallhatunk a kis- és nagyfrekvenciás rádióhullámok káros hatásáról, melyek forrása például nagyfeszültségű távvezeték, mobil telefon, katód-sugárcsőves képernyő vagy mikrohullámú sütő. Kiemelt híreként szerepelnek a nukleáris létesítmények üzemzavarai, az atomerőművek elleni tüntetések, tükrözve félelmünket a radioaktív sugárzástól, szennyeződéstől.

Sugárzás, dozimetria, dózismérők

Mióta kialakult földünkön az élet, különféle sugárzások érik az élőlényeket. Ezek közül a legnagyobb károsító hatást az élő anyag molekuláit elektronokra és ionokra bontó ionizáló sugárzás váltja ki. Ennek intenzitása, összetétele a földtörténet során is változott, és függ a földrajzi szélességtől, tengerszint feletti magasságtól is. Ez a sugárzás részben részecske-sugárzás (töltött és semleges atomi részecskék „áramlása”, mint az alfa-, béta- és neutron-sugárzás), részben elektromágneses sugárzás (röntgen- és gamma-sugárzás). Forrásait tekintve általában természetes eredetű (kozmosz sugárzás, természetes radioaktív anyagok bomlása), de az elmúlt évszázadtól kezdődően már származhat mesterséges forrásokból (atomenergia, gyógyászat, izotópok alkalmazása, atomrobbantások stb.) is.

Az élővilág a mindenkori természetes sugárzási szintben alakult ki és fejlődött, az a természetes környezet alkotórésze. Problémák akkor adódnak, ha a sugárzás szintje rövid időn belül jelentősen megnő. Ez leggyakrabban valamilyen emberi tevékenység következménye; vagy a földfelszíni sugárzási viszonyokban áll be változás, vagy az ember (és más élőlény) szakad ki természetes környezetéből (repülés, úrrepülés). A sugárzási szint növekedésével, annak mértékétől függően egy széles tartományban „csak” a rákos megbetegedés valószínűsége nő (sztochasztikus szakasz), azon túl egyértelműen kimutatható elváltozások, megbetegedések jelentkeznek; adott szint felett pedig rövid időn belül beáll a halál (determinisztikus szakasz). A sugárzás azonban csak egyike a számos rizikófaktornak életünkben. A fosszilis energiahordozók égéstermékai, a táplálékkal és egyéb úton a szervezetünkbe kerülő vegyi anyagok stb. is nagy, sőt – gyakoriságukat és kiterjedésüket figyelembe véve – a sugárzásnál sokkal nagyobb kockázatot jelentenek.

A sugárzások hatásával, a káros hatások kivédésével vagy csökkentésével a sugárvédelem foglalkozik. A

sugárvédelemben a káros sugárzás mennyiségét a dózissal jellemezzük. A fizikai dózis a sugárzás energiájának az a hányada, melyet az (élő vagy élettelen) anyag egységnyi tömege elnyel (mértékegysége a gray, 1 Gy = 1 Joule/kg elnyelt energia). A várható sztochasztikus hatást jellemző dózis ezen felül súlyozottan figyelembe veszi a sugárzás összetevőinek (fajta- és energiatfüggő) biológiai hatásosságát, valamint az egyes szervek sugárérzékenységét. Ez az effektív dózis, mértékegysége a sievert (Sv).

Dózismérésre régóta és széleskörűen használják a filmdózismérőt, kihasználva azt, hogy a röntgenfilm sugárzás hatására (előhívás után) feketedést mutat. A filmdózismérő hátránya a viszonylag szűk méréstartomány mellett kezelésének (előhívás) nehézsége. A filmdózismérővel párhuzamosan megjelentek az ionizációs kamrás dózismérők, melyek töltőtoll méretű eszközök voltak; a munka elején fel kellett tölteni őket, majd a munka végeztével külső műszerrel vagy egy beépített piciny elektrométerrel meg lehetett mérni kislülésük mértékét, ennek révén a dózist. E műszerek csak nagyon szűk dózistartományban működnek, emellett kényesek nedvességre, ütésre. Az utóbbi időben a sugárveszélyes munkahelyeken elterjedőben van a miniatűrízált, zsebhen hordozható félvezető detektoros „dózismérők” használata. Ezek a sugárzás dózisteljesítményét (a sugárzás intenzitását) mérik, a dózist abból számítják ki, és adott szint felett riasztanak is. Csak ismert összetételű és homogén sugárzási térben (pl. a nukleáris iparban) elfogadható pontosságúak, a passzív (áram nélkül is működő) dózismérőket számos esetben nem helyettesíthetik.

A 60-as évek elején kerültek használatba a passzív szilárdtest dózismérők. Különböző fajták közül a gyakorlatban végül – egy hosszú átmeneti időszak után – a termolumineszcens dózismérő (TLD) terjedt el széleskörűen. Ha egy TL anyagot (bizonyos fajtájú, általában szervesetlen kristályt) ionizáló sugárzás ér, akkor a kristályban keletkező töltéshordozók egy része olyan ener-

giaállapotba kerül, amelyben szobahőmérsékleten hosszú ideig (több hónapos vagy éves felezési idővel) megmarad. Ha a TL anyagot felhevítjük, akkor a felmelegedés során a tárolt töltéshordók fénykibocsátás kíséretében visszatérnek eredeti állapotukba. A kibocsátott fény mennyisége széles tartományban arányos az előző kimelegítés óta „összegyűjtött” dózissal.

A termolumineszcens dózisméréshez TL anyagra és kiolvasó-kiértékelő berendezésre van szükség. A gyakorlatban a TL anyagokat megfelelő tokozásban a mérendő hely ionizáló (radioaktív, kozmikus) sugárzási terében meghatározott ideig exponálják, ezt követően a kiolvasó berendezéssel kiértékelik azokat.

A kiolvasó-kiértékelő berendezésnek három alapvető része van:

- a TL anyag szabályozott melegítésére szolgáló fűtőegység,
- a (kis dózisok esetén nagyon kis intenzitású) kibocsátott fény mérésére szolgáló fénydetektáló blokk és
- a fényintenzitás-görbéből (fény-görbéből) a dózist kiszámoló kiértékelő egység.

A piacon ma kapható rendszereknél a dózismérő viszonylag olcsó: egy megfelelő tokban elhelyezett por, pasztilla vagy lapka alakú TL anyag. A kiolvasó-kiértékelő készülék ugyanakkor viszonylag drága, nagyméretű laboratóriumi berendezés. Kezelése bonyolult, szakképzett személyzetet igényel.

A 60-as évek közepén Magyarországon több helyen is elkezdtek foglalkozni az akkor csecsemőkorát élő termolumineszcens dozimetriával. A debreceni Kosuth Lajos Tudományegyetemen és a Budapesti Műszaki Egyetemen elsősorban a TL anyagok előállítását tűzték ki célul, a Központi Fizikai Kutató Intézet (KFKI) Sugárvédelmi Osztályán pedig a mérőkészülékek fejlesztésére koncentráltak. Egyre jobb TL anyagok készültek, és sorban születtek a kiolvasó berendezés egyre fejlettebb, egyre kisebb méretű és egyre könnyebben kezelhető változatai. Az utolsó típus félipari változatából – mely még ma is korszerű laboratóriumi eszköznek tekinthető – kissorozatot készült a KFKI Műszaki Szakigazgatásának kivitelezésében.

Úrdozimétria

A lakosságot folyamatosan érő természetes sugárzás (háttérsugárzás) kb. egyenlő arányban földi és égi eredetű, az általa okozott dózisterhelés kb. 2,5 mSv/év. Az égi eredetű összetevő az ún. kozmikus sugárzás, mely részben a csillagközi térből (galaktikus kozmikus sugárzás), részben a Napból (szoláris kozmikus sugárzás) származik. A galaktikus kozmikus sugárzás elsősorban nagyenergiájú töltött részecskékből áll, az összes elem (így a nagyrendszámú elemek) ionjait tartalmazza, és a csillagközi térben általában állandó intenzitású. A szoláris kozmikus sugárzást kisebb energiájú komponensek alkotják, fő összetevői protonok és elektronok, intenzitásuk a naptevékenység függvényében széles ha-

tárok között változik. Napkitörések idején nehezebb ionok is megjelenhetnek, és a sugárzási szint sok nagyságrenddel megnőhet. A galaktikus és szoláris kozmikus sugárzás kölcsönhatásban állnak egymással; a szoláris kozmikus sugárzás intenzitásának növekedésekor a Naprendszeren belül a galaktikus kozmikus sugárzás szintje csökken.

A földfelszínen kettős „védőpajzs” alatt élünk. A Föld mágneses tere a kozmikus sugárzás töltött részecskéit eltéríti, mintegy befogja, létrehozva a földköri sugárzási övezetet (Van-Allen öv), melynek „belsejében” a sugárzási szint igen nagy. A sugárzási övezet a földfelszíntől számított mintegy ötszáz kilométer magasságban kezdődik; a mágneses erővonalak irányának és sűrűségének megfelelően védőhatása az Egyenlítő fölött maximális és a pólusokhoz közeledve erősen csökken. Kitüntetett hely a brazil partok fölötti égtér, ahol – a Föld mágneses tengelyének a geometriai tengelyéhez képesti eltolódása miatt – a sugárzási övezet mélyebbre nyúlik le (Dél-Atlanti anomália). A védőpajzs másik eleme maga a légkör; főként annak alsó, sűrű rétegei a maradék kozmikus sugárzást nagyrészt elnyelik.

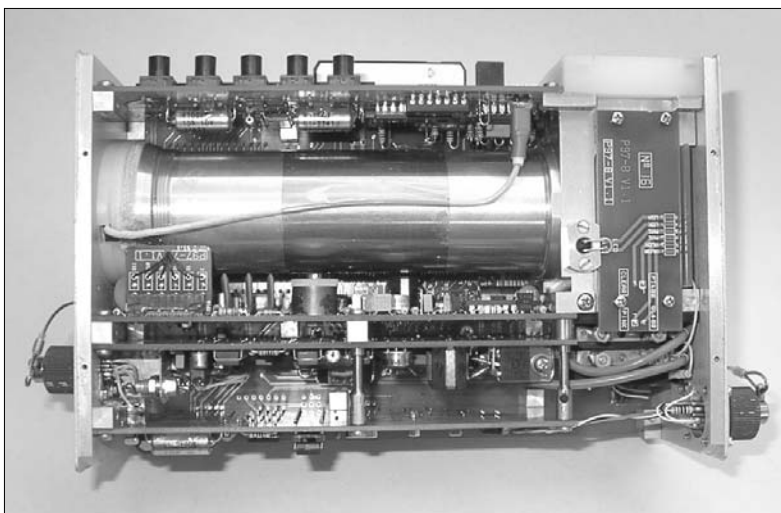
Fentiekből következik, hogy a tengerszint feletti magassággal a sugárzás intenzitása nő. A magas hegyekben lakók dózisterhelése az alföldi lakosokénál nagyobb, az interkontinentális repülőgépjáratok személyzete pedig – különösen a sarkkörökön túli útvonalak esetén – aktív pályafutása alatt jelentős járulékos dózist „gyűjt össze”. Űrhajók esetében, alacsony földköri pályán a védőpajzs egyik eleme (a légkör) már teljesen hiányzik, a dózisterhelés a földinek százszorosára is lehet. Az űrállomások a légkör fékező hatásának csökkentése érdekében egyre magasabb pályán keringenek, és a technológia fejlődésével faluk, ami járulékos védelmet ad, egyre vékonyabb. A növekvő pályamagassággal egyre hosszabb szakaszon repülnek a Dél-Atlanti anomáliában; a napi kétszeri, egyenként alig negyedórás átrepülés alatt ugyanannyi dózist gyűjtenek össze, mint a pálya többi szakaszán az egész nap folyamán. Nem véletlen, hogy űrhajók, űrállomások 500 km feletti magasságban sohasem keringenek, és pályájuk hajlásszöge se nagyobb 60 foknál.

Földköri pályán keringő objektumoknál – azok külső és belső terében egyaránt – a sugárzási kép igen bonyolult, időben és térben nagyon változó. A kozmikus sugárzásnak a felső légkörrel, illetve az űrhajó szerkezeti elemeivel (beleértve annak falát) való kölcsönhatása másodlagos sugárzásokat (például fékezési röntgen-, neutron-sugárzást) hoz létre. Napkitörések idején a sugárzási szint jelentősen megnőhet. Az űrállomásokon folyó állandó, szolgáltatászerű tevékenység következtében az űrben való tartózkodás időtartama jelentősen megnőtt; az igen nagy költséggel kiképzett űrhajósok aktív pályafutásának mindinkább csak dózisterhelésük korlátja szab határt. Az asztronauták űrállomáson kívüli tevékenysége (űrséta) is egyre gyakoribb és hosszabb idejű, ahol fokozottan vannak sugárterhelésnek kitéve. Ma már műholdak és műbolygók

mérésein alapuló, a naptevékenységet folyamatosan figyelő úgynevezett úridőjárásjelző szolgálat működik, melynek riasztó jelzése nyomán az úrsétát azonnal megszakítják, illetve az űrhajósokat időszakosan az űrállomáson belül vastagabb falú, védettebb helyre (pl. zsilipkamra, dokkoló-egység) küldik.

Sugárvédelmi szempontból a jövőbeli bolygóközi utazások még kritikusabbak. A Van-Allen övezet védelme alól kilépve, különlegesen nagy napkitörések idején az űrhajósok – kellő járulékos védelem hiányában – még halálos dózist is kaphatnának. Ilyen űrutazás semmilyen okból nem szakítható meg, egy adott dózis-küszöbérték elérése esetén az asztronauták nem hozhatók vissza a Földre; a néhány órán át tartó nagy sugárintenzitást egy szűk árnyékolócsőbe bújva vészelhetik át. Vannak olyan tervek is, melyek szerint az űrhajót szupravezető tekercsekkel előállított mágneses térrel vennék körül.

1-2. ábra Az ISS-en repülő Pille rendszer elemei (kiolvasó, dózismérő kulcs, memóriakártya) és a kiolvasó belsejének képe



Mindebből nyilvánvaló, hogy az űrhajósok személyi dózisának pontos és naprakész mérése milyen fontos. Az űreszközökön számos módszerrel mérik a sugárzás intenzitását és összetételét, valamint a tényleges dózist, de ezek a mérőberendezések nagyok és bonyolultak, ennél fogva helyhez kötöttek. Az űreszközöknek csak egy vagy néhány pontján mérnek, az inhomogén sugárzási térben helyüket és helyzetüket gyakran változtató űrhajósok személyi dózisának mérésére nem alkalmasak.

Erre a célra általában a TL technikát használják, így pl. a 70-es évek közepén a közel 10 kg súlyú, 20 liter térfogatú KFKI-s TL-kiolvasó berendezés az Interkoszmos együttműködés keretében a Szovjetunióba is elkerült. Ezt a készüléket a moszkvai Orvosbiológiai Problémák Intézete (IBMP) rendszeresen használta a szovjet űrhajósok dózisának mérésére. Ebben az esetben is a klasszikus módszert alkalmazták: a kifűtött (lenullázott) TL dózismérőket az űrhajósok a ruhájukban rögzítve felvitték, majd a földre való visszatérés után a laboratóriumban azokat kiértékeltek. Az űrutazások időtartamának növekedésével ennek a módszernek a korlátai egyre nyilvánvalóbbá váltak: a dózismérőket csak az űrrepülés végén, a földön tudták kiolvasni, rendszeres dózis-kiolvasásra a fedélzeten nem volt mód.

A 70-es évek végén, az első magyar űrrepülés kísérleti programjának összeállításakor IBMP-s kollégáink javasolták: a magyar űrhajós részére a KFKI készítsen egy, az űreszköz fedélzetén történő kiértékelést is lehetővé tevő TL dózismérő rendszert. Az eredmény egy kb. 1 kg tömegű, 1 liter térfogatú készülék lett, mely a *Pille* nevet kapta. Fogyasztása a korábbiénak mindössze néhány százaléka, érzékenysége elegendően nagy akár egy nap, az űrállomáson fellépő dózis mérésére; kibírja a fellövésnél és a dokkolásnál keletkező nagy mechanikai terhelést, és súlytalanságban is működik. A dózismérők úgynevezett bura dózismérők: egy kis, zárt üvegtokban (búrában), vákuumban helyezkedik el a fém kifűtő lapka és a ráragasztott, ezért vele igen jó hőkontaktusban lévő, néhány száz mg tömegű TL anyag. A miniatürizált „kifűtő kályhának” és a TL-anyagnak a dózismérőben való integrálása lehetővé teszi a kiolvasó-kiértékelő készülék méretének és tömegének jelentős csökkentését, a rendszer kezelésének egyszerűsítését. A bura a mechanikai behatások és a külső fény elleni védelem, valamint a könnyű kezelhetőség érdekében egy úgynevezett kulcsba van beépítve. Méréskor mindössze a kiolvasó nyílásba kell helyezni a kulcsot és elfordítani, majd a mérés végén a dózisértéket a kiolvasó kijelzőjéről le lehet olvasni.



3. ábra
Jim Voss NASA-űrhajós a Pillével mér az ISS fedélzetén
(Fotó: NASA)

Farkas Bertalan a Szaljut-6 fedélzetén sikeresen elvégezte a Pillével a napi egy méréssorozatot; ekkor nyílt először lehetőség űrhajósok személyi dózisének fedélzeti meghatározására. A Pille a magyar űrhajós visszatérte után is az űrben maradt, segítségével a kozmonauták méréseket végeztek a Szaljut-7 és a Mir űrállomáson is. 1984-ben Sally Ride, a NASA első női űrhajósa a Pille egy módosított változatával egy amerikai űrrepülőgépen végzett igen sikeres méréssorozatot.

A Pille azonban nem csak az űrállomásokon használható; könnyű és hordozható lévén a földön, a környezet sugárzásának meghatározására is igen alkalmas. Fő előnye, hogy a kihelyezett TL dózismérőket nem kell kiértékelés céljából a laboratóriumba beszállítani; egyszerűbb, gyorsabb és pontosabb, ha a dózismérőket az elhelyezési pontokban mérik le. A gyorság főleg akkor jelenthet előnyt, ha sugárbaeset történik. Ekkor a mérési adat a kiértékelő személy helyszínre érkezésétől számítva 2-3 percen belül rendelkezésre áll. A Tungstram által a 80-as években földi használatra sorozatban gyártott Pilléket eleinte a Paksi Atomerőmű, majd később a polgári védelem is rendszeresítette. A készülék közben sok apró változáson ment keresztül, de alapjában véve a régi, a mérési kiértékelést tekintve nagyrészt analóg integrált áramkörökre épülő műszer maradt. A kiolvasás végén a mért dózist kijelente és azt kézírással naplózták.

Időközben az elektronika sokat fejlődött, és a 90-es évek elején megindult egy új generációs változat fejlesztése. Ebben már megvalósíthattuk mindazt, amit az új technika lehetővé tett. A dózismérő kulcsokba apró memória-csipet építettünk, melynek segítségével a kiolvasó felismeri az éppen lemért dózismérő azonosító számát és egyedi paramétereit; utóbbiakat a kiérté-

keléskor figyelembe is veszi, így a mérések pontossága jelentősen megnőtt. A kiolvasó berendezés által szolgáltatott fűtőáram a TL anyagot - programozott hőmérsékleti profillal – 10...60 másodperc alatt 200...300°C-ra hevíti. A fénydetektáló berendezés legfontosabb eleme a fotoelektron-sokszorozó, amely nagyon kis fényintenzitás esetén is a fényrel arányos, jól mérhető áramot ad; fényintenzitás-átfóga-sa 5-6 nagyságrend. A fotoelektron-sokszorozó tápellátását nagyfeszültségű tápegység biztosítja. A mért dózis a fotoelektron-sokszorozó kifűtés alatti anódáramváltozásának (kifűtési görbe) matematikai kiértékelésével kapható meg.

A kiértékelést, valamint a kiolvasó berendezés belső blokkjai működésének vezérlését mikroprocesszor végzi. A mért adatokat, a mérési paramétereket stb. egy cserélhető memória-kártyán tároljuk, mely-

nek tartalma szabványos soros vonalon számítógéppel (PC-vel) bármikor kiolvasható, és bázisul szolgál a sugárvédelmi rendszer adatnyilvántartása és adatfeldolgozása számára. A Pille összes belső paramétere – a kifűtési hőmérséklet profiljától a fotoelektron-sokszorozó nagyfeszültségéig – a külső számítógépről programozható. A kiolvasó egy benne hagyott dózismérőt meghatározott időközönként automatikusan ki tud értékelni.

Az új Pille prototípusának elkészülte után hamarosan lehetőséget kaptunk az első űrbeni alkalmazásra is. Az Európai Űrügynökséggel (ESA) egyre intenzívebbé váló magyar együttműködés keretében 1995-96-ban fél éven át használták műszerünket a Mir űrállomás fedélzetén, az Euomir'95 repülés során. „Feltérképezték” a Mir-en belüli dózisviszonyokat, automatikus óránkénti kiolvasással megmérték a Föld körüli kozmikus sugárzási tér helyfüggését; ilyen jellegű mérést TL dózismérővel még nem végzett senki.

Az Euomir'95 kísérlettel szinte egyidőben elnyertük a NASA – amerikai űrhajós által a Mir űrállomáson végrehajtandó, új űrbiológiai kísérletekre meghirdetett – pályázatát, célként többek között megjelölve az űrséta járulékos dózisének meghatározását egy módosított, továbbfejlesztett Pille segítségével. Az új űrruhák készítésénél dózismérőink elhelyezésére külön zsebeket alakítottak ki. Űrséta alatt az asztronauták az űrállomáson belüli kontrollméréssel összehasonlítva 3-4-szeres dózist kaptak.

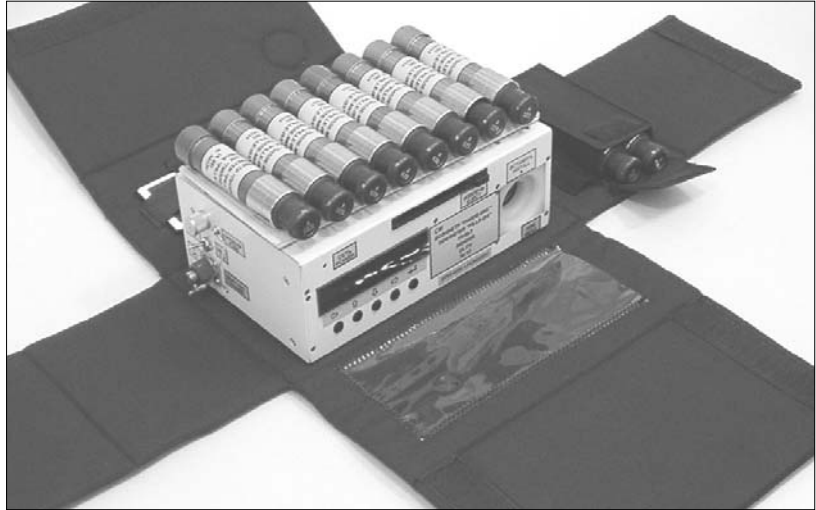
Sajnos egy, az űrállomást ért műszaki baleset következményeképpen mindkét (az ESA, illetve a NASA által használt) Pillénk a Mir sérült és lezárt Szpektr moduljában rekedt, ahonnan egyetlen műszert se tudtak a későbbiekben kihozni. Időközben az „új” Pille földi pályafutása is megkezdődött: Pakson két hordozható, akkumulátoros példányt állítottak az atomerőmű tágabb környezete sugárzásmonitorozásának szolgálta-tába.

A Mir űrállomást időközben felváltotta a közel húsz nemzet közreműködésével épülő Nemzetközi Űrállomás (ISS – International Space Station). A NASA, az ESA valamint az Orosz Űrkutatási Ügynökség (RKA) is nagyfokú érdeklődését fejezte ki egy termolumineszcens dózismérésen alapuló operatív sugárvédelmi ellenőrző rendszer iránt az ISS fedélzetére, mely a Pille berendezésen alapul. A nemzetközi együttműködési szerződések aláírása nyomán - Magyarországnak az űrállomáshoz való hozzájárulásaként – intézetünk a fenti berendezést kifejlesztette és az igényelt darabszámban elkészítette. Alapvetően megváltoztattuk az új kiolvasó úgynevezett kezelői felületét, így használata sokkal egyszerűbbé vált. Az adatok, melyeket eddig memóriakártyán hoztak vissza elemzésre egy-egy mérési sorozat végén, ma már – részben automatikusan – távadatközléssel jutnak le az űrállomásról

A berendezésnek az ISS amerikai szegmensére készített példányát – mellyel alapvetően a biológiai kísérletek során a céltárgyak által elszennvedet dózist szándékoztak mérni – 2001 márciusában vitte egy űrsikló az űrállomás amerikai szegmensére, mellyel az ESA DOS-

4. ábra

Az űrruhán a Pille dózismérője számára kialakított zseb



5. ábra

Az ISS „orosz” Pille rendszer a fellövésre szolgáló „csomagoló-zsákban

MAP kísérletében négy és fél hónapon keresztül több, mint 1700 sikeres fedélzeti mérést hajtottak végre. A NASA az ISS biológiai laborjának kiépítését és működtetését a költségvetés kurtítása miatt hosszabb ideig szüneteltette, de komoly esély van arra, hogy a Pillét a jövőben űrséták során személyi dozimetriai célra alkalmazza.

Az ISS orosz szegmensére 2003 augusztusában szállították fel egy Progressz teherűrhajóval a Pille kis-sé módosított változatát. Ez a készülék egy CAN-buszos interfésszel lett kiegészítve, azon keresztül közvetlenül kapcsolódik az űrállomás egyik adatgyűjtő rendszerhez. A mérési adatok letöltése automatikusan történik, illetve a központi számítógép a hálózaton keresztül mérést is kezdeményezhet. A Pille itt az úgynevezett dozimetriai szolgálati rendszer része, az űrhajósok egészségvédelmének eszköze. Az űrállomás különböző pontjaira kihelyezett dózismérőket havi rendszerességgel olvassák ki; űrséták alatt minden esetben mérik a járulékos dózist és egy, a kiolvasóban lévő dózismérővel 90 percenként (ennyi az ISS keringési ideje) végeznek automatikus, nagy felbontású méréseket. Rendkívüli eseményekkor, mint például a 2003. november végi extrém nagy napkitörések idején, egy héten át napi kétszeri kiolvasással követték nyomon az űrhajósok dózisterhelését.

Elsősorban NASA-s kollégáink biztatására kifejlesztettük az új, mikroprocesszoros Pille földi mérésekre szolgáló kereskedelmi változatát. A dózismérő felépítése alapvetően megváltozott, mérete lecsökkent, és a rendszer tervezésekor a viszonylag olcsó tömeggyártathatóság volt a legfőbb szempont; ugyanakkor több tekintetben az űrváltozaténál jobb mérési paraméterekkel rendelkezik. A földi készülék létrehozása jó példa arra, hogy miként hasznosíthatók az űrkutatásban elért fejlesztési eredmények a mindennapi életben.

GPS-mérések abszolút feldolgozását terhelő hibahatások vizsgálata

TAKÁCS BENCE egyetemi tanársegéd

BME Általános- és Felsőgeodézia Tanszék,
bence@agt.bme.hu

Reviewed

Kulcsszavak: abszolút helymeghatározás, szubméteres pontosság, permanens állomások, koordináta hibák

A korlátozott hozzáférés (Selective Availability, SA) felfüggesztése után új fejezet kezdődött a GPS-technikában. Korábban a Híradástechnikában is foglalkoztunk az SA nélküli abszolút helymeghatározás pontosságával. Megállapítottuk, hogy kedvező körülmények között néhány méteres pontosság érhető el. Az utóbbi években a GPS-felhasználók száma rohamosan nőtt, ebben egészen biztos szerepe van az SA felfüggesztésének is.

2000 májusa nemcsak a gyakorlati alkalmazások számára, hanem a tudományos kutatók szempontjából is fordulópontnak tekinthető. Korábban a pontosság megsértésének hatása egy nagyságrenddel nagyobb volt, mint az abszolút méréseket terhelő azon szabályos hibák hatása, amelyeket a legegyszerűbb és leggyakrabban alkalmazott modellekkel nem tudunk figyelembe venni. Egyes vevők a szabályos hibák egy részét – feltehetően a korlátozott hozzáférés mindent elnyomó hibahatása miatt – nem veszik figyelembe. Az abszolút méréseket terhelő hibák hatásának jelentős részét korábban csak korlátozottan lehetett tanulmányozni.

A SA felfüggesztése után célszerűnek látszik, hogy az abszolút helymeghatározást terhelő szabályos és véletlen jellegű hibák hatását alaposan megvizsgáljuk, újraértékeljük. Ezzel kapcsolatos legfontosabb eredményeinket foglaljuk össze ebben a tanulmányban.

Bevezetés

A GPS rendszer üzemeltetői szerint 95 százalékos konfidenciaszinten a vízszintes helyzet pontossága 13 m, a magasságié 22 m [GPS SPS Performance Standard, 2001]. A pontosság további fokozására két lehetőség kínálkozik:

- abszolút helymeghatározás helyett relatív helymeghatározás, ez a geodéziában és a térinformatikában széles körben alkalmazott módszer; vagy
- a szabályos hibák hatásának pontosabb figyelembevétele finomabb modellek alapján.

A második módszer a szakirodalomban szabatos abszolút helymeghatározás (*precise single point positioning*) néven ismert. Tulajdonképpen ebben az esetben sem beszélhetünk szigorú értelemben vett abszolút helymeghatározásról, hiszen a szabályos hibák hatásának modellezése permanens GPS-állomások méréseinek feldolgozása útján valósul meg. A felhasználók zöme kényelmi és gyakorlati szempontok alapján

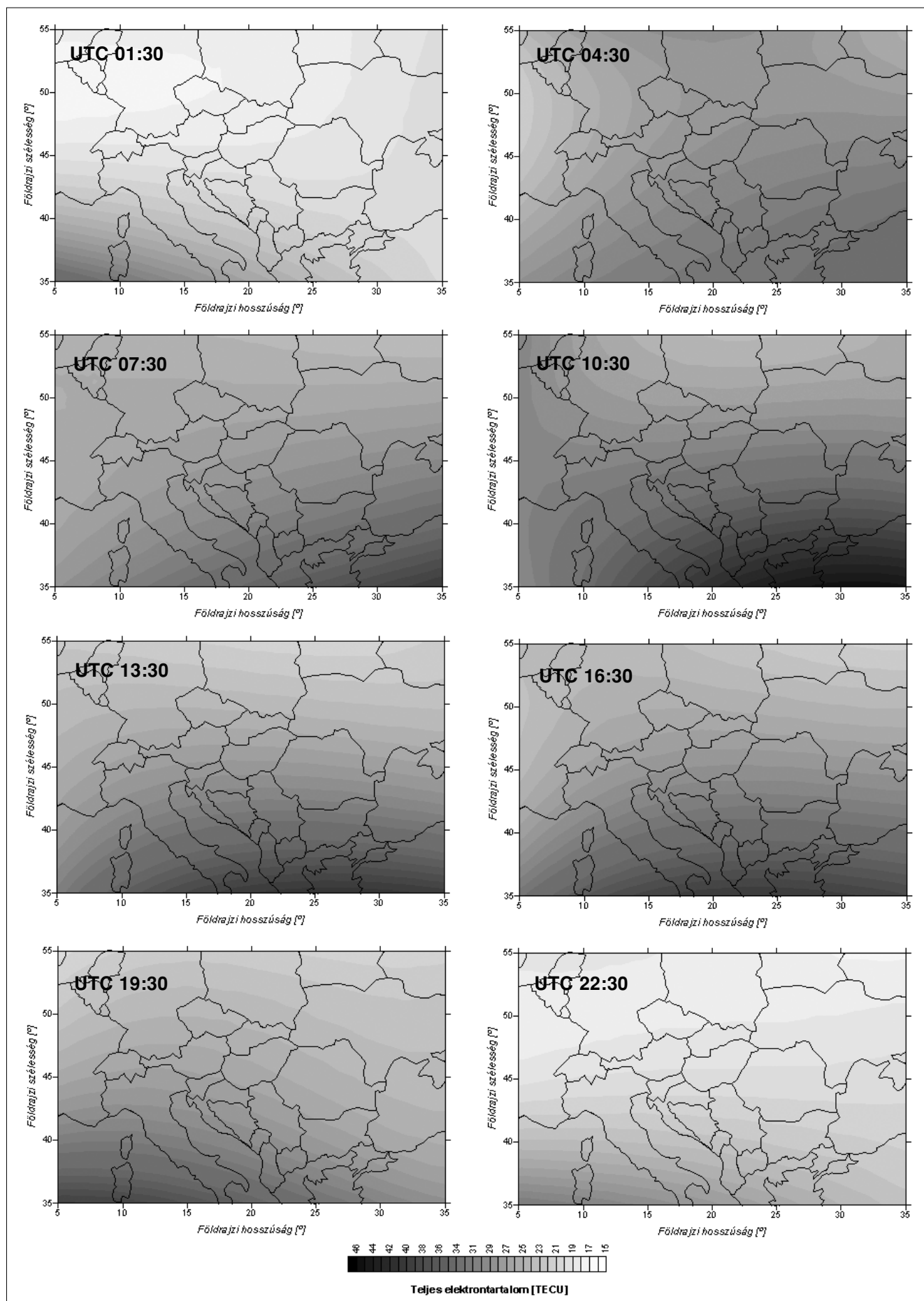
egyetlen vevővel szeretne dolgozni, ezért sok esetben a relatív helymeghatározási technikát is abszolút technikának tüntetik fel, így a felhasználó szinte „nem is veszi észre”, hogy relatív helymeghatározást végez.

Elsősorban a Nemzetközi GPS Szolgálat (IGS) tevékenységének köszönhetően a szabályos hibák hatásának nagy része utófeldolgozás esetén pontos modellek segítségével vehető figyelembe. A permanens állomások mérései tudományos igényű feldolgozásának eredményeként a műholdak pályája néhány centiméteres pontossággal ismert, ugyanilyen pontosan ismerjük (távolságra átszámítva) a műhold és vevő órahibák hatásának értékét is. Végül meglehetősen pontos ionoszféra-térképek is segítik a szabatos abszolút helymeghatározást.

A következőkben az abszolút méréseket terhelő legfontosabb szabályos hibákat vesszük górcső alá. Bemutatjuk, hogy a „szokásos” modelleket hogyan lehet permanens GPS-állomások mérései alapján tovább finomítani, így a néhány méteres pontosság egy méter, vagy az alatti értékre fokozható.

Az ionoszféra hatása

A számítások egyszerűsége kedvéért azt szokás feltételezni, hogy a műhold által sugárzott jelek egész pályájuk mentén az elektromágneses sugárzás vákuumbeli terjedési sebességével haladnak. A műholdak 20 ezer km-es pályamagassága miatt a jelek útjuk nagy részét valóban vákuumban teszik meg, de a vevőbe érkezésük előtt áthaladnak a földi légkörön, miközben sebességük nem elhanyagolható mértékben módosul. A deciméteres rádióhullámok terjedése szempontjából a földi légkör két, egymástól lényegesen eltérő tulajdonságú rétegből (ionoszféra és troposzféra) áll. A magasabban (40 km és 1000 km határok között) elhelyezkedő ionoszférában elsősorban a Nap ionizáló ultraibolya sugárzásának hatására elektromos töltésű részecskék vannak, amelyek a különböző frekvenciájú rádióhullámok terjedési sebességét eltérő mértékben módosítják.



1. ábra Lokális modellek alapján előállított ionosféra-térképek Magyarországra és környezetére (2002. június 16-i adatok)

sítják. Az ionoszféra tehát a deciméteres rádióhullámok terjedése szempontjából diszperzív közeg, törésmutatója a sugárzás frekvenciájától (is) függ.

Az ionoszféra hatása többféleképpen is figyelembe vehető. Gyakorlati szempontok alapján két módszert emelhetünk ki:

- számítás útján, különböző ionoszféra-modellek adataiból, vagy
- kétfrekvenciás vevőkkel kiküszöbölés útján, a hatás frekvenciafüggőségének felhasználásával.

Itt most a modellezést tárgyaljuk részletesen, hiszen általában kétfrekvenciás vevőkkel csak a szélső pontosságot igénylő geodéziai felhasználók rendelkeznek. Modellezéskor a számítások egyszerűsítése érdekében feltételezik, hogy az ionoszféra összes szabad elektronja egy elemi vastagságú rétegben sűrűsödik össze. A modellek az elemi vastagságú réteg egyes pontjainak teljes elektrontartalmát (*Total Electron Content, TEC*) írják le.

Az ionoszféra jelkésleltető hatását leggyakrabban a GPS-műholdak navigációs üzenetei között sugárzott *Klobuchar*-féle ionoszféra-modell paramétereinek alapján vesszük figyelembe. A modell egy egyszerű koszinusz függvényen alapul, a részletek megtalálhatók például [*Parkinson és Spilker, 1996*]-ban. A *Klobuchar*-modell legfontosabb előnye, hogy a paramétereket maguk a GPS-műholdak valós időben sugározzák, így a számításhoz nincs szükség „külső” adatokra. Hátránya, hogy a tapasztalatok szerint a modellel az ionoszféra hatásának mindössze 50-60%-a vehető figyelembe.

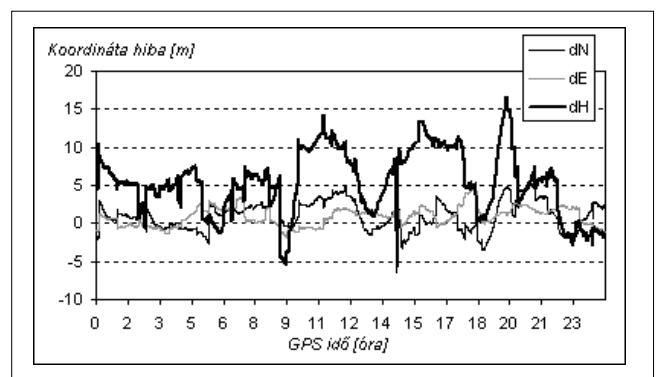
A *Klobuchar*-modellnél hatékonyabban lokális ionoszféra-modellekkel vagy globális ionoszféra-térképekkel írható le az ionoszféra jelkésleltető hatása. Előbbi az elemi vastagságú rétegmodell alacsonyfokú kétdimenziós *Taylor*-polinomokkal, utóbbi harmonikus gömbfüggvénysorokkal közelíti. Az összefüggések megtalálhatók a Bernese tudományos feldolgozó szoftver dokumentációjában [*Beutler, 2001*].

A lokális ionoszféra-modellek előnye, hogy néhány permanens állomás adataiból néhány ezer kilométer kiterjedésű területre egyszerű összefüggések alapján, akár valós időben határozhatók meg a modellek. A globális ionoszféra-térképek ezzel szemben az egész Föld területére érvényesek, a lokális modelleknél valamivel pontosabb modelleket jelentenek, de az összetett feldolgozás szükségessége miatt a paraméterek csak utófeldolgozással határozhatók meg a kellő pontossággal. A globális ionoszféra-térképekről bővebben a berni feldolgozó központ honlapján olvashatunk (www.aiub.unibe.ch/ionosphere.html).

Egy korábbi tanulmányban [*Takács, 2003*] Magyarország és környezetének területére, saját fejlesztésű feldolgozó programokkal vezettünk le lokális ionoszféra-modelleket. Itt a részletekkel nem foglalkozunk, csupán bemutatjuk a modell alapján egy napra vonatkozó, az elektrontartalmat ábrázoló térképeket (*1. ábra – az előző oldalon*).

A továbbiakban bemutatjuk az egyes ionoszféra-modellek és az abszolút helymeghatározás pontossága közötti összefüggéseket. Ismert, hogy a korlátozott hozzáférés hatása után az abszolút méréseket terhelő szabályos hibák közül az ionoszféra jelkésleltető hatása a legnagyobb [*Parkinson és Spilker, 1996*]. A vizsgálatokhoz a BME permanens állomásának egy napi adatait különböző modellek alapján dolgoztuk fel, az abszolút helymeghatározás hibáit láthatjuk a következő ábrákon. A feldolgozást saját fejlesztésű GPS-feldolgozó programmal végeztük.

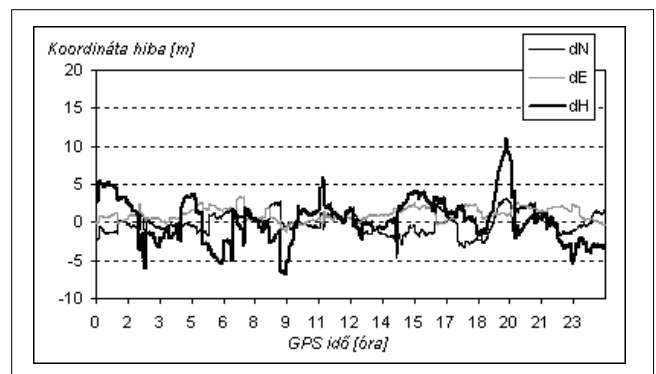
Először a *Klobuchar*-modellt alkalmaztuk, azokkal a paraméterekkel, amelyeket maguk a GPS-műholdak sugároznak (*2. ábra*). Ezzel a módszerrel dolgozik a legtöbb navigációs GPS-vevő. A kapott koordináta-hibák magassági értelemben elérik a 15 métert.



2. ábra

Az abszolút helymeghatározás hibája a BME permanens állomáson (mérés: 2002. jún. 16., ionoszféra-modell: *Klobuchar*-modell, sugárzott paraméterekkel)

Ezután az ionoszféra hatását az 1. ábrán bemutatott lokális ionoszféra-modellek alapján vettük figyelembe (*3. ábra*). Jól látható, hogy a lokális ionoszféra-modellekkel az abszolút helymeghatározást terhelő hibák csökkenése elsősorban magassági értelemben jelentős: amíg a koordináta-hibák szórása mindhárom összetevő esetében nagyjából egyformán, mintegy 30 százalékkal csökkenthető, az átlagos magassági hiba több mint 80 százalékkal csökken.



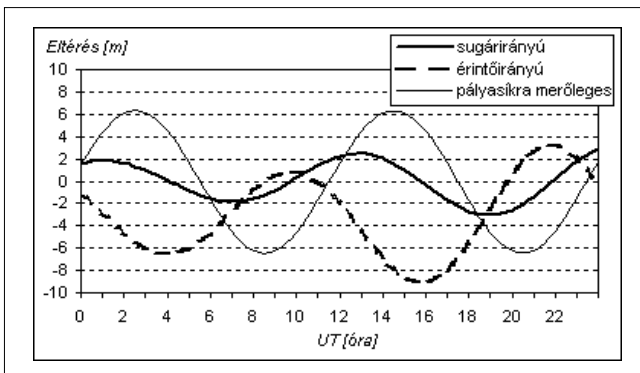
3. ábra

Az abszolút helymeghatározás hibája a BME permanens állomáson (mérés: 2002. jún. 16., ionoszféra-modell: lokális)

A műholdak pálya- és órahibája

A GPS-szel végzett helymeghatározáshoz ismernünk kell a műholdak koordinátáit. A legtöbb alkalmazás a fedélzeti pályaadatok alapján számítja a műholdak koordinátáit. Ennek az a legfontosabb előnye, hogy a szükséges adatokat maguk a GPS-műholdak sugározzák, így „külső” adatforrásra nincs szükség, illetve az adatok valós időben állnak rendelkezésre. A módszer hátránya azonban, hogy a műholdpozíciókat több méteres hibák is terhelhetik, emiatt bizonyos alkalmazásokhoz ez a módszer nem eléggé pontos. A pontosság fokozható a permanens állomások hálózatában végzett feldolgozás eredményeként rendelkezésre álló ún. precíz pályaadatok használatával.

A különböző pályák összehasonlítását elvégezhetjük a Bernese feldolgozó szoftverrel. A két adatsor alapján a program kiszámítja az egyes műhold-koordináták különbségét. A gyakorlatban a ezeket a pálya rendszerében érdemes megadni, sugárirányú, érintőirányú és a pályasíkra merőleges összetevőkre bontva (4. ábra).

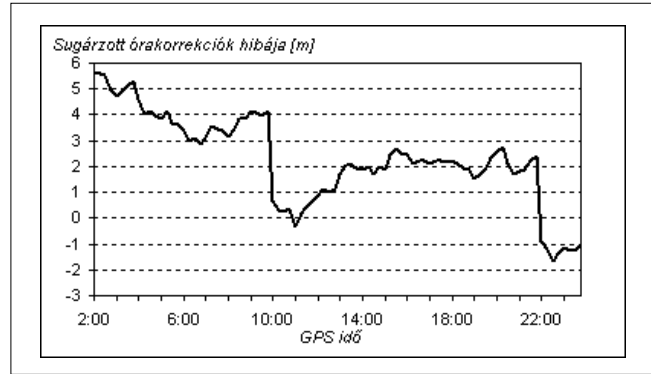


4. ábra A fedélzeti pályaelemekből számított és a végleges műhold-koordináták eltérése (2002. jún. 16., prn: 08)

A távolság-meghatározás módjából következik, hogy a futási idő megállapításához mind a műholdak fedélzetén, mind a vevőben órát kell elhelyezni. Mind a műholdak, mind a vevő órája által „mutatott” idő eltér az úgynevezett GPS-időtől, az eltérést a továbbiakban óraigazítatlanságnak fogjuk nevezni. A műholdak órájának igazítatlanságát általában a műholdak navigációs üzenetei között sugárzott másodfokú összefüggés alapján, modellezéssel szokták figyelembe venni.

A precíz pályaadatokhoz hasonlóan a Nemzetközi GPS Szolgálat permanens GPS-állomások méréseire támaszkodva meghatározza a műholdak óraigazítatlanságának gyakorlatilag hibátlan értékeit is. Ezek alapján meghatározhatjuk a navigációs üzenetek között sugárzott modellek pontosságát, illetve az eltérést korrekcióként vehetjük figyelembe (5. ábra).

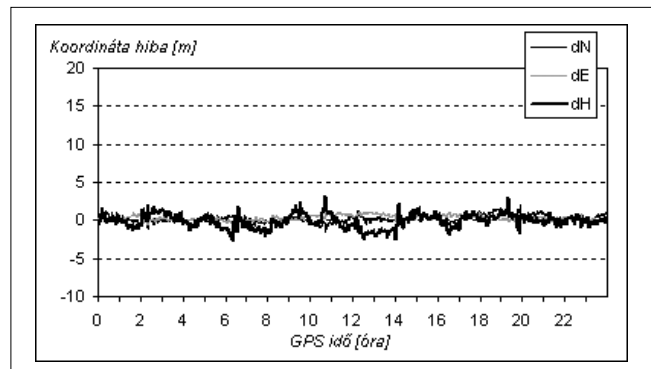
Ha a helymeghatározást a precíz pályák alapján kívánjuk végezni, akkor a műhold-koordinátákat elvileg a 15 percenként megadott koordináták megfelelő interpolálással (pl. 17-ed fokú *Lagrange*-féle polinomos interpolációval) történő sűrítésével is kiszámíthatjuk. Ennél számítástechnikailag kedvezőbb megoldás, ha a



5. ábra A műholdak által sugárzott óraparamétereiből kiszámítható órorrekciók hibája (2002. jún. 16., prn: 02)

precíz műhold-koordináták és a fedélzeti pályaelemekből levezethető műhold-koordináták különbségét, mint korrekciót számítjuk, majd ezzel a korrekcióval javítjuk meg a fedélzeti pályaelemekből levezethető műhold-koordinátákat. A korrekciós módszer előnye, hogy a 15 perces időpontokra kiszámított korrekciók lényegesen egyszerűbb interpolációs eljárásokkal sűríthetők, mint a precíz műhold-koordináták. Hasonlóan járhatunk el az órorrekciók esetében is.

A 6. ábrán a BME permanens állomásának már vizsgált méréseit dolgoztuk fel az IGS precíz pálya és órorrekciói alapján. Jól látható, hogy a vízszintes koordinátákat terhelő hibák 2 méternél, a magassági koordinátákat terhelő hibák pedig 3 méternél kisebbek. A hibák számtani középértéke a három koordináta összetevő esetében gyakorlatilag azonos, 30 cm-nél kisebb, a szórás pedig 1 méternél kisebb.



6. ábra Az abszolút helymeghatározás hibája a BME permanens állomáson (mérés: 2002. jún. 16., berni lokális ionoszféra-modell, IGS precíz pályák és órorrekciók)

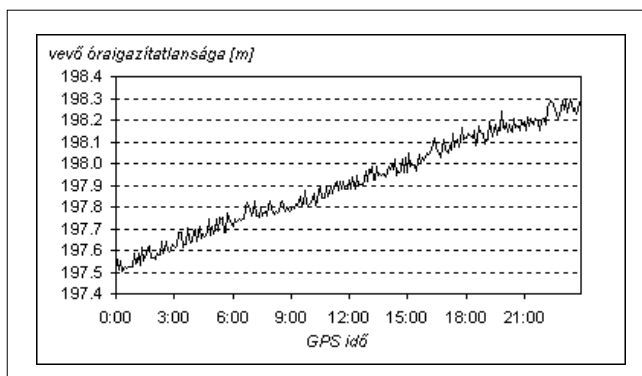
A vevő órahibája

A vevőkben található egyszerűbb kvarcórák nagyságrendekkel pontatlanabbak, mint a műholdak órája. A vevő óraigazítatlanságát a legtöbb alkalmazásnál ismeretlennek tekintik, értékét a GPS-mérésekből határozzák meg. Ezért szükséges a térbeli helymeghatározáshoz legalább négy műholdra vonatkozó egyidejű mérés, jól lehet tisztán geometriai értelemben három is elegendő.

A Nemzetközi GPS Szolgálat a műholdak óraigazítatlanságának értékei mellett egyes állomások vevő

óraigazítatlanságának értékeit is megadja diszkrét időpontokban (kerek öt percenként). Az adatok elérhetők a Szolgálat szerverén (ftp://igs.cb.jpl.nasa.gov/igs_cb/product). Az óraigazítatlanság értékek pontosságát a Szolgálat néhány cm-re becsüli. (Az óraigazítatlanság természetesen idő-mértékegységben értendő, mi azonban a továbbiakban ezen a néven az óraigazítatlanság hatását értjük, amely a vákuumbeli terjedési sebességgel való szorzás után már távolság mértékegységű.)

Sajnos a vizsgálatainkhoz a BME állomás mérései sajnos nem használhatók fel, mert a BME állomása nem tagja az IGS hálózatának. Ezért a továbbiakban egy másik állomás adatait BRUS (Brüsszel, Belgium) vagyunk kénytelenek használni. A következő ábra BRUS (Brüsszel, Belgium) állomás vevőjének óraigazítatlanságát mutatja az IGS adatai alapján.



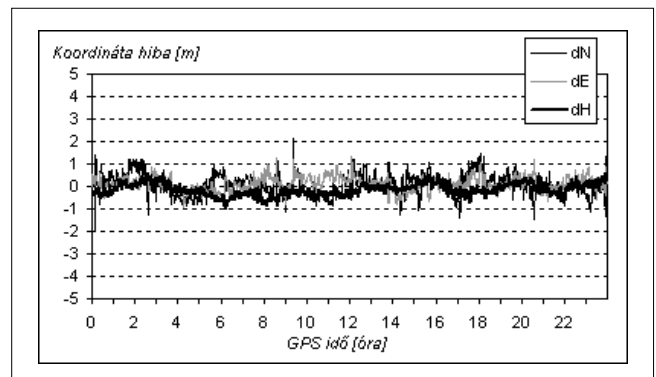
7. ábra A vevő óraigazítatlansága BRUS állomáson, 2002. június 16-án az IGS adatai alapján

A 7. ábra alapján megállapítható, hogy BRUS állomáson a hidrogén maserrel vezérelt vevő óraigazítatlansága egyszerű függvényvel (például kiegyenlítő egyenessel) jól leírható. Most megmutatjuk, hogy az abszolút helymeghatározás pontossága hogyan alakul, ha a vevő óraigazítatlanságát nem tekintjük ismeretlennek, hanem az előző ábrán bemutatott értékekre illesztett kiegyenlítő egyenes alapján modellezéssel vesszük figyelembe. A helymeghatározás egyenletrendszerében tehát a szokásostól eltérően nem négy, hanem csak három ismeretlen szerepel.

A 8. ábrán jól látható, hogy a magassági koordináták hibája nem nagyobb, mint a vízszinteseké, a hibák mindhárom összetevő esetében gyakorlatilag egy méternél kisebbek. Tájékoztatóul érdemes megemlíteni, hogy a „nem szabatos” abszolút helymeghatározás esetére érvényes „ököl szabály” szerint a magasságmeghatározás másfél-kétszer pontatlanabb a vízszintes helyzet meghatározásánál, tehát mintegy háromszor pontatlanabb a vízszintes koordináták meghatározásánál.

Az IGS vevő-óraigazítatlanságának értékeire alapozott módszer két hátrányát említhetjük:

- csak nagy pontosságú külső frekvenciaetalonnal vezérelt vevők esetében, vagyis csak helyhez kötött állomásokon alkalmazható;
- a helymeghatározás csak utófeldolgozással oldható meg.



8. ábra Az abszolút helymeghatározás koordináta hibái BRUS állomáson 2002. június 16-án, a vevő óraigazítatlanságát az IGS adatokra illeszthető kiegyenlítő egyenessel modellezzük

Ezért elsősorban a második hátrány megszüntetésére teszünk javaslatot, amikor a vevő óraigazítatlanságát Kálmán-szűrővel simítjuk. Az abszolút helymeghatározás egyenletrendszerét két lépésben oldjuk meg:

- 1) az egyenletrendszer felírása és megoldása négy ismeretlennel;
- 2) az óraigazítatlanság simítása Kálmán-szűrővel, az egyenletrendszer felírása és megoldása a simított érték figyelembevételével, vagyis három ismeretlennel.

Itt a részleteket hely hiányában nem közöljük, csak annyit jegyzünk meg, hogy a Kálmán-szűrő alkalmazásával gyakorlatilag azonos eredmények érhetők el, mint az IGS adatai alapján minden olyan permanens állomás méréseinek feldolgozásakor, amelynek órajárása egyszerű függvényekkel megfelelően modellezhető.

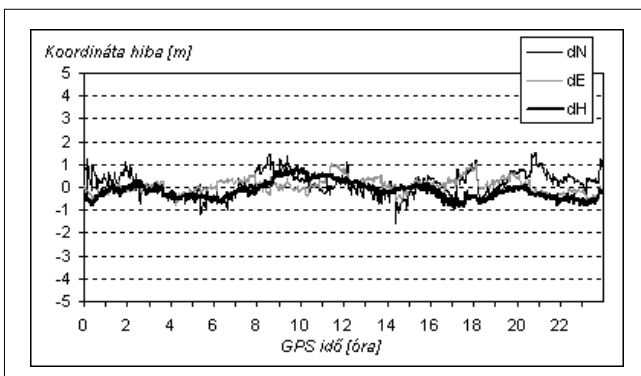
Kódmérési zaj

A cikkben eddig megvizsgáltuk az abszolút méréseket terhelő legfontosabb szabályos hibák hatását. Nem foglalkoztunk a méréseket terhelő véletlen jellegű hibákkal, azaz a kódmérési zajjal. Ismert, hogy a fázisméréseket terhelő zaj több nagyságrenddel kisebb, gyakorlatilag elhanyagolható a kódméréseket terhelő zajhoz képest. Elvileg az abszolút helymeghatározást fázismérési adatokkal is végezhetnénk, de a jól ismert ciklus-többértelműségi probléma miatt ezt a gyakorlatban meglehetősen nehéz kivitelezni. Optimális megoldást adhat azonban a fázismérési és kódmérési adatok együttes feldolgozása. Alapelve, hogy a kódtávolságokat a fázistávolságokkal simítjuk.

A leginkább elterjedt módszer szerint bármely időpontban a fázisméréseket terhelő ciklus-többértelműség értéke gyakorlatilag megegyezik a kódmérés és fázismérés eredményének különbségével. Természetesen ezt az értéket terheli a kódmérési zaj, amelynek hatása egyszerű matematikai eszközökkel (például futó átlagolás) is jelentősen csökkenthető. A módszer két előnye: hatékony és egyszerű. Egyik hátránya: egyfrekvenciás vevők esetén a simítás időintervalluma korlátozott, hiszen az ionosféra hatása a kódmérésekre és a

fázismérésekre ellenkező előjelű. Másik hátránya, hogy a simítás kezdete, ezzel együtt a simításba éppen bevont adatok száma műholdanként eltérő, vagyis ha bármely okból az egyik műholdra vonatkozóan a simítás megszakad, akkor a simításnak a többi műhold esetében gyakorlatilag nincs értelme.

Ha méréseinket két vivőfrekvencián végezzük, akkor az ionoszféra okozta probléma gyakorlatilag teljes mértékben kiküszöbölhető. A két vivőfrekvencia további előnye, hogy a különböző lineáris kombinációk vizsgálata lehetőséget ad a ciklusugrások hatásának kimutatására is. Ezen az algoritmuson alapul a Bernese tudományos feldolgozó programban alkalmazott módszer. A simítás hatását az abszolút helymeghatározás pontosságára BRUS állomás korábban már vizsgált adatain keresztül mutatjuk be. A 9. ábra az abszolút helymeghatározás koordináta-hibáit szemlélteti. A szabályos hibák hatását a cikkben ismertetett legpontosabb modellek alapján vettük figyelembe, azaz az ionoszféra hatását lokális ionoszféra-modellek alapján, a műholdak koordináta- és órahibáit az IGS végleges adatai alapján, a vevő óraigazítatlanságát pedig Kálmán-szűréssel simítottuk.



9. ábra Az abszolút helymeghatározás koordináta hibái BRUS állomáson 2002. jún. 16-án, (a kódérések fázisméréssel történő simítását a Bernese programmal végeztük)

Az ábrán jól látszik, hogy az abszolút helymeghatározás hibái tovább csökkenthetők, azonban a méréseket még további szabályos hibák hatása (pl. troposféra jelkésleltető hatása, többutas terjedés) is terheli.

Összefoglalás

A cikkben bemutatott kutatás legfontosabb célkitűzései között szerepel az egy méter pontosságú, valós idejű, „abszolút” helymeghatározási módszer bemutatása. Ehhez az abszolút méréseket terhelő szabályos hibák hatását a szokásosnál finomabb modellek alapján kell figyelembe venni.

Először a lokális ionoszféra-modellekkel foglalkoztunk, a módszerrel néhány ezer km kiterjedésű területre néhány, a területet közrefogó permanens állomás méréseiből hatékonyan és pontosan vezethetők le az ionoszféra-modellek, akár valós időben is. Bemutattuk, hogy a lokális ionoszféra-modellekkel az abszolút helymeghatározást terhelő hibák csökkenése elsősorban magas-

sági értelemben jelentős: amíg a koordináta-hibák szórása mindhárom összetevő esetében nagyjából egyformán, mintegy 30 százalékkal csökkenthető, az átlagos magassági hiba több mint 80 százalékkal csökken.

Az ionoszféra után a műholdak pálya- és órahibáit vizsgáltuk meg. A Nemzetközi GPS Szolgálat permanens állomások méréseinek feldolgozásán keresztül a műholdak pálya és órahibáira vonatkozóan különböző modelleket bocsát az Interneten keresztül a felhasználók rendelkezésére. A modellek a pontosság és a látencia tekintetében térnek el egymástól. A legpontosabb (végleges) modellek néhány centiméterre pontosak, ezek mintegy két hét időkéssedelemmel érhetőek el. Megmutattuk, hogy a végleges modellek alkalmazásával az abszolút koordináta-hibák számtani középértéke 30 cm-nél kisebb, szórásuk pedig egy méter alatti.

Ezután a vevő órahiba kérdésével foglalkoztunk. Az óraigazítatlanságot általában ismeretlen mennyiségnek tekintik, értékét a GPS-mérésekből határozzák meg. Laboratóriumi körülmények között megoldható, hogy a GPS-vevők órajelét külső, nagy pontosságú frekvenciaetalon vezérelje. Megmutattuk, hogy egyes vevők esetében az óraigazítatlanság értékét nem szükséges ismeretlennek tekinteni, hanem a Nemzetközi GPS Szolgálat adatai alapján egyszerű modellekkel figyelembe lehet venni. A vevő órahiba és a magasságmeghatározás hibája közötti erős korreláció alapján természetes, hogy a módszer elsősorban a magassági helymeghatározás hibáira van kedvező hatással; a hibák szórása 0,9 m-ről 0,3 m-re csökkent, azaz a pontosság mintegy megháromszorozható. A modellezés után mindhárom koordináta-összetevő esetében a hibák szórása kisebb, mint 0,5 méter, a legnagyobb hibák sem haladják meg a 2,0 métert. Sajnos a módszer csak a nagy pontosságú külső frekvenciaetalonnal vezérelt vevők esetében alkalmazható.

Végül a kódéréseket terhelő mérési zaj kérdése került elő. Megmutattam, hogy a fázis- és kódérése adatok optimális feldolgozásának eredményeként a kódérése zaj jelentősen csökkenthető.

Irodalom

- [1] Beutler G., et al.: Bernese GPS Software Version 4.2: Documentation, Astronomical Institute, University of Berne, Switzerland 2001.
- [1] Global Positioning System Standard Positioning Service Performance Standard, 2001 October (www.navcen.uscg.gov/gps/geninfo/2001SPSPerformanceStandardFINAL.pdf)
- [1] Parkinson, B.W., Spilker, J. J. (eds): Global Positioning System: Theory and Applications I-II Vol. 164. Progress in Astronautics and Aeronautics, AIAA Washington 1996.
- [1] Takács B.: Műholdas helymeghatározás a korlátozott hozzáférés (SA) felfüggesztése után, Híradástechnika 2001., Vol. LVI., No.6., pp.3–8
- [1] Takács B.: Lokális ionoszféra-modellek Magyarország területére. Geodézia és Kartográfia 2003., Vol. LV., No.6., pp.19–25.

Ötven éves a Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék

PÉCELI GÁBOR, SELÉNYI ENDRE egyetemi tanárok

peceli@mit.bme.hu, selenyi@mit.bme.hu

A cikk a Tanszék legfontosabb oktatási és kutatási eredményeinek bemutatásával nyomon követi a mérés-technika és az informatika 50 éves integrálódási folyamatát. A jubileum alkalmából rövid áttekintést adunk a Tanszék múltjáról és jelenéről, az oktatás és kutatás területén elért eredményeinkről. A kezdeti időszakra való visszaemlékezés során nagymértékben támaszkodunk Schnell László professzornak a Tanszék 25 éves évfordulójakor írt cikkére, abból több helyen csupán kisebb módosításokkal idézünk [1].

A Tanszék kezdetben egyedül, később másodmagával 40 éven keresztül volt a gazdája annak a „műszer” szaknak, amely mindig is átmenetet jelentett a villamosmérnöki képzés két klasszikus területe, az erősáram és a híradástechnika között. Az elmúlt évtizedekben itt végzett több ezer mérnök egyaránt megismerte a fizikai világ mérendő folyamatait és a finommechanikának és az analóg és digitális információfeldolgozási technikának a mérőműszerekben való alkalmazását. Az utóbbi tíz évben az új felsőoktatási struktúrában a Tanszék a gazdája a „beágyazott rendszerek”, az „intelligens rendszerek” és a „szolgáltatásbiztos számítástechnika” szakirányoknak.

Visszapillantás a kezdetekre

A Tanszék megalakulásának körülményei

1945 előtt nem volt jelentős iparszerű műszergyártás Magyarországon. Az államosított, jórészt apró magáncégek alkották az akkor megszületett magyar műszeripart. A kormányzat felismerte a műszeriparban rejlő lehetőségeket és erőfeszítéseket tett az iparág fejlesztése érdekében. A fejlesztés egyik akadályja volt azonban a szakterülethez értő, kvalifikált szakemberek nyomasztó hiánya. A műszeriparral kapcsolódó szakterületeken (finommechanika, optika, elektronika stb.) ugyanis felsőfokú képzés ez ideig nem folyt Magyarországon, ezért problémát jelentett az új üzemek ellátása szakemberekkel.

A műszeripar igényeihez illeszkedő mérnökök képzését *Kolos Richárd professzor (1904–1969)* indította meg. Kolos Richárd 1949-ben kapott megbízást az első állami villamos mérőműszergyár, az Elektromos Készülékek és Mérőműszerek Gyára megszervezésére és műszaki vezetésére. E beosztásban alkalmas nyílt közvetlenül érzékelni a szakterületen alkotó munkára alkalmas szakemberek hiányát. Javaslatára 1949-ben létrehozták az Állami Műszaki Főiskolán a Műszertagozatot, amelynek 1951-53-ig vezetője volt. Ezen az esti tagozaton indult meg a műszerszakos képzés, majd a Budapesti Műszaki Egyetemen folytatódott, amikor – 1951-ben – az Állami Műszaki Főiskola a Budapesti Műszaki

Egyetem esti tagozatává vált. A műszerszakos mérnökök nappali képzése az 1952-53-as tanévben indult meg az 1949-ben alakult Villamosmérnöki Karon.

A Műszer és Finommechanika tanszék, a mai Méréstechnika és Információs Rendszerek Tanszék elődje, hivatalosan 1954-ben alakult meg, de mint oktatási csoport már korábban létrejött, részben az akkori Villamos Gépek és Mérések tanszékhez tartozóan. A megalakult Tanszék vezetésére Kolos Richárd kapott megbízást, aki ekkor a Kohó- és Gépipari Minisztériumnak a műszeriparért felelős miniszter-helyettese volt. Különböző magas állami beosztásai mellett 1967-ig volt a Tanszék vezetője.

A Tanszék megalakulásakor csupán néhány oktatóból állt, ezek egy része is csak félállásban működött közre. 1954-ben fél évig részt vett a tanszék munkájában V. O. Arutjunov szovjet professzor, aki mint tanácsadó sok segítséget nyújtott az oktatómunka megindításához és a kezdeti oktatási koncepció kialakításában.

A Műszer és Irányítástechnika szak kialakulása

A megalakult Tanszékre igen sokrétű oktatási feladat hárult. A cél olyan felsőfokú szakemberek képzése volt, akik elsősorban finommechanikai, optikai, elektromechanikus és elektronikus műszerek konstrukciójában és gyártásában járatosak. Ennek az önmagában is nehéz feladatnak megoldását tovább nehezítette az, hogy a 60-as évek elején ért el hozzánk az elektronikai forradalom első hulláma (félvezető eszközök) és a szabályozás-technika oktatásának sürgető igénye. Ezek alapvető befolyást gyakoroltak oktatásunk tartalmára és struktúrájára. A Tanszékre jutó terhek növekedése és az oktatás spektrumának kiszélesedése egyértelművé tette, hogy ekkora oktatási feladatot egy tanszék nem tud ellátni.

Oktatási profilunk kialakításának első lépése, hogy a 60-as évek elején az optika profilt a Gépészmérnöki Kar Optika és Finommechanika Tanszéke vette át. Majd 1964-ben megalakult a Folyamatszabályozási Tanszék azzal, hogy az automatikát oktató csoport az erősáramú szak Automatizálási Tanszékéből, a nem villamos mennyiségek mérésével foglalkozó csoport pedig

a Tanszékből vált ki. Ugyanebben az időben kivált a Tanszékről a finommechanikai és technológiai profil és átkerült az újonnan létrejött Híradástechnikai és Műszeripari Technológia Tanszékre, amely a később létesült Technológia Szak bázistanszéke lett.

Az átszervezések után a szakhoz már két szak-tanszék, a Műszer és Méréstechnika Tanszék és a Folyamatszabályozási Tanszék tartozott. A Tanszék oktatási spektrumának szűkítése lehetővé tette, hogy nagyobb figyelmet fordítsunk a Tanszék gondozásában maradt szakterületek oktatásának korszerűsítésére. A 60-as évek második felében a szakon három ágazat jött létre. Nálunk az Elektromechanikus műszertechnika ágazat és az Elektronikus műszertechnika ágazat, a Folyamatszabályozási Tanszéken pedig a Szabályozástechnika ágazat. Az ágazatok létesítésének célja az volt, hogy a hallgatók egy szűkebb területen elmélyültebb képzést kapjanak.

Ugyancsak a 60-as évek elején jelentek meg hazánkban a számítástechnika előhírnökei. A Tanszék már 1961-ben bevezette a digitális technika alapjainak oktatását, mivel az akkor megjelenő digitális műszerek ezt szükségessé tették. A Műszaki Egyetem első elektronikus számítógépe, egy ODRA 1013 az OMFB támogatásával 1967-ben került a Folyamatszabályozási tanszékre és ezzel elindult a számítástechnikai kultúra gyakorlatának bevonulása a szakra. 1969-ben a Tanszék javaslatára létrejött a Digitális berendezések ágazat az akkor már ipari igényt nélkülöző Elektromechanikus műszertechnika ágazat helyén. Ezzel egy időben a Szabályozástechnika ágazat neve Irányítástechnika ágazatra, a szak neve pedig Műszer és Irányítástechnika Szakra változott.

A Műszer szak megerősödése, a Schnell-korszak

Schnell László (1923–1995) 1958-ban került a Tanszékre és már a kezdeti időszakban is jelentős szerepe volt a profiltisztításban és a 60-as évek közepétől nagy részt vállalt a Tanszék operatív irányításában. 1967-ben aztán Kolos Richárdtól professzortól átvette a Tanszék vezetését. Schnell professzor több mint 20 éven át, 1988-ig irányította a Tanszék munkáját. Ez alatt az idő alatt a Tanszék jelentősen megerősödött oktatási, műszaki fejlesztési és kutatási szempontból egyaránt.

A Tanszék oktatási tevékenysége az első 25 évben

A Tanszék oktatási és kutatási tevékenységének kialakulását meghatározta a méréstechnika fejlődése és fogalomkörének bővülése a 60-as, 70-es években. Ebből adódóan oktatási programunk a műszer és irányítástechnika szakon a következő részekre volt bontható:

- a mérés általános, elméleti vonatkozásai, ezek alkalmazása eszközök, mérőrendszerek tervezésénél,
- villamos jelek és rendszerek mérésének módszerei,
- villamos jelek és rendszerek mérését és feldolgozását szolgáló eszközök, műszerek, mérőrendszerek áramköri és rendszertechnikai tervezésének kérdései.

E program megvalósítását döntő mértékben befolyásolta a számítástechnika elterjedése:

- a számítógép kiterjesztette a mérés lehetőségeinek határait, megnövelte a mérés sebességét és a mérési adatok tárolhatóságát,
- új lehetőségeket biztosított a real-time mérés, szabályozás és a jelanalízis és szimuláció területén,
- lehetővé tette a magasabb szintű modellalkotást és biztosította az ehhez szükséges nagyobb matematikai apparátus alkalmazhatóságát,
- új utakat nyitott a mérőeszközök tervezésében és létrejöttek az intelligens, bonyolult mérési feladat megoldására alkalmas műszerek, mérőrendszerek,
- új utat nyitott meg a számítógépes tervezés irányába.

Így a számítógép nagyon fontos szerepet kapott oktatásunkban, egyrészt alkalmazási szinten, másrészt minden olyan területen, ahol a számítógép és a mérendő folyamat közötti kapcsolat megteremtése, illetve a mért adatok feldolgozása a feladat.

1976-ban érkezett a Tanszékre az első PDP számítógép, egy 11/45-ös. Ez a gép már valódi sokterminálos számítógép-központi szolgáltatásokat nyújtott a hallgatók és az oktatók számára egyaránt.

A következő években a számítóközpont többször megújult, a 11/45-öt PDP 11/40 majd 11/34 váltotta fel korszerű többfelhasználós operációs rendszerekkel. Ez az átlagosnál lényegesen jobb számítógépes ellátottság is hozzájárult ahhoz, hogy a Tanszék által gondozott két ágazaton évente 70-80 hallgató szerzett magas színvonalú ismereteket bizonyító műszerszakos diplomát.

1979-ben, a 25 éves évfordulókör a Tanszéken 44 oktató-kutató dolgozott (1 professzor, 5 docens, 14 adjunktus, 17 tanársegéd, 7 kutató), munkájukat 23 fő technikai és adminisztrációs csapat támogatta, ezen kívül a Tanszéken dolgozott 13 posztgraduális hallgató.

Az oktatási tevékenység spektrumát legjobban a Tanszéki kollektíva által kidolgozott és előadott tárgyak felsorolása jellemzi: Méréstechnika, Elektronikus áramkörök, Digitális berendezések, Logikai tervezés, Elektronikus műszerek, Digitális elektronika, Számítógépek, Mérőrendszerek, Rendszerprogramozás, Mikroproceszorok, Orvos-biológiai méréstechnika, Analóg áramkörök, Vezérlőegységek tervezése, Elektronikus berendezések tervezése.

Hallgatói terminálszoba. A terminálok a PDP11 RSTS time-sharingrendszerben dolgoznak.



A Tanszék kutatási tevékenysége a nyolcvanas évekig

Kutatási tevékenységünk mozgatója a Schnell kor-
szakban egyrészt az ipari problémák megoldása, más-
részt a műszaki fejlődés tendenciáira és saját elképze-
léseinkre épülő, a gyakorlati hasznosítás lehetőségét
kínáló célok kitűzése volt. Ezeket előzetes vizsgálata-
ink alapján akkor kezdtük meg, ha úgy véltük hogy a
probléma megoldására képesek vagyunk.

A húsz év néhány maradandó kutatás-fejlesztési pro-
jektje, amelyben sokan több éven keresztül részt vettek:

- *Automatikus precíziós mérőműszerek fejlesztése.*

Ennek az 1958-tól egészen napjainkig folyó kutatási
munkának a tárgya precíziós mérőműszerek fejleszté-
se. A felhasználható alkatrészek és a tervezési mód-
szerek folyamatos fejlődése a műszerek több generá-
ciójának kidolgozását eredményezte. Közülük kettő a
60-as, 70-es évekből:

- Analóg elvű automatikus kapacitás- és vesztesé-
gi tényező mérő berendezések nagyfeszültségű
szigetelőanyagok vizsgálatára. Az évek során ál-
landóan újabb és korszerűbb típust fejlesztettünk
ki a következő vállalatoknak: Magyar Kábel Mű-
vek, VEIKI, Magyar Villamosművek Tröszt, Drez-
dai és Prágai Műszaki Egyetemek [2,3].
- Automatikus, protokollt előállító precíziós áram- és
feszültségváltó-hitelesítő berendezések a VBKM
Transzvill gyára részére [4].

- *Analóg és hibrid számítógépek fejlesztése* [5]. A
Tanszék 1963-ban kezdett foglalkozni analóg, majd 1970
után hibrid számítógépek fejlesztésével. 1974-ben
üzembe helyeztük a viszonylag kis kapacitású TPAi/
AC-04 hibrid számítógépet, majd 1975-78 között az
OMFB támogatásával kifejlesztettük a nagykapacitású
ACH-05/TPAi hibrid számítógépet, mely sok műsza-
ki modellezési és számítási feladat megoldását segítet-
te elő. Akkor a digitális számítógépek még nem tudták
nyújtani a maihoz hasonló szimulációs lehetőségeket.
Ezeknek a hibrid számítógéprendszereknek fontos sze-
repük volt műszerszakos hallgatók oktatásában is.

- *Telemetriás rendszerek fejlesztése.* A 70-es évek-
ben elkészítettük a „Sajó térségi vízminőség ellenőrzé-
si rendszer” valamint a „Siófoki viharjelző központ” digi-
tális mérésadatgyűjtő berendezéseit. Talán a legna-
gyobb szabású ilyen munkánk a „Zagyva-Tarna rend-
szer” volt [6]. A rendszer – szemben a korábbi adatgyűj-
tő rendszerekkel – automatikusan, nagy pontossággal
és megfelelő sűrűséggel begyűjtötte a vízgyűjtő terüle-
ten elhelyezett 18 felügyelet nélküli mérőállomásról a
kívánt hidrológiai adatokat és a nyilvános telephálóza-
ton Budapesten elhelyezett számítóközpontba továb-
bította azokat a. A hidrológusok által kidolgozott modell
alapján a számítógép a begyűjtött adatokból árvízi elő-
jelzést és a vízgazdálkodáshoz szükséges egyéb
fontos adatokat szolgáltatott. A rendszernek az adat-
gyűjtést, az adatátvitelt és az adatfeldolgozást biztosí-
tó elemeit az Országos Vízügyi Hivatal megbízásából
terveztek és valósítottuk meg.

Az adatgyűjtő rendszerben a nyilvános telephálózat
alkalmazása már abban az időben is egy sor adatvé-

delmi és biztonsági problémát vetett fel. Akkor az még
nem jelentett problémát, hogy bárki bármelyik telexáló-
mástról felhívhatta a mérőállomásokat és hozzájutha-
zott az hidrometeorológiai adatokhoz. Viszont a rend-
szer a víztározók zsilipjeinek távvezérlését is lehetővé
tette a nyilvános telex hálózaton keresztül. Ennek elk-
erüléséhez a titkosítás akkor még kevésbé kidolgozott
területén kellett megoldást találnunk. A mai „ugráló-
dos” autóriasztók működéséhez hasonlóan csak az tu-
dott zsilipállítást végrehajtani, aki rendelkezett az eh-
hez szükséges speciális hardverrel. Nyilván ez a biz-
tonsági szint ma már nem lenne ilyen típusú szolgálta-
táshoz elegendő.

- *Mikroprocesszorok alkalmazástechnikai rendszeré-
nek fejlesztése.* A Tanszék 1977-ben együttműködési
szerződést kötött a Medicor Művekkel az orvostech-
nikai intelligens mérő- és információ-feldolgozó rendsze-
rek fejlesztésére. Ennek célja a mikroprocesszoros ve-
zérlésű mérőrendszerek fejlesztési és gyártási bázisá-
nak létrehozása, továbbá konkrét berendezések kifej-
lesztése volt. Az együttműködés során talán a legfon-
tosabb eredmények az NDK kooperációban készült
PHA-1 haematológiai automata, amelynek mikropro-
cesszoros vezérlőjét a Tanszék fejlesztette ki. A beren-
dezés hétféle haematológiai paraméter automatizált
mérését végezte. Teljesítménye 120 minta/óra, ezzel egy
500 ágas kórház kiszolgálására volt képes. Ez a mű-
szer elnyerte a BNV 1978. évi fődíját.

Más mikroprocesszoros vezérlésű orvostech-
nikai be-
rendezések fejlesztésébe is bekapcsolódtunk. Ezekből
a 70-es évek végére rengeteg tapasztalatot gyűjtöttünk

*A többgenerációs fejlesztés csúcsa:
az ACH-05/TPAi hibrid számítógéprendszert
műszaki modellezési és számítási feladatok elvégzésére.*



össze a követendő tervezési és technológiai módszerekről. Ez a tudásmennyiség vezetett el a mikroprocesszoros alkalmazástechnikai rendszer kidolgozásához is [7], mely tartalmazta az akkori technikai színvonalon élenjáró intelligens eszközök létrehozásához szükséges hardver és szoftver modulokat, a fejlesztést segítő kézikönyveket, valamint biztosította a fejlesztés valamint a gyártásközi- és végellenőrzés eszközeit. Ezt a komplex rendszert közel húsz vállalat vette át.

A felsőoktatás új struktúrája, az egyetem és az ipar kapcsolatának megváltozása

1988-ban Schnell professzor nyugdíjba vonult, a Tanszék vezetését Péceli Gábor vette át. Az ezt követő és mind a mai napig terjedő időszak meghatározója a rendszerváltás és ennek az iparra és a felsőoktatásra gyakorolt hatása volt. A rendszerváltásnak szempontunkból egyik következménye az volt, hogy nagyon gyorsan összeomlott a korábbi „szocialista” elektronikai kis- és nagyipar. Ennek hatása közvetlenül jelentkezett a Tanszék ipari kapcsolatainak és ipari kutatás-fejlesztési megbízásainak drámai csökkenésében.

Ezzel egyidejűleg a Villamosmérnöki Kar is jelentőset lépett azzal, hogy végrehajtotta az oktatási szerkezet átalakítását: a korábbi ötszakos képzés helyett (erősáram, híradástechnika, műszer, technológia, informatika) bevezette a két szakon – villamos és informatika – folyó oktatást. Ezzel egyrészt a Kar a szakmai profiljában – és munkaerőpiaci igényekben is – bekövetkező változásokra reagált, másrészt a villamosmérnöki képzésben elsősorban gazdaságossági okokból áttértünk a képzés első éveiben a közös, kevesebb gyakorlati képzést adó tantervekre. Az új rendszerben a speciális – erősáramú, híradástechnikai stb. – ismeretek készség-szintű elsajátíttatására már csak a felső évek gyakorlatorientált szakirányú képzésében van lehetőség.

A Tanszék a változásokra kettős stratégiával reagált! Egyrészt a csökkenő hazai szakmai kapcsolatokat a nemzetközi együttműködésekkel igyekeztünk ellensúlyozni. Másrészt nagy hangsúlyt fektettünk arra, hogy az új típusú doktori képzésünk vonzó legyen a fiatalok számára. Ugyanis a korábbi „jól fizető” KK munkák hiánya miatti „elszegényesedésben” számunkra ez volt az egyetlen mód, hogy fiatalokat legalább néhány évig a Tanszéken tarthassunk.

Úgy érezzük, hogy jó utat választottunk és a legnehezebb éveket már sikerült átvészelnünk!

Hol tartunk tehát ma?

A Tanszék mai oktatási tevékenységében meghatározó, hogy néhány tárggyal részt veszünk mind a villamos, mind az informatika szakos alapképzésben, ezen kívül három szakiránynak vagyunk a gazdája. Tevékenységünkben is érvényesült a jelentős súlyponteltolódás, a klasszikus villamosmérnöki ismeretek mellé egyenrangú társakként felsorakoztak az információs technológiák egyes területei is. Ennek a tendenciának a következménye, hogy 1998-ban a Kar

neve megváltozott Villamosmérnöki és Informatika Karra, 1999-ben pedig a Tanszék névváltoztatása következett be, ma Méréstechnika és Információs Rendszerek a megnevezésünk – ez 50 év alatt a harmadik megnevezésünk.

A Tanszék mai oktatási tevékenysége

Jelenleg, az 50 éves évfordulókora Tanszéken 40 oktató-kutató dolgozik (4 professzor, 13 docens, 9 adjunktus, 8 tanársegéd, 6 kutató), munkájukat 8 fő technikai és adminisztrációs csapat segíti, ezen kívül a PhD képzésben 32 hallgató vesz részt.

Érdeemes ezeket az adatokat összevetni a korábban idézett 25 évvel ezelőttiekkel, mert az adatok változása kiválóan mutatja a felsőoktatás szerkezetének átalakulását! Az oktatói-kutató létszám kb. 10%-kal csökken, tehát alig változott. Ezzel egyidejűleg kb. harmadrésére csökkent a technikai és adminisztrációs csapat létszáma. Ugyanakkor a kiszolgált hallgatói létszám közel a kétszeresére nőtt az ötéves alapképzésben, és jó két és félszeresére a doktorandusz képzésben. Igaz, hogy a doktoranduszok nem csak tanulnak, hanem jelentős mértékben részt vesznek a Tanszék oktatási és kutatási munkáiban is!

A Tanszék oktatási tevékenységében meghatározó, hogy a teljes évfolyamoknak szóló villamosmérnöki közös képzésben hozzánk tartozik a Méréstechnika tárgy, a műszaki informatika szakon pedig a Digitális technika, Operációs rendszerek (részben), Mesterséges intelligencia, Formális módszerek, Beágyazott információs rendszerek című tárgyak.

• *A villamosmérnöki szak szakirányú képzésében miénk az egyre népszerűbb „Beágyazott információs rendszerek” főszerkezet:*

Beágyazott információs rendszereknek azokat a számítógépes alkalmazói rendszereket nevezzük, amelyek autonóm működésűek és fizikai/technológiai környezetükkel intenzív információs kapcsolatban állnak. Ennek megfelelően a szakirány tárgyai a témakörhöz kapcsolódó átfogó ismeretek mellett különös hangsúlyt fektetnek az információ megszerzését, továbbítását, feldolgozását és felhasználását lehetővé tevő eljárások, valamint az ezek megvalósítására szolgáló hardver és szoftver elemek tervezési módszereinek bemutatására. A szakirány célja az ehhez szükséges elméleti és ismeretek átadása. A szakirányt elvégző hallgatók megtanulják mind az információs folyamatok, mind az azokat megvalósító áramkörök és berendezések kialakításnak és fejlesztésének módszereit és eszközeit. A tanulmányaik részeként kiadott tervezési feladatok kidolgozásával alkalmassá válnak mikroprocesszoros berendezések és rendszerek tervezésére, ezen belül a hardver-szoftver együttes tervezésére, továbbá érzékelők és beavatkozók illesztésére, az összegyűjtött adatok feldolgozásához szükséges eljárások, valamint a vezérlő, feldolgozó és megjelenítő szoftver megtervezésére és elkészítésére.

A műszaki informatika szak két szakirány gazdája:

- **Informatikai infrastruktúra tervezése szakirány:**
Az informatikai alkalmazások elterjedése olyan műszaki informatikus szakembereket igényel, akik a rendszertervezést az igényfelméréstől a koncepcionális és architektúrális specifikáción át a méretezésig irányítják, valamint meghatározzák a rendszerbe integrálandó hardver és szoftver komponenseket. A szakirány a számítógépes infrastruktúra tervezésének elméleti és gyakorlati ismereteit foglalja össze. Kiemelten foglalkozik a kereskedelmi termékek bázisán felépíthető informatikai rendszerek szolgáltatásbiztonságával és minőségbiztosításával. Bemutatja a tervezési folyamat hibáit redukáló konstruktív minőségbiztosítási rendszereket is, továbbá áttekinti az informatikai rendszerek üzemvitelének és erkölcsi-műszaki karbantartásának mérnöki szintű feladatait.
- **Integrált intelligens rendszerek szakirány:**
Az informatikai szolgáltatások és alkalmazások egyre nagyobb hányadában tapasztalható, hogy egy új minőséget képviselő szolgáltatás önmagában is komplex rendszer-komponensekből épül fel. E komponensek között megjelennek az emberi intelligens problémamegoldás folyamatát is modellező, adaptív és asszociatív számítási eljárásokat alkalmazó eszközök is, melyekre jellemző a tudás különböző formáinak kezelése, a tanulás útján történő ismeretszerzés, az adatokban megtestesülő tudás kinyerésének és felhasználásának képessége és a környezet változásaihoz való nagyfokú alkalmazkodás. A szakirány célja olyan műszaki informatikus mérnökök képzése, akik felkészültségük révén képesek intelligens informatikai komponensek létrehozására, a komponensekből felépülő informatikai rendszerek integrálására, ill. ezek alkalmazói környezetbe ágyazására.

A Tanszék kutatási tevékenysége

A három fő kutatási iránynak megfelelően három kutatócsoport van a Tanszéken:

Beágyazott rendszerek (vezetője: Péceli Gábor)

Az igen széles szakmai területet átfogó Beágyazott rendszerek csoporthoz hét kutatólaboratórium tartozik:

- A Precíziós mérőműszerek laboratóriumában világszínvonalú önkalibráló mérőkészüléket fejlesztenek és kutatnak áram, feszültség, impedancia és teljesítmény mérési célokra. [8].
- Az Orvosbiológiai méréstechnika laboratóriumában orvosi mérőműszerek fejlesztése, orvosbiológiai jelfeldolgozási kutatások folynak. Kiemelt témakör a markerbázisú mozgásanalízis [9].
- A Számítógéphálózatok labor fő kutatási területei a beágyazott rendszerek kommunikációs kérdései, az érzékelőket összefogó hálózatok valós idejű elosztott kommunikációja [10].
- A Logikai tervezés laboratóriumában digitális rendszerek magasszintű tervezési kérdéseivel, fejlett jel- és képfeldolgozás algoritmusokkal, a dinamikusan újrakonfigurálható beágyazott számítógépekkel

foglalkozunk. A kutatási eredmények „rendszer a programozható csipen” formában jelennek meg [11].

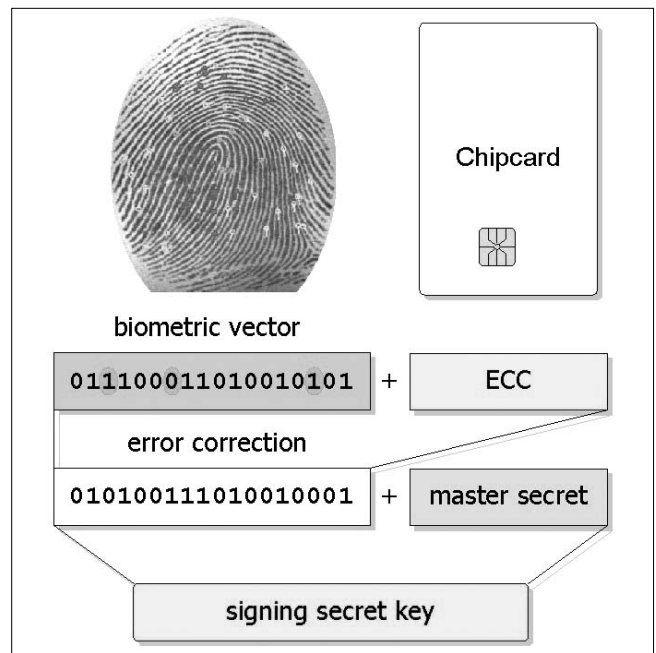
- A Digitális jelfeldolgozás labor feladata a jelmodellezés, adaptív jelfeldolgozás, a digitális szűrő struktúrák kutatása. Fontos eredményeket értek el hangszerek hangjának digitális szintézisében, valamint az aktív zajelnyomás lehetőségeinek vizsgálatában [12].
- A Kaotikus jelek és rendszerek laboratórium kutatói e módszer alkalmazási lehetőségeit vizsgálják széleskörű nemzetközi együttműködésben [13]. Fontos eredményük pl. a 2.4 GHz-es FM-DCSK rádió prototípusa.
- A Rendszer-identifikációs laboratórium paraméterbecsléssel, nemlinearitások hatásának vizsgálatával és jelrekonstrukciós kérdésekkel (inverz szűrés) foglalkozik. Eredményeik elsősorban a frekvenciatartományban való identifikációra [14] és az inverz szűrésre [15] vonatkoznak.

Intelligens rendszerek (vezetője: Horváth Gábor)

Az Intelligens rendszerek csoport munkája két laboratóriumban folyik:

- A Mesterséges intelligencia laboratórium olyan rendszerekkel foglalkozik, amelyek az emberéhez hasonló „racionális” viselkedést mutatnak. A fő cél megérteni a racionális viselkedés szabályait és olyan rendszereket konstruálni, amelyek hasonló tulajdonságokat mutatnak. Kiemelt kutatási terület az ontológia-alapú információ-visszakereső rendszerek [16].
- A Neurális hálózatok labor kutatóinak célja rendszermodellezés és diagnosztika hibrid-neurális megközelítésben. Ez ötvözi a szakértői tudásra építő szabályalapú szakértői rendszer és a nagyszámú input-output adatot hatékonyan kezelő neurális

Biometriai jellemzőkkel bővített digitális aláírás.



hálózatok előnyös tulajdonságait. Az elért eredményeket a labor kutatói sikeresen alkalmazták komplex ipari folyamatok modellezésére [17] és mammográfiai tanácsadó rendszerben.

Szolgáltatásbiztos számítástechnika

(vezetője: Pataricza András)

A Tanszék harmadik nagy csoportja a Szolgáltatásbiztos számítástechnika, amelyhez két labor tartozik:

– A Hibatűrő rendszerek laboratórium kiemelt címszavai: modellbázisú megbízhatóság analízis, automatikus transzformációk különböző formális leírások között, hibatűrő, biztonságkritikus rendszerek tervezési és analízis kérdései, melyeknek vizsgálata széleskörű nemzetközi és hazai együttműködésen alapszik [18].

– A Számítógépes biztonságtechnika labor kiemelten foglalkozik a mobil hálózatok biztonságával, a biometrikus azonosítással, az informatikai rendszerek kárelhárításával, egyes kriptográfiai kérdésekkel és a digitális aláírásokkal. A kutatócsoport célja a felhasználó ujjlenyomatából egyértelmű digitális kód előállítás, amivel az egyén biometriai jellemzőit is tartalmazó publikus-titkos kulcspár generálható a nyilvánoskulcsú kommunikáció számára.

Az itt felsorolt laborok nem csak a kutatást szolgálják. Rendszeres látogatói a szakirányú képzésben részt vevő hallgatók, és természetes felhasználói a tanszéki doktoranduszok is. Az évente végző 80-100 hallgató nagy része a tanszéki kutatási irányokhoz kötődő diplomatervet dolgoz ki.

Számításaink szerint az elmúlt 50 év alatt a Tanszéken körülbelül 3500-an szereztek mérnöki diplomát. Schnell professzor gondolatait folytatva; *50 éves munkánk legszebb eredménye a közreműködésünk ennek a – döntő mértékben ma is aktívan dolgozó – mérnök-gárdának a kinevelésében* [1].

Irodalom

- [1] Schnell L., „A Műszer és Méréstechnika Tanszék oktatási és kutatási tevékenysége,” *Mérés és Automatika XXVII.* [1979], pp.201–213.
- [2] Osváth P., „Automatikus impedanciamérés,” *Mérés és Automatika XXVII.* (1979), pp.213–220.
- [3] Osváth P., Schnell L., „Automatikus kiegyenlítésű mérőberendezés szigetelőanyagok veszteségi tényezőjének és relatív kapacitásváltozásának mérésére és regisztrálására,” *Elektrotechnika*, 62. (1969), pp.276–278.
- [4] Selényi E., „Váltakozó feszültségű mérőhálózatok gyors digitális kiegyenlítése,” *Mérés és Automatika XX.* (1972), pp.351–355.
- [5] Gesztes G., Görgényi A., Péceli G., Telkes B., Tóth E., „Az ACH-05 hibrid-analóg számítógép és az ACH-05/TPA/i hibrid számítógépes rendszer,” *Mérés és Automatika XXVII.* (1979), pp.237–244.
- [6] Selényi E., „Zagyva–Tarna vízgazdálkodási szabályozó rendszer telemechanikája,”
- XIII. Ipari elektronikus mérés és szabályozás szimpózium. Balatonszéplak, 1976.
- [7] Horváth G., Rác G., Selényi E., Sztipánovits J., „Mikroprocesszorok alkalmazási rendszere – az MMT rendszer,” *Mérés és Automatika XXVII.* (1979), pp.221–228.
- [8] Zs. Szepešy and I. Zoltán, „Thermal dynamic model of precision wire-wound resistors,” *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, Vol. 51, No. 5, October 2002, pp.930–934.
- [9] Á. Jobbágy, E.H. Furnée, P. Harcos and M. Tárczy, „Early detection of Parkinson’s disease through automatic movement evaluation,” *IEEE Engineering in Medicine and Biology Magazine*, Vol. 17, No. 2, March-Apr. 1998, pp.81–88.
- [10] B. Scherer, Cs. Tóth, T. Kovács házy and B. Vargha, „SNMP-based approach to scalable smart transducer networks,” *IMTC 2003, IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference*, Vail, Colorado, USA, May 20-22, 2003, pp.721–725.
- [11] L. Antoni, R. Leveugle, and B. Fehér, „Using runtime reconfiguration for fault injection applications,” *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, Vol. 52, No. 5, October 2003.
- [12] L. Sujbert, „A new filtered LMS algorithm for active noise control,” *Proc. of the Active ‘99 – The International EAA Symposium on Active Control of Sound and Vibration*, Dec. 2-4, 1999, Fort Lauderdale, Florida, USA, pp.1101–1110.
- [13] G. Kolombán, M. P. Kennedy, Z. Jákó and G. Kis, „Chaotic communications with correlator receiver: Theory and performance limits,” invited paper in *Proceedings of the IEEE*, Vol. 90, pp.711–732, May 2002.
- [14] I. Kollár, R. Pintelon, Y. Rolain, J. Schoukens, and Gy. Simon, „Frequency domain system identification toolbox for MATLAB: automatic processing – from data to models,” *IFAC Symposium on System Identification, SYSID 2003*, Aug. 2003, Rotterdam.
- [15] J. Deyst, N. G. Paulter, T. Dabóczi, G. N. Stenbakken and T. M. Souders, „A fast pulse oscilloscope calibration system,” *IEEE Trans. on Instrumentation and Measurement*, Vol. 47, No. 5, pp.1037–1041, 1998.
- [16] P. Varga, T. Mészáros, Cs. Dezsényi and T. P. Dobrowiecki, „An Ontology-Based Information Retrieval System,” *Proc. of AEI/AIE-2003*, Loughborough, UK, Springer Lecture Notes in Artificial Intelligence, Vol. 2718/ 2003.
- [17] P. Berényi, G. Horváth, B. Pataki and Gy. Strausz, „Hybrid-neural modeling of a complex industrial process,” *IMTC’2001*. Budapest, May 21-23, 2001, Vol. III, pp.1424–1429.
- [18] G. Huszerl, I. Majzik, A. Pataricza, K. Kosmidis and M. Dal Cin, „Quantitative analysis of UML statechart models of dependable systems,” *The Computer Journal*, Vol. 45, No. 3, pp.260–277, British Computer Society, 2002.

Nanotechnikai Konferencia

Budapest, 2004. április 26-27.

LAJTHA GYÖRGY

lajtha.gyorgy@ln.matav.hu

A korábbi új technológiák bevezetésében az információtechnológia és a távközlés mindig vezető szerepet töltött be, ezért úgy gondoltuk, hogy ezen új technika elterjesztésében megint lényeges szerepet kell vállalnunk. Összefogott ezért a Nemzetközi Hírközlési és Informatikai Tanács (NHIT) és a Matáv Rt. PKI Távközlésfejlesztési Intézete (PKI), hogy egy széleskörű konferencián áttekintsék hol tart ez a technika, és milyen perspektívákat rejt magában a különböző tudományterületek számára.

Már közel 10 éve annak, hogy az első publikációk megjelentek a nanotechnika témakörében. Ekkor még nem látszott ennek jelentősége. Az ezredforduló óta azonban egyre több területen alkalmazzák ezt a tudományt. Világossá vált, hogy ez nem a mikroelektronika továbbfejlesztése. A mikrométeres nagyságrendben ugyanis még az anyag alapegységei változatlanok maradtak és az anyag makro tulajdonságai alapján hoztak létre mikrométer nagyságrendbe eső eszközöket. Bár az elmúlt 30 évben a méretek folyamatosan csökkentek és jelenleg 1-1 elem mindössze néhány mikrométer nagyságrendű, a huzalozás pedig ennek tört része, mégsem hozott ez a csökkenés átütő változásokat. A nanométeres nagyságrendben végrehajtott manipulációk azonban már behatolnak a sejtek, a molekulák belsejébe, megváltoztatják a kristályszerkezetet és a belső kötések. Ezzel együtt az anyagok jellemzői is módosulnak.

2003 elején elkezdtünk szervezkedni egy „ismeretterjesztő” jellegű konferencia létrehozása érdekében. Hamarosan kiderült, hogy itt már nem játszhatunk vezető szerepet, mert az orvosok, biológusok, gyógyszerészek és a technológusok gyakorlati eredményeket is fel tudnak mutatni.

Lassanként megismertük azokat a kutatási csomópontokat, ahol már jelentős tapasztalatokra tettek szert. Ezek között első helyen szerepeltek a Magyar Tudományos Akadémia különböző intézményei, de több egyetemen is intenzíven foglalkoznak ennek a témakörnek nemcsak a kutatásával, hanem az oktatásával is. Indokoltnak látszott ezért egy szélesebb körű szervezőbizottság összehívása. Ebben tevékenykedtek Gyulai József (MTA Műszaki Fizikai és Anyagtudományi Kutatóintézet), Bárczy Pál (Miskolci Egyetem, Anyagtudományi Intézet), Mokry Zsuzsanna (OM), Zrínyi Miklós (Budapesti Műszaki és Gazdaságtudományi Egyetem Vegyészmérnöki Kar), Imre Sándor (BME Villamosmérnöki Kar), Roska Tamás (Pázmány Péter Egyetem és MTA számítástechnikai és Automatizálási Kutatóintézet). Védnököknek megnyertük Kroó Norbertet (MTA főtitkára), Straub Eleket (Matáv elnök-vezérigazgatója) és Pap Lászlót (BME rektorhelyettes).

A szervezőbizottság tagjai vállalták, hogy egy-egy szekciót megszerveznek. Ez a munkájuk ragyogóan si-

került, mert a kezdeti félnapos konferencia lassan egész napossá, majd másfél napossá vált, végül két teljes napot kitöltöttek a szakmai előadások. 2003. végén a program ismeretében rögzítettük, hogy 2004. április 26-án és 27-én tartjuk meg a konferenciát. Az első napon az Akadémia Nagytermében, a másodikon pedig a Matáv Rt. székházának Tölösi termében hallgathatta a több mint 200 főnyi hallgatóság az előadásokat. A konferencia két társelnöke Simonyi Ernő (NHIT) és Koralewsky Vilmos (PKI) voltak.

A következőkben néhány érdekes eredményről számolunk be. Ennek során egy-egy előadásról részletesebben, másokról rövidebben emlékezünk meg. Ez nem jelent értékítéletet, hiszen minden előadás magas színvonalú volt, és értékes eredményekkel járult hozzá a nanotudomány fejlődéséhez. Itt inkább az határozta meg, hogy mit emelünk jobban ki, hogy mely eredmények jelentkeznek széles körben felhasználható új megoldásokkal. Ezek bemutatásával az a célunk, hogy érzékeltessük a nanotechnika ma már nem absztrakt tudomány, a tudósok játékszere, hanem sok területen használható aktuális problémák megoldására és a klasszikus módszerek javítására.

A nanotechnika első eredményei a szénnanocsövek voltak. Ezzel egyidejűleg kialakultak azok a mérőberendezések és manipulátorok, melyek a nanotartományban tudták a feladatokat elvégezni. Ezzel kapcsolatban kiemelkedően érdekes volt a lézer sugár alkalmazása csipesznek és motormeghajtó eszköznek. Ezekről „a fénnel (lézerrel) készített és működtetett” szerkezetekről Ormos Pál (Szeged) számolt be. Az eredmények egészen meglepőek voltak és látszott, hogy a szabad szemmel nem látható és eddigi eszközökkel nem kezelhető tartományokban milyen, az eddigiektől merőben eltérő, új eszközökkel lehet a feladatokat megoldani. Az MTA kutatóintézetei is számos újdonságról tájékoztatták a hallgatóságot. Hallhattunk a nagyfelbontású felület meghatározásról, új anyagi tulajdonságok létrehozásáról, sőt megkövetelt jellemzőjű szerkezetek kialakításáról is. Az MTA-MFA részéről Gyulai József akadémikus vezetett be az alapokba és látszott, hogy már van Magyarországon olyan intézmény, amely a felmerülő feladatokat nanotechnikai eszközökkel tudja megoldani. A

BME ezen témakörön belül kiemelten foglalkozott a távközlés szempontjából jelentős GaAs/Au vegyületek lehetőségeivel (Mojzes Imre).

A biológiai alkalmazások is igen messzire vezettek. Kezdvé azzal, hogy az öregedés folyamatait is nanotechnikai szemlélettel tudják kezelni és ezzel az időskori panaszokat és képességcsökkenéseket elviselhető mértékre lehet korlátozni (Iván László, Semmelweis Egyetem). A Nyíregyházi Kórház részéről Lázár László arról számolt be, hogy az évekkel ezelőtt még kockázatosnak és súlyosnak tartott gerincműtéteket gyökeresen megváltoztatták. A problémákat nanotechnikai eszközökkel feltárva és a gyógyuláshoz szükséges protéziseket előre kialakítva és legyártva minimális vágásokkal végzik a műtétet. A betegek a műtét után 2-3 nappal már el is hagyhatják a kórházat. A biológiai szekcióban a Szegedi Biológiai Kutatóközpont kutatóitól hallhattunk a géntechnológiáról és a bakteorológia nanotechnológiájáról is. A géntechnológia, a DNS chipek manipulálásával állatokon egészen meglepő eredményeket értek el. Bár ezek sok esetben mind az állat, mind az utódok számára előnyösek voltak, nem várható, hogy etikailag elfogadható lenne az emberi gének módosítása.

A nanoszerkezetű ipari anyagok szekcióban a legnagyobb gyakorlati érdekességű előadás volt a nanomágnesség felhasználása a sínek felületi egyenlőtlenségének mérésére. Ezt követően a csiszolás minimális anyagvesztéssel megoldható. A mérési eredmények nanométer pontossággal tudják a csiszoló berendezést vezérelni. A további előadások részletesen tárgyalták a kerámiák és a fémek tulajdonságainak befolyásolását nanotechnikai eszközökkel. Ha kell a szilárdságukat növelik, vagy a felületi keménységet tudják módosítani, de polimer kompozitokat is elő tudnak állítani. A debreceni, a miskolci és a budapesti egyetemek, valamint a Bay Zoltán Intézet egyaránt igazolta járatosságát a nanoszerkezetű, adott követelményeket kielégítő új anyagok előállításában.

A IV. szekció hangsúlyozottan azokat a kérdéseket helyezte előtérbe, ahol a hazai kutatók az egész világ számára újdonságnak számító megoldásokat találtak. Itt szerepelt egy olyan terület is, mely az elektronika számára ígér az eddiginél is nagyobb lehetőségeket. Nanostruktúrált szilícium elvi fejlesztéséből kiindulva olyan alkalmazásokig jutottak el, melyek nemcsak lényegesen kisebbek, hanem sokkal változatosabbak is, mint a szilícium alapú eddigi félvezető megoldások. Ebben a szekcióban a nanoszerkezetű alumínium szilikátok és fémek előállításával kapcsolatos, jelentős hazai újdonságokat is bemutatnak.

A távközlés és informatika területén a titkosítás és az adatvédelem új megoldásaival jelentkezett a nanotechnológia. Michele Mosca Kanadából a kvantum algoritmusok elméletével és gyakorlati megvalósításával elérhető biztonságról beszélt. Ehhez kapcsolódott a kvantum kriptográfiáról előadás, amely egy fotonhoz kötötte az információkat. A biztonságot a foton tulajdonságaival kívánta elérni, ennek gyakorlati megvalósítása azonban várhatóan még további kutatásokat igényel.

A nanotechnika 3 területét fogta össze (Nano Bio Info Cogno) Roska Tamás csapata (Pázmány Péter Egyetem). Az agyi folyamatok bioelektromos jeleit elektródokkal érzékelve, elképzelték, hogy a gondolatok hatására közvetlenül lehet vezérelni műszaki folyamatokat, gépeket, vagy más biológiai rendszereket. A terület ígéretes, bár a bemutatott eddigi eredmények realitásként is kezelhetők, ugyanakkor a jelenlegi beidegződéseink következtében ez sci-fiként hat. Karmos György és Ulbert István erre vonatkozó tanulmányai azonban bizonyították, hogy ez már realitás. Hasonlóan perspektivikusnak látszott az önszerveződő nanorendszerek bemutatása, mely az emberi szervezet egyik alapelemének működésére, a fehérjékre épült.

A záró szekcióban több, a témához kapcsolódó, de nemcsak nanotechnikai tudást igénylő előadást hallottunk. Aural A. Lazar (Columbia Egyetem) egy új kódolási elvet mutatott be, amely minimális amplitúdójú információk, szinkronizációt nem igénylő időintervallumok segítségével kódolható és kezelhető. Ugyancsak új és a nanotechnika eszközeit felhasználó analogikai számítógépekről és az agy funkcióit modellező, érzékelő számítástechnikai módszerekről hallhattunk izgalmas beszámolót Roska Tamástól.

Vendégünk volt Angela Hullmann, az EU Kutatás-fejlesztési Bizottságának képviselője. Tájékoztatta a Konferencia résztvevőit a különböző programokról, ezen belül részletesen megmutatta, hogy a nanotechnika milyen területeket érint, és hány különböző program működik. Számos programban voltak magyar résztvevők is, szoros együttműködésben Európa legeredményesebb kutatóival. Megismerhettük a következő program súlyponti elemeit, melyekhez bárki csatlakozhat, de előnyös, ha már 2007 előtt lépést tart a közös fejlesztéssel, megismeri a kutatótársak eredményeit, munkamódszereit, így a közös munkában zökkenőmentesen vehet majd részt.

A konferencia végén Kroó Norbert (MTA), vázolta a nanotechnikában rejlő valamennyi lehetőséget. Összekapcsolta az elért eredményeket és a jelenleg folyó kutatások várható hatását. Ennek során az eddig kisebb súllyal szereplő távközlés is a helyére került. Említést tett ezen kívül hadászati eszközökről és a mindennapi életünkben használatos anyagokról. Így például a jelenleginél lényegesen nagyobb szilárdságú és mégis könnyebb ruhák elkészítése is a közeljövőben várható. Ennek az áttekintésnek az volt a végső kicsengése, hogy a nanotechnika a különböző tudományterületekre és szolgáltatásokra egyaránt hatással lesz, azonban bevezetési sebességük eltérő. Ennek nem a kutatási eredmények az okai, hanem sok területen a meglévő módszerek kiváltását még nem teszi indokolttá sem az új tulajdonságok megjelenése, sem a gazdasági kényszer.

A Konferencia előadások főlíai CD-n rendelkezésre állnak (Forrás Katalin, 481-7456), az érdeklődők megkaphatják. Ezzel igyekszünk kiegészíteni a Konferencia alap-célkitűzését, hogy a magyar kutatók, fejlesztők megbarátkozzanak a nanotechnikával és munkájuk során mint alternatív lehetőségre mindig gondoljanak rá.

INTERNATIONAL SPACE STATION

Keywords: manned space mission, international space programmes, micro-gravitation

During the 60s, the first decade of manned space flights man couldn't stay for a long time in the space owing to technical limitations. When the organization of astronauts got accustomed to the conditions of weightlessness they had to return to the Earth. Along with successful flights researchers started to consider the establishment of larger space equipment offering more comfortable room for a longer period of work, these were then called space stations.

RUSH HOURS ON THE GEOSTATIONARY ORBIT

Keywords: telecommunications satellites, spacialitter, change of orbit interference

It is widely known that some routes in the oceans are extremely busy and have strategic importance. In the early years of space research no one would have thought that one time there would be routes and orbits of strategic and economic importance. Owing to the ever increasing demand for satellite communications geostationary orbits (GEO) have become critical "routes" where newcomers have difficulties to find a free location and where unused and conked space crafts are beginning to disturb normal circulation.

SOLAR ACTIVITY AND THE PROPAGATION OF RADIO WAVES

Keywords: sudden ionospheric interferences ionospheric and trans-ionospheric propagation

Ionosphere is the part of upper atmosphere where free electrons are present mainly due to the ionization induced by solar electromagnetic radiation. The high concentration of these electrons can have influence on the propagation of radio frequency (e.m.) waves.

STUDY ON PROPAGATION OF ELECTROMAGNETIC PULSES IN DIFFERENT MEDIA

Keywords: Maxwell-equations, wave propagation

The study of propagation of electromagnetic pulses in different environments forms an important part of space and telecommunications research. This article presents a short overview of the solution methodology of Maxwell-equations assuming general shape signals in anisotropic plasma as well as free-space guided waves in homogeneous and inhomogeneous environment. Some important model calculations are also given.

ROLE OF MEASUREMENT AND MODELING OF ELECTROMAGNETIC WAVE PROPAGATION IN SPACE RESEARCH

Keywords: whister, radio waves, plasma sphere reflection

Methodology of research and measurement of wave propagation is becoming more and more important in nearly all aspects of life. This article outlines its role in space research and applications, particularly in security related issues: plasma sphere research, space weather studies and satellite forecast of seismic threats.

SPACECRAFT ON-BOARD AUTONOMY FOR OUTER SOLAR SYSTEM EXPLORATIONS

Keywords: autonomous operation, error tolerance, hi-reliability system, real time multitask operating system

The complexity of tasks of a space device working on the surface of a distant planet requires an all-round control model which is able to react quickly to rapidly changing environmental events but at the same time is flexible enough to meet the variable needs of a long mission. Our model was implemented in the Rosetta space probe which left the gravity space of the Earth in March.

CENTRAL CONTROL AND DATA COLLECTION COMPUTER OF ROSETTA LANDER

Keywords: landing unit with autonomous operation, radiation-proof processor, error-correcting memory

The Rosetta space probe of the European Space Association started its ten years long mission to Comet Churyumov-Gerasimenko on March 2, 2004. In the near of the comet the space probe will divide into two parts: one (Orbiter) will be circulating around the comet, the other (Lander) will land on the surface of the comet. In the history of space research Rosettalander will be the first set of measuring instruments to land smoothly on a comet and to study its changing activity.

RADIATION DOSE MEASUREMENT IN THE SPACE AND ON THE EARTH

Keywords: ionization radiation, exposure to dose, cosmic radiation, dose measurement

There are many newspaper articles on the adverse radiation we are exposed to. This paper is dealing with the adverse effects of low and high frequency radio waves which may come from power lines, mobile phones, CRT monitors or a microwave oven. News about breakdowns in nuclear power plants or manifestations against these plants appear at the beginning of headlines, reflecting our fear from radioactive radiation and pollution...

STUDY ON ERROR LIMITS INFLUENCING THE ABSOLUTE PROCESSING OF GPS MEASUREMENTS

Keywords: sub-metric accuracy permanent, absolute positioning

With the suspension of selective availability (SA) a new era has begun in GPS technology. In a former issue of our periodical we already published an article on the accuracy of absolute positioning without SA. In that article it was stated that under favorable conditions an accuracy of a few meters can be achieved. The number of GPS users has grown considerably in recent years which is surely due to the suspension of SA.

50 YEARS OF THE DEPARTMENT OF MEASUREMENT AND INFORMATION SYSTEMS (D.O.M.A.I.N.S.)

This article presents an overview of some key educational and research achievements of the D.O.M.A.I.N.S. and the 50-year long integration process of information technology.

Contents

<i>TELECOMMUNICATIONS AND SPACE RESEARCH (GUEST EDITORIAL)</i>	1
SPACE STATIONS, SATELLITES	
Előd Both International Space Station	3
Iván Almár Rush hours on the geostationary orbit	8
STUDIES ON WAVE PROPAGATION	
Pál Bencze Solar activity and the propagation of radio waves	12
Orsolya E. Ferencz, Csaba Ferencz Study on propagation of electromagnetic pulses in different media	18
Csaba Ferencz, Orsolya E. Ferencz, Dániel Hamar, János Lichtenberger, Péter Steinbach Role of measurement and modeling of electromagnetic wave propagation in space research	25
DEVICES AND MEASUREMENTS	
Attila Baksa Spacecraft on-board autonomy for outer solar system explorations	30
Sándor Szalai, András Balázs Central control and data collection computer of Rosetta Lander	34
István Apáthy Radiation dose measurement in the space and on the Earth	37
Bence Takács Study on error limits influencing the absolute processing of GPS measurements	42
ACTUALITIES	
Gábor Péceli, Endre Selényi 50 years of the Department of Measurement and Information Systems	48
György Lajtha Conference on nanotechnology in Budapest	54

Cover: *Constructions being underway in the space... (Foto: NASA)*

Szerkesztőség

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

Hirdetési árak

1/1 (205x290 mm) 4C 120.000 Ft + áfa
Borító 3 (205x290mm) 4 C 180.000 Ft + áfa
Borító 4 (205x290mm) 4 C 240.000 Ft + áfa

Cikkek eljuttathatók az alábbi címre is

BME Szélessávú Hírközlő Rendszerek
Budapest XI., Goldmann Gy. tér 3.
Tel.: 463-1559, Fax: 463-3289,
e-mail: zombory@mht.bme.hu

Előfizetés

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

2004-es előfizetési díjak

Hazai közületi előfizetők részére:
1 évre bruttó 31.200 Ft
Hazai egyéni előfizetők részére:
1 évre bruttó 7.000 Ft

Subscription rates for foreign subscribers:

12 issues 150 USD,
single copies 15 USD

www.hte.hu

Felelős kiadó: MÁTÉ MÁRIA
Lapmenedzser: Dankó András

HU ISSN 0018-2028

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