

# 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 Tanszékcsoporthoz;

\*\* 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 területeken: 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.

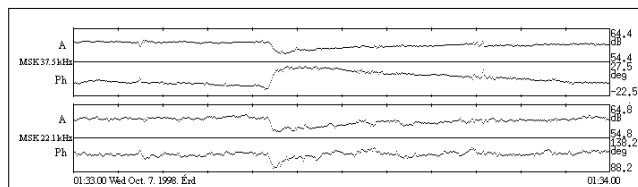
Az elmondottakból világos, hogy e téren, amelynek hatásai hosszabb távon mind a gazdaság, mind az életminőség terén fontosak, egyidejűleg van szükség minél több műhoddal végzett hullámterjedési mérésre és folyamatos földfelszíni jelregisztrálásra. Az űrben és a földön mért adatokból pedig akkor tudunk 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, Újzélandra, 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 trimp hatású keskenysávú felvétel egy részletén (Érd)

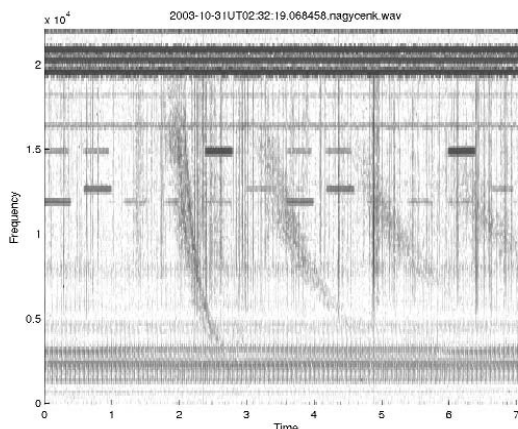
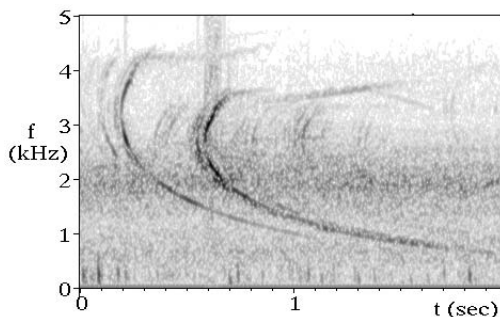
megmérni a földi állomásokon. Ez napi 24 órás folyamatos regisztrálás esetén akkora adattömeget jelentene, ami még ma is kezelhetetlen, s akkor még nem kerestük ki a whistlereket, nem mértük ki az alakjukat és nem számoltunk belőle plazmaszféra paramétert.

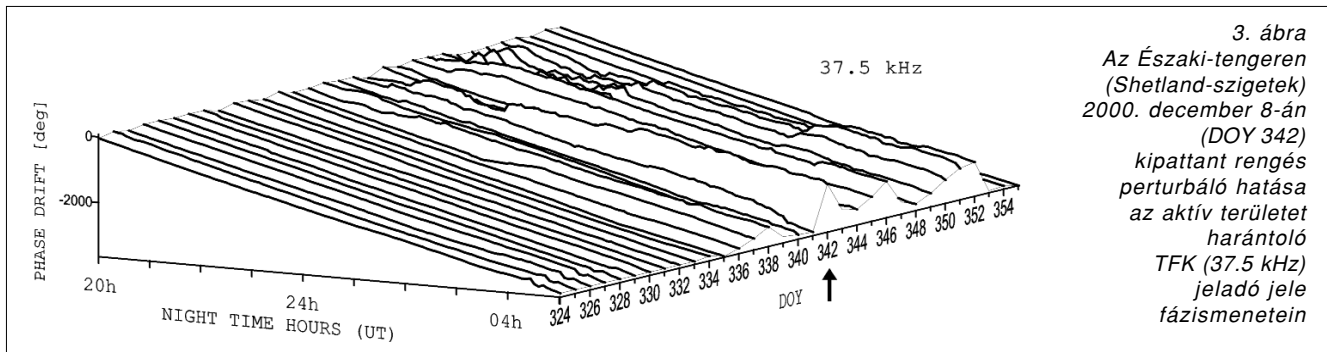
Ezért az első évtizedekben, s a világ legtöbb részén ma is csak óránként 1-2 percre kapcsolták-kapcsolják be a vevőket, s vesz amit vesz, hiszen akkor is teljes pontossággal kell regisztrálni, amikor csak zaj, spheric és zavarnak minősülő mesterséges eredetű jel érkezik a vevőbe. Így is vettek-vettünk 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 'trimp' 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)





3. ábra  
Az Északi-tengeren  
(Shetland-szigetek)  
2000. december 8-án  
(DOY 342)  
kipattant rengés  
perturbáló hatása  
az aktív területet  
harántoló  
TFK (37.5 kHz)  
jeladó jele  
fázismenetein

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].

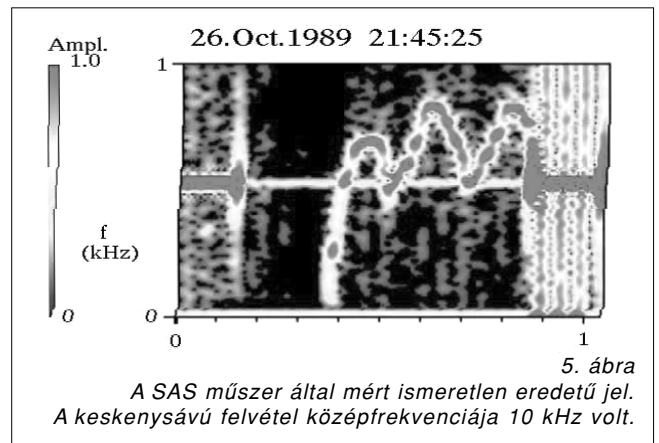
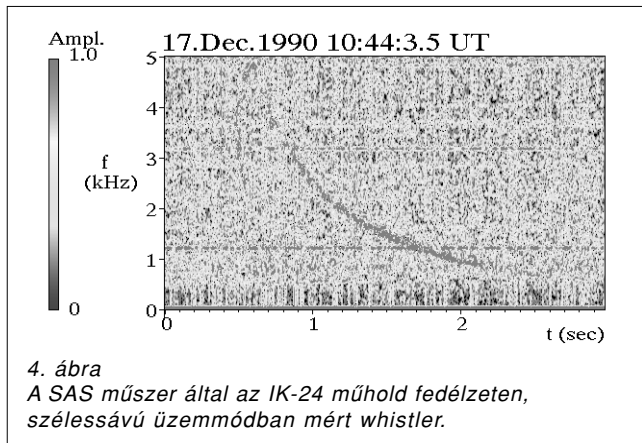
Ennek első lépései Tarcsai György nevéhez fűződnek, akinek sikerült módszert találnia a whistlerek dinamikus spektrumban megjelenő alakja valamely elméleti jelalakkal történő legjobb összeillesztésére, s így meghatározni a plazmaszféra legfontosabb (terjedési) paramétereit. További előrelépést hozott 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 részletetekbe 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 találjuk 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 végheznek kiterjedt és nagyon informatív hullámterjedési méréseket. Ezekben nincs részünk.)

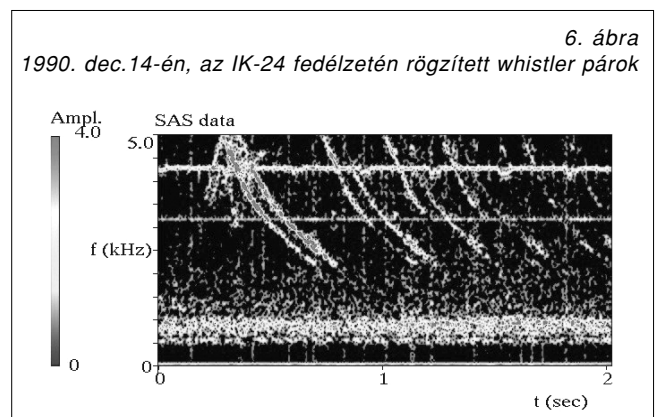
A mért jelek elemzése és földi mérésekkel összevetése fontos információkat szolgáltatott [8]. Többek között sikerült mind a SAS-sal, mind egyidejűleg a Földön venni páros whistler csoportot és elemezni a jeleket (6. ábra). Ugyanakkor mindmáig nyitott kérdés maradt, ráadásul olyan, amelyik a plazmaszférikus 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.

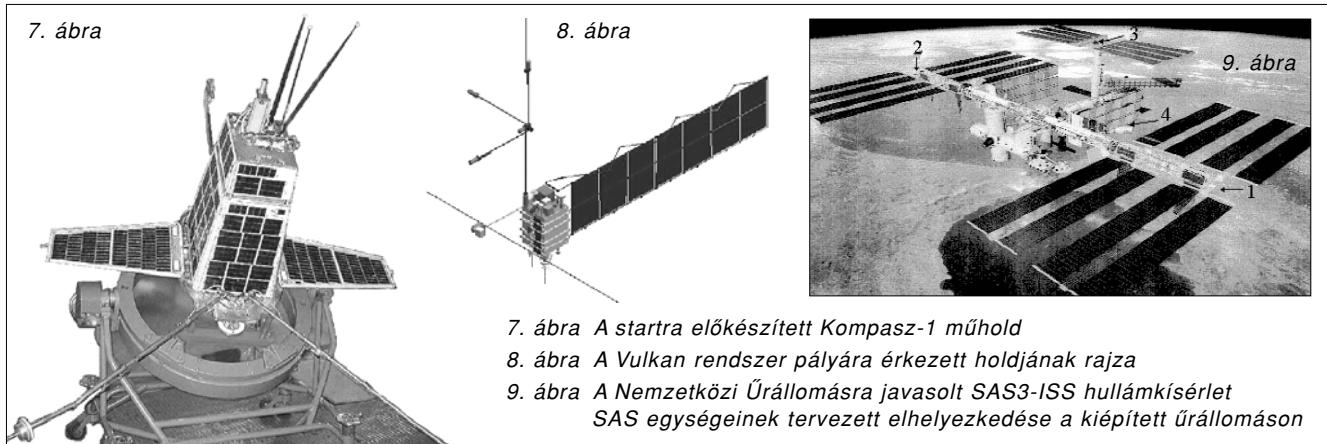
A válasz mind a hullámterjedés elméletét, mind a plazmaszféráról alkotott képünket érinti. Úgy tűnik az újabb elméleti modelljeink szerint, hogy ezek a jelek nem a mágneses erővonal mentén, hanem attól eltérően terjednek, s a Föld mágneses tere leírására sem használható egyszerű dipólus modell a számításokban, 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.