

dc_79_10

A földi plazmaszféra vizsgálata
whistlerek segítségével

MTA doktori értekezés

Tézisei

Lichtenberger János

Budapest
2010

A kutatási téma előzményei és a kitűzött feladatok

Az utóbbi 10-15 évben az úrfizika-űrkutatás egyik fő területe az űridőjárási kutatások, ugyanis napjainkra civilizációnk „űrtevékenység-függővé” vált, szinte láthatatlanul mindennapi életünk részei lettek a műholdak által nyújtott szolgáltatások: telekommunikáció- TV, Internet, (mobil)-telefonía; navigáció (GPS, GLONASS, GALILEO); távérzékelés (mezőgazdaság, környezetvédelem, természeti katasztrófák monitorozása). Annaira igaz ez, hogy nem is a szolgáltatás létét, hanem esetleges hiányát, zavarát vesszük észre. A Nap és a galaktikus kozmikus sugárzás változásainak hatása a Föld felsőlégkörére (űr-időjárás) főleg az ember alkotta eszközöket (műholdakat) érinti, a sugárzási övekben keletkező és onnan kicsapódó nagy (sokszor relativisztikus) energiájú töltött részecskék – ionok, elektronok – képesek a műholdakat időlegesen vagy véglegesen megbénítani és ezzel – a műhold cseréjének költségén (ami dollár tíz- vagy százmilliókban mérhető!) túlmenő - társadalmi, gazdasági károkat okozni, esetenként emberéleteket veszélyeztetni (pl. mágneses viharok alatt mind a mágneses, mind a GPS alapú navigáció megbénulhat, ami a polgári légiközlekedésben komoly veszélyforrást jelent).

Ahhoz, hogy képesek legyünk ezeket az űr-időjárási hatásokat modellezni vagy előrejelezni, le kell írunk a felsőlégkörben, a plazmaszférában és a sugárzási övekben végbemenő folyamatokat. A nagyenergiájú részecskék hullám-részecske kölcsönhatások során keletkezhetnek és csapódnak ki a sugárzási övekben. A hullám-részecske kölcsönhatás pontos leírásához le kell tudni írni a közegbeli (jelen esetben a plazmaszférabeli) hullámterjedést, ami lényegében hideg, ütközésmentes plazma esetén, amilyen a plazmaszféra, két paramétertől: a girofrekvenciától és a plazmafrekvenciától függ. Az előbbi a mágneses térerősséggel, az utóbbi a töltéssűrűséggel arányos. Mindkét

paraméter mérhető in-situ, azonban a műholdak a fizikai törvényei miatt sajnos nem lehetnek mindig mindenütt ott. A földi mágneses teret szerencsére elég pontosan le tudjuk írni mágneses tér modellekkel (centrális dipólus illetve DGRF/IGRF modellek). A töltéssűrűség meghatározására majdnem hatvan éve létezik egy olcsó és hatékony módszer, a villámok által keltett természetes rádióhullámok, a whistlerek használata, melyek segítségével meghatározható a terjedési út (mágneses erővonal) menti elektronsűrűség-eloszlás, amely kulcsfontosságú paraméter a plazmaszféra és a sugárzási övek modellezésben.

Bár a Nemzetközi Geofizikai Évtől (1957-58.) a világ számos obszervatóriumában kezdték el a whistlerek regisztrálását, és komoly eredmények születtek a whistlerek értékelési eljárásaira, a whistlerek manuális kiértékelési eljárásai azonban rendkívül időigényesek és fárasztóak. Az eljárások első lépése a whistlerek detektálása a nyers adatokban, a klasszikus eljárás a szélessávú VLF jel végighallgatása vagy újabban a dinamikus spektrum vizuális vizsgálata. Az előbbiben a emberi fül, az utóbbiban a szem játssza a detektor szerepét. Mindkét eljárás a valós időnél 10-20-szor lassúbb, egy órányi regisztrátum végighallgatása- végignézése 3-5 óra, és egy ember 1-2 órányi anyagnál nem tud naponta többet végighallgatni, végignézni. Ezért – bár a technika ígéretes, a whistlereket sohasem alkalmazták a plazmaszféra elektronsűrűségének rutin monitorozására.

Ahhoz tehát, hogy a whistlereket alkalmazni lehessen a plazmaszféra vizsgálatában és űr-időjárási kutatásokban, meg kell valósítani a whistlerek automatikus detektálását, ki kell dolgozni azokat az eljárásokat, amelyek segítségével a detektált whistlerek invertálhatóak, azaz származtathatóak a plazmaszféra elektronsűrűségének adatai, és ez az inverzió közel valós időben, automatikusan végezhető el.

A téma fontosságát jelzi, hogy mind az Európai Űr-ügynökség (ESA), mind az EU programokat indít az ilyen típusú kuta-

tások elősegítésére. Az ESA 2009-ben indította a Space Situational Awareness (SSA) programot, amelynek célja az önálló európai operatív szolgálatok megteremtése három területen (űrszemét, földközeli objektumok és űr-időjárás), az EU pedig az FP-7-es keretprogramban (FP7-SPACE-2010-1) külön Workprogramme-ban (SPA.2010.2.3-1: Security of space assets from space weather events) támogatja az ilyen kutatásokat. A NATO SSA programjának előkészületei szintén megkezdődtek.

Új tudományos eredmények

1. Automatikus whistlerdetektáló eljárás

Kidolgoztam egy eljárást (AWD), amelyik képes a nyers VLF adatokból automatikusan kiválasztani (detektálni) a közepes mágneses szélességen terjedő whistlereket. Az eljárás számítógépes algoritmus a valós időnél gyorsabb és így képes a whistlerek folyamatos automatikus detektálására.

Az AWD eljárást kiterjesztettem nagyobb és nagy mágneses szélességen terjedő whistlerekre, whistlercsoportokra, valamint kis mágneses szélességeken és műholdakon regisztrált whistlerekre (töredék, ferde és nem vezetett whistlerek) [*Lichtenberger*, 2009].

2. Új whistlerinverziós eljárás

Kidolgoztam egy új, az eddig létezőknél pontosabb whistlerinverziós eljárást, amely integrálja a legújabb elméleti hullámterjedési és műholdas sűrűségmérési adatokból származó mágneses erővonallmenti empirikus elektronsűrűség eloszlás modelleket [*Lichtenberger*, 2009].

3. Többutas terjedésű whistlercsoport modellje

Kidolgoztam egy modellt, amely leírja a többutas terjedésű (MP) whistlercsoportokat. A modell az erővonalmenti elektronsűrűség eloszlás modellje mellett a plazmaszféra egyenlítői elektronsűrűség profiljának új, kétparaméteres leírását is magába foglalja [Lichtenberger, 2009].

4. Virtuális whistlernyom transzformáció

Definiáltam egy új, általam virtuális whistlernyom transzformációnak nevezett matematikai eljárást, amelyet a többutas terjedésű valós whistlernyomokra alkalmazva a plazmaszféra egyenlítői elektronsűrűség profil két paramétere meghatározható, így a megszokottól eltérően nem csak az egyes nyomok terjedési útjai mentén, hanem a plazmaszféra széles radiális tartományában is meghatározható az elektronsűrűség eloszlása [Lichtenberger, 2009].

A virtuális whistlernyom transzformáció segítségével bebizonyítottam, hogy az általam kidolgozott új whistler-inverziós eljárás a mérési és eljárási pontosságokon belül pontosabban írja le a valóságot, mint az eddigi eljárások [Lichtenberger, 2009].

5. Automatikus whistlerelemző algoritmus

Kidolgoztam egy eljárást a whistlernyomok automatikus elemzésére (AWA), amelyből a gyakorlatban is alkalmazható számítógépes algoritmust készítettem. A gyakorlati alkalmazás az automatikusan detektált és elemezhető whistlerek közel valós idejű feldolgozását jelenti, amellyel elérhető a plazmaszféra elektronsűrűségének közel valós idejű monitorozása és amellyel lehetővé válik a plazmaszféra dinamikájának vizsgálata és valós idejű plazmaszféra modellek kidolgozása űr-időjárási vizsgálatokban [Lichtenberger et al., 2010].

6. Globális automatikus whistlerdetektor és elemző hálózat (AWDANet)

Széleskörű nemzetközi kooperációban létrehoztam egy globális hálózatot az automatikus whistlerdetektor és whistler-elemző (AWDA) állomásokból (AWDANet). A folyamatosan bővülő észlelőhálózatnak jelenleg 15 működő és 12, a közeljövőben telepítésre kerülő állomása van. Az AWDANetben a whistlerdetektálás operatív üzemben, a whistlerelemzés kísérleti üzemben folyik. A hálózat elsődleges célja plazmaszferikus elektronsűrűség adatok operatív szolgáltatása űr-időjárási modellekhez, előrejelzésekhez és operatív programokhoz (pl. ESA és NATO SSA) [Lichtenberger *et al.*, 2008].

7. Villám-whistler korrelációs vizsgálatok

Az AWDANet többéves whistler adatsorain statisztikai vizsgálatokat végeztem a whistlerek alig vagy nem ismert keletkezési és terjedési körülményeinek vizsgálatára. Ez az AWDANet másodlagos célja. Megállapítottam, hogy a whistlerek terjedési meridiánja, amely szükséges információ a plazmaszféramodellezéshez, az európai-afrikai és az amerikai meridiánok esetében egybeesik a vevőállomás mágneses meridiánjával, míg az új-zélandi vevőállomás esetében a statisztikus vizsgálat nem ad egyértelmű eredményt [Lichtenberger *et al.*, 2008; Collier *et al.*, 2006, 2009; Rodger *et al.*, 2009; Collier *et al.*, 2010a,b].

Az eredmények hasznosítása, továbbfejlesztése

A dolgozatban ismertetett kutatási eredmények számos esetben új kérdéseket indukáltak, amelyeket a jövőben kell tisztázni, illetve feladatokat generáltak, amelyeket a közeljövőben tervezünk teljesíteni. Ilyen feladat például az AWDANet tel-

jes kiépítése, az AWA eljárás telepítése és üzembehelyezése az AWDANet állomásain és a whistlerekből, valamint a más forrásokból (FLR, műhold) származó sűrűségadatok keresztkalibrációja, amely nélkül az integrált felhasználás a plazmaszféramodellekben nem képzelhető el. Ezeknek a feladatoknak többségét az elkövetkező 3-4 évben tervezzük elvégezni, amire a már említett elnyert FP-7-es pályázat lehetőséget teremt. A következő lépés az AWDANet szolgálatyszerű működésének megteremtése, amely pl. az ESA vagy NATO SSA programokban valósulhat meg.

A nyitott kérdések közé tartozik a whistlerek terjedési meridiánjának meghatározása minden vevőállomás esetében, ehhez esetenként speciális mérések szükségesek (pl. közeli mérőállomások telepítése háromszögletes kilépési-pont meghatározáshoz). Egyidejű földi és műholdas mérések szükségesek az inverziós módszerek ellenőrzéséhez és kalibrációjához, enélkül csak közvetett bizonyítékok állnak rendelkezésre a modellek pontosságáról. Ilyen típusú mérések tervei (SAS-4 kísérlet) elkészültek, a megvalósítás tervei is körvonalazódnak.

További nyitott kérdés a teljes hullámalak-megoldás alkalmazása valódi, plazmával töltött görbült csőtápvonalban (ez modellezi az erővonalmenti vezetőszerkezeteket) és a veszteségeket is figyelembe vevő megoldás alkalmazása pl. kis szélességű terjedés esetén, ahol a veszteség biztosan nem hanyagolható el; illetve annak megvizsgálása, hogy a veszteségek figyelembe vétele ad-e figyelembe veendő korrekciót a veszteségmentes megoldás diagnosztikai alkalmazásaiban.

Előttünk álló feladat a AWD algoritmus rutinszerű alkalmazása műholdakon mért nagytömegű VLF adatra, ez az alkalmazás a whistlerkeletkezés-terjedés elméletéhez és a hullámrészecske kölcsönhatás elméletéhez is adhat információt. Komoly kihívás lehet a nem-vezetett, tehát a főleg műholdon vett whistlerek diagnosztikai alkalmazásának kidolgozása, ez az eddigi elméletek és módszerek újszerű kombinációját igényli.

A tézispontokhoz kapcsolódó publikációk

Collier, A. B., A. R. W. Hughes, J. Lichtenberger, and P. Steinbach (2006), Seasonal and diurnal variation of lightning activity over Southern Africa and correlation with European whistler observations, *Ann. Geophys.*, *24*, 529–542.

Collier, A. B., B. Delpont, A. R. W. Hughes, J. Lichtenberger, P. Steinbach, J. Öster, and C. J. Rodger (2009), Correlation between global lightning and whistlers observed at Tihany, Hungary, *J. Geophys. Res.*, *114*, A07,210, doi:10.1029/2008JA013863.

Collier, A. B., S. Bremner, J. Lichtenberger, J. R. Downs, C. J. Rodger, P. Steinbach, and G. McDowell (2010a), Global lightning distribution and whistlers observed at Dunedin, New Zealand., *Ann. Geophys.*, *28*, 499–513.

Collier, A. B., J. Lichtenberger, M. A. Clilverd, P. Steinbach, and C. J. Rodger (2010b), Source region for whistlers detected at Rothera, Antarctica, *J. Geophys. Res.*, *submitted*, doi:10.1029/2010JA016197.

Lichtenberger, J. (2009), A new whistler inversion method, *J. Geophys. Res.*, *114*, A07,222, doi:10.1029/2008JA013799.

Lichtenberger, J., C. Ferencz, L. Bodnár, D. Hamar, and P. Steinbach (2008), Automatic Whistler Detector and Analyzer system: Automatic Whistler Detector, *J. Geophys. Res.*, *113*, A12,201, doi:10.1029/2008JA013467.

Lichtenberger, J., C. Ferencz, D. Hamar, P. Steinbach, C. J. Rodger, M. A. Clilverd, and A. B. Collier (2010), The Automatic Whistler Detector and Analyzer (AWDA) system:

Implementation of the Analyzer Algorithm, *J. Geophys. Res.*, p. accepted, doi:10.1029/2010JA015931.

Rodger, C. J., J. Lichtenberger, G. McDowell, and N. R. Thomson (2009), Automatic whistler detection: Operational results from New Zealand, *Radio Sci.*, *44*, RS2004, doi: 10.1029/2008RS003957.