

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

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

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

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

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

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

GALINA MIKHAJLOVA, YURI MIKHAJLOV, VLADIMIR D. KUZNETSOV

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

Lektorált

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

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

## 1. Bevezetés

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

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

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

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

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

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

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

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

## 2. A SAS2 a Kompas misszióban

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

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

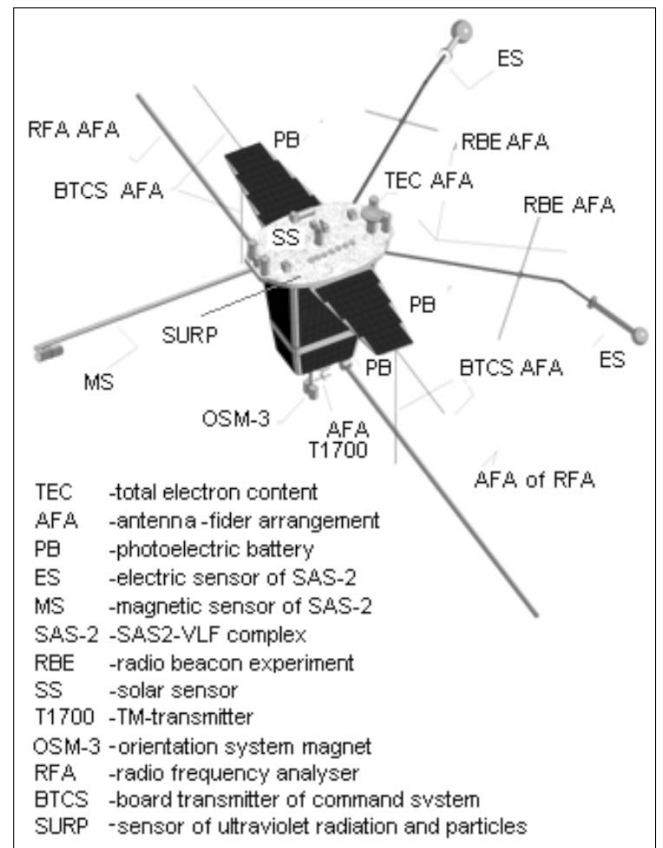
A start után, a műhold teljes műszaki üzembeállítása és kalibrálása során azonban a fedélzeti energiaellátó rendszer (napelemek, akkumulátorok) működésében komoly zavarok álltak be, amelyeket csak november



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

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

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





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

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

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

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

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

### A SAS2 fő jellemzői

Frekvencia tartomány

(mind az elektromos, mind a mágneses csatornán):

1 Hz – 20 kHz

Mágneses érzékelő átviteli függvénye:

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

Elektromos érzékelő átviteli függvénye:

1 Hz – 20 kHz állandó

Zajszint:

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

100 Hz – 0.2 pT / Hz<sup>1/2</sup>,

1 kHz – 0.03 pT / Hz<sup>1/2</sup>,

10 kHz – 0.05 pT / Hz<sup>1/2</sup>

Elektr. érzékelő (egy pár):

10 Hz – 40 nV / Hz<sup>1/2</sup>,

10 kHz – 20 nV / Hz<sup>1/2</sup>.

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

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

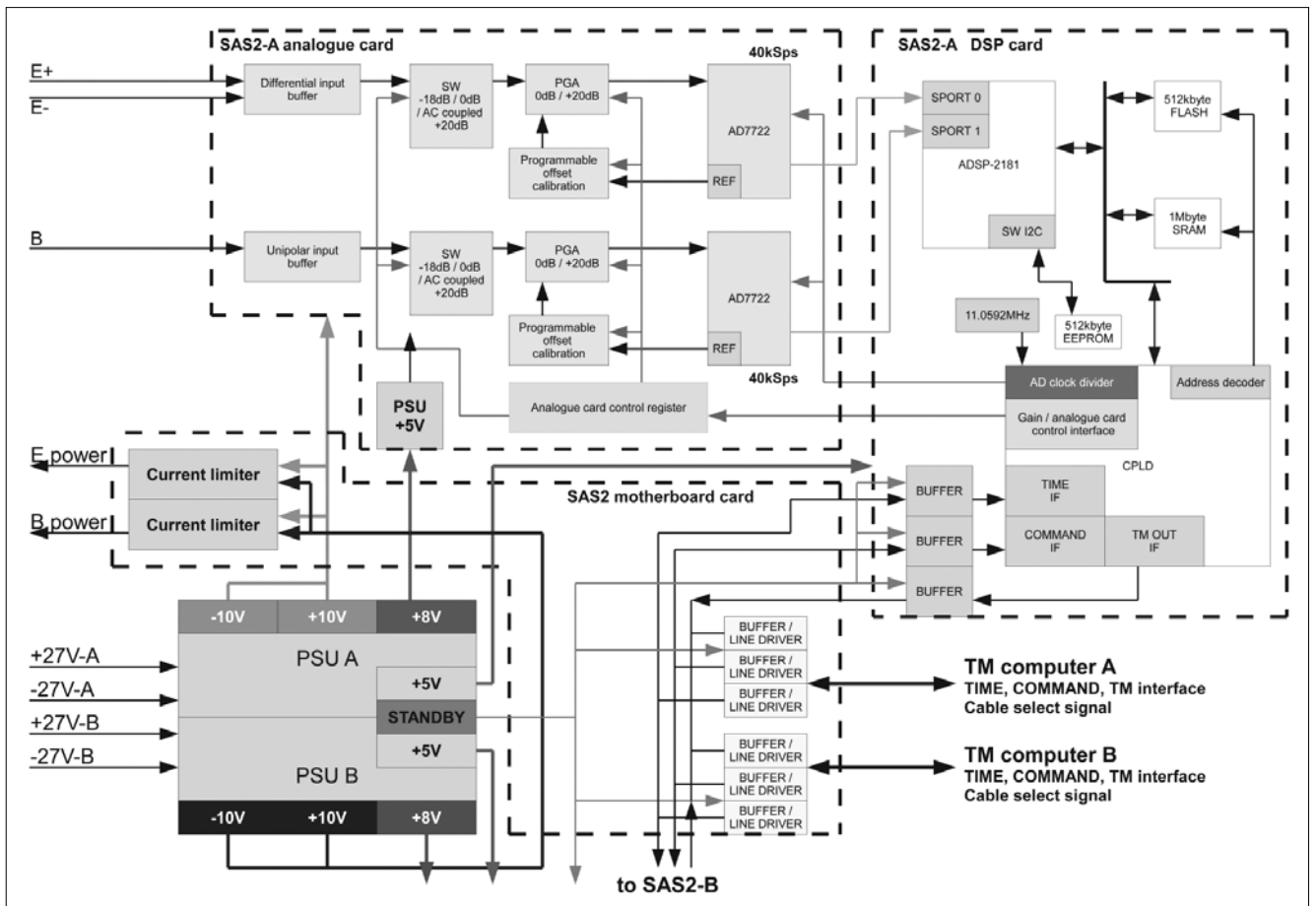
E rendszer lehetőségeit kihasználva a következők a SAS2-K2 üzemmódjai:

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

4. ábra

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





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

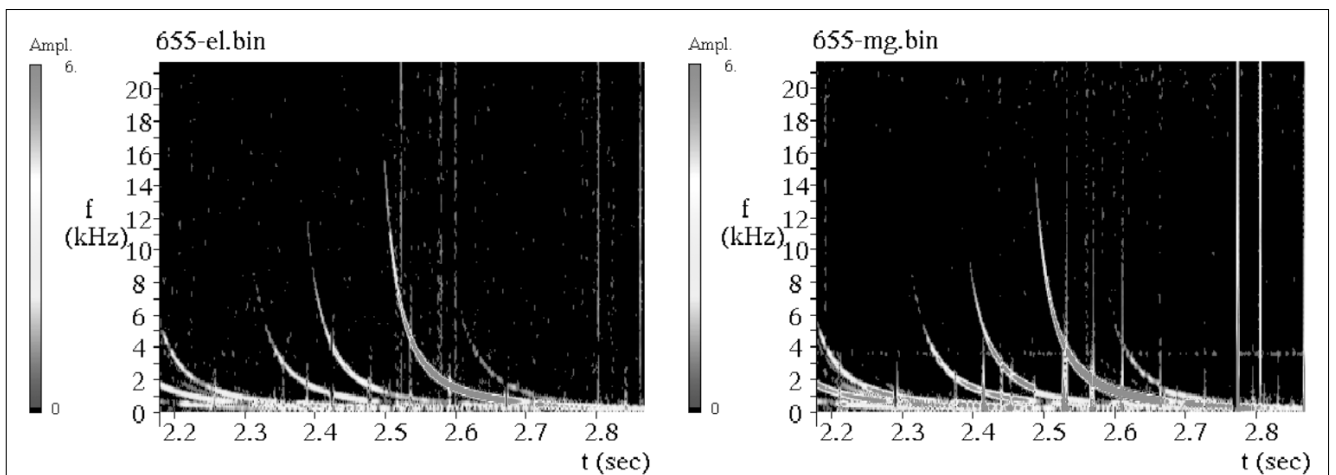
mény”, s a SAS2 az esemény előttől (előre definiált idő, pl. 0,5 sec) az esemény utánig (előre definiált idő, pl. 1,5 sec) terjedő regisztrátum szakaszt mindkét csatornáról a cirkuláris memóriából a telemetria puffer memória-részbe átírja.

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

telemetria memória részbe mindkét csatornáról, bármiféle fedélzeti elemzés nélkül.

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

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



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

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

#### 3.1. Whistler kettősök

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

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

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

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

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

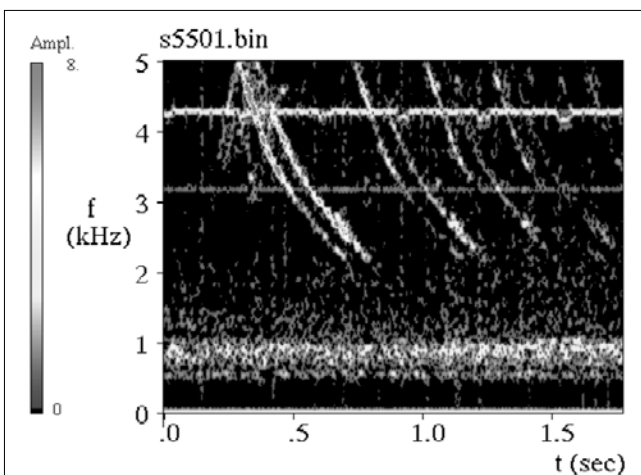
#### 3.2. Tüskés whistlerek (Spiky Whistlers – SpW)

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

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

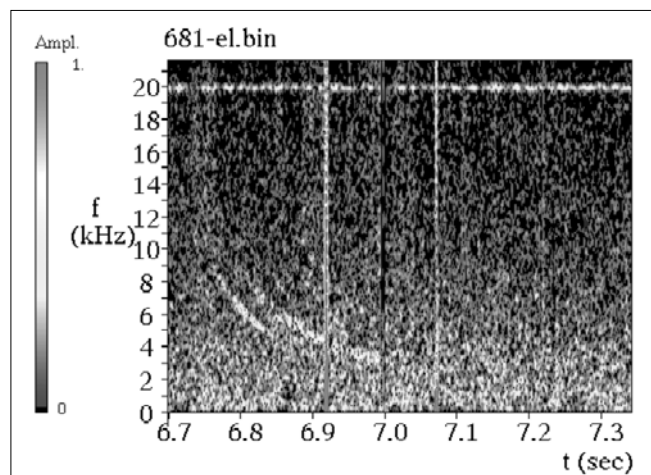
7. ábra

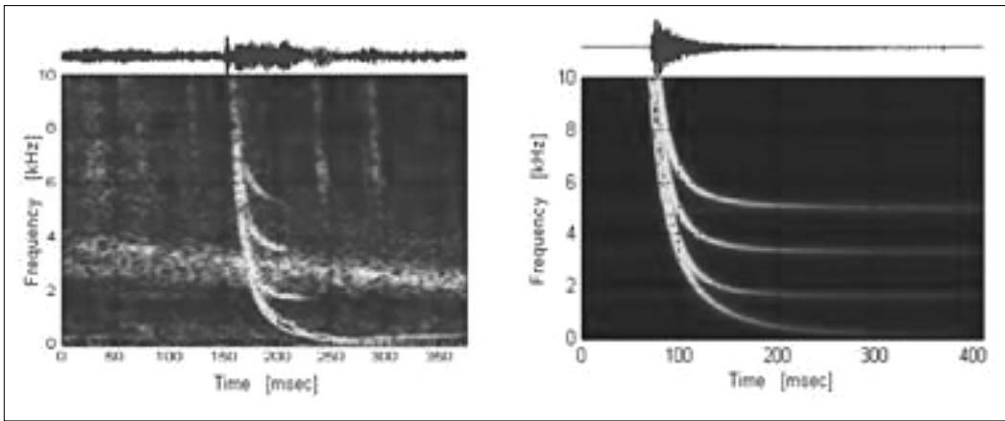
Whistler kettősök, amelyeket az első SAS mért az IK-24 fedélzetén 1990. december 14-én.



8. ábra

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





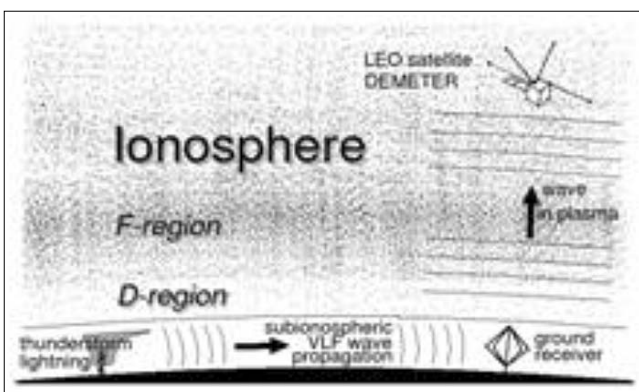
10. ábra  
A Demeter által  
2004. november 6-án mért  
és a pontos UWB terjedési  
modellel számított jelalak  
és FFT spektrumjaik,  
[5] nyomán

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

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

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

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



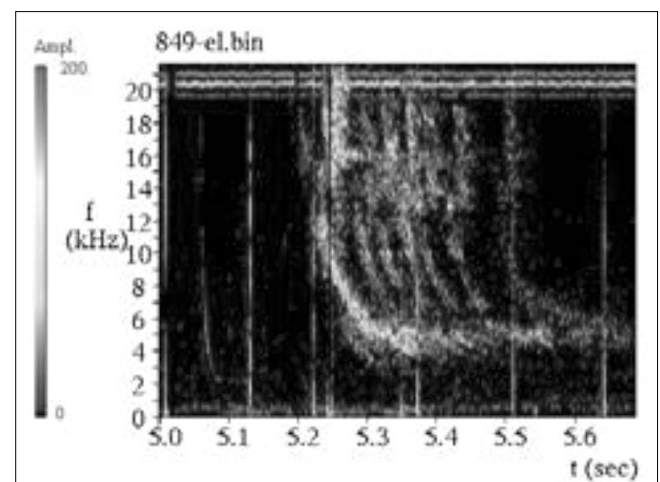
### 3.3. Vezetett módus formában terjedő whistler jel létének közvetlen kimutatása

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

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

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

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



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

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

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

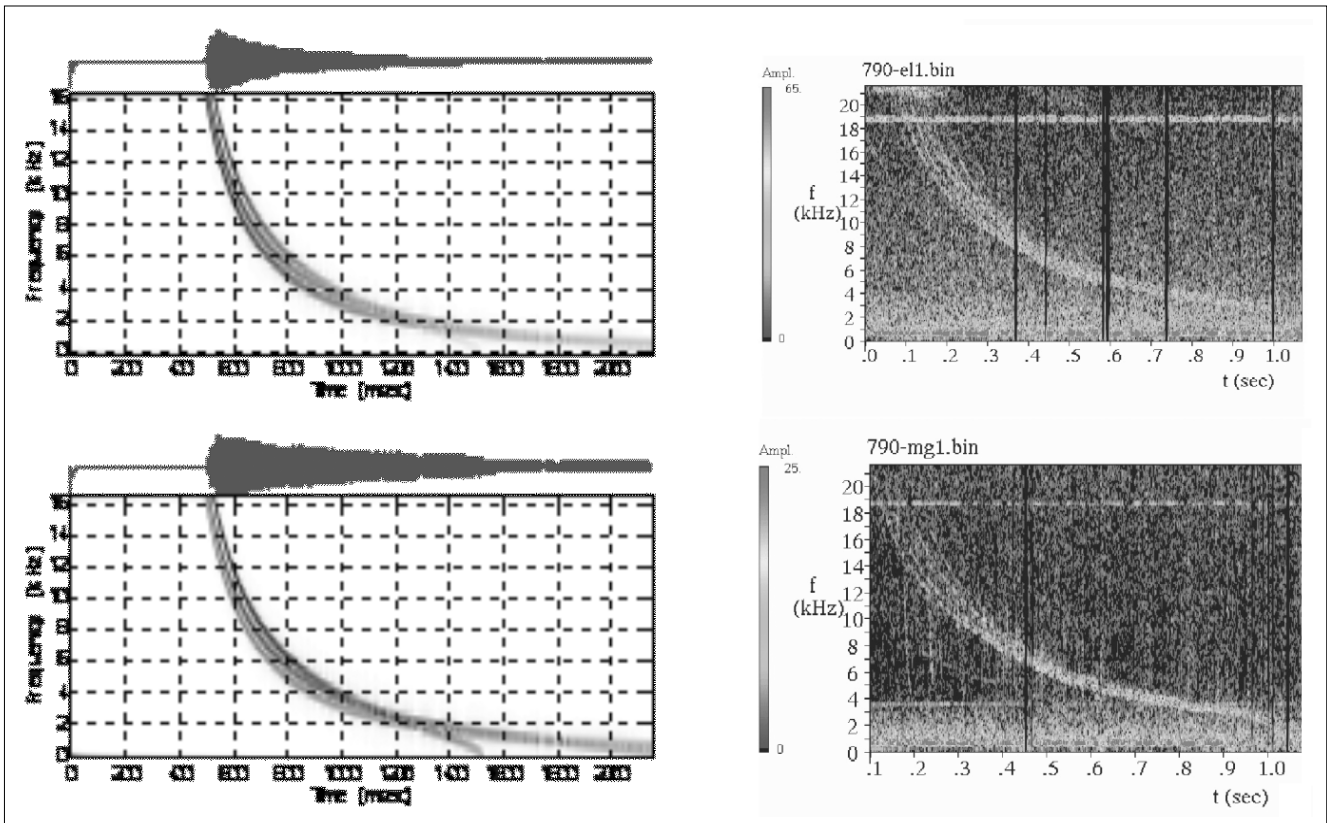
pektől, másrészt, s ez nagyon váratlan volt, a spektrogramjuk alakja szokatlan, nincs a módusoknak aszimptotikus határfrekvenciája, hanem egy idő múlva a jel dinamikus spektrum-görbéjének görbülete megfordul és a spektrogram a nulla frekvenciához fut ki véges, rövid idő alatt. (E szokatlanság miatt az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

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

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

12. ábra

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

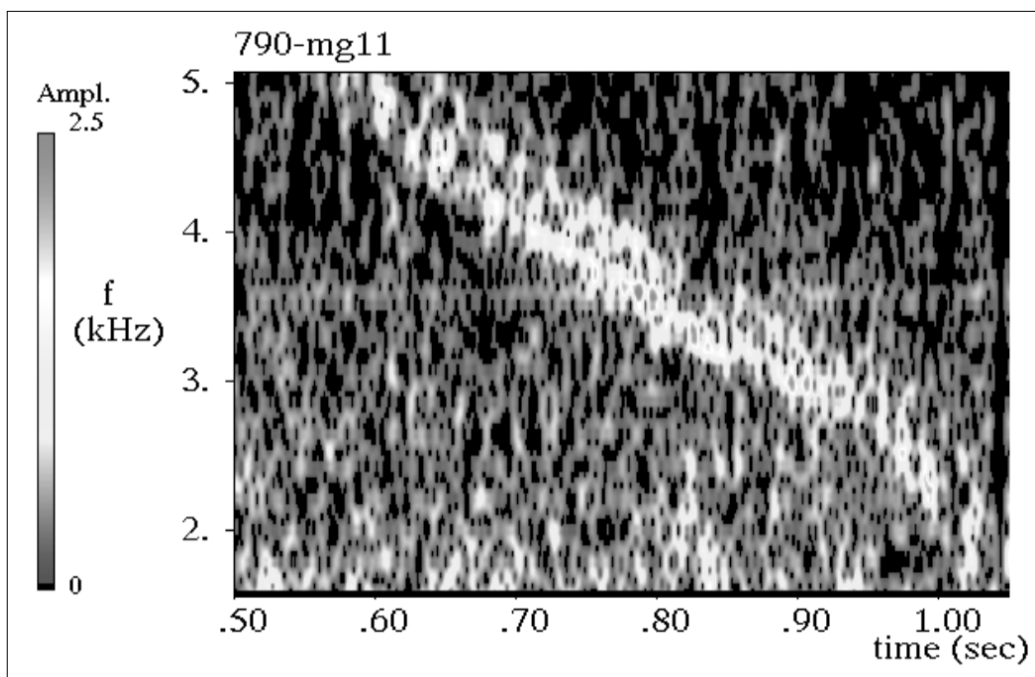


lülletekkel párhuzamos, s a terjedés induló és a terjedés során nem változó iránya az előmágnesező tér irányával egyezik meg.) A terjedési út hossza 30.000 km, a modellszámításban a plazmában a plazmafrekvencia 2,5 Mrad/s és a girofrekvencia 900 krad/s.

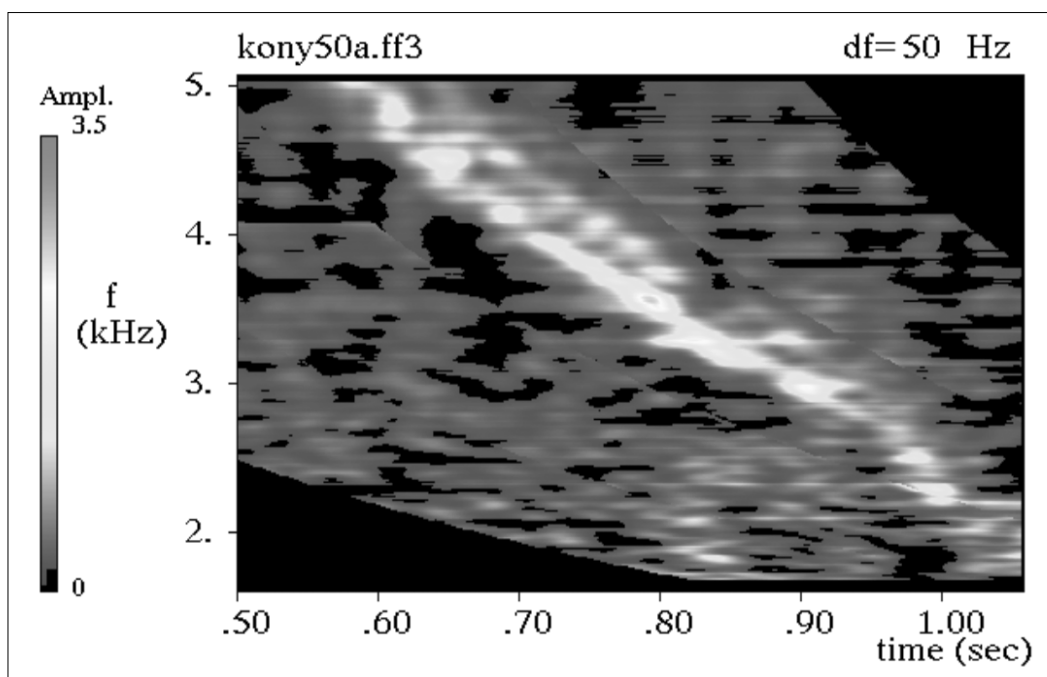
Az előző oldali 12. ábrán az első-, másod- és harmadrendű modusok dinamikus spektruma látható, s az is, hogy a harmadrendű módus dinamikus spektruma a mért jel dinamikus spektrumával nagyon pontosan megegyezik. Vagyis kijelenthetjük, hogy ez a jel vezetett jel és a két vezető felület között harmadrendű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

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

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



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



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



#### 4. Összegzés

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

#### Köszönetnyilvánítás

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

#### Irodalom

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

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

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