

Opponensi vélemény

Lichtenberger János „A földi plazmaszféra vizsgálata whistlerek segítségével”
című MTA doktori értekezéséről

Az értekezés általános bírálatát tekintve az értekezés egy tervszerűen végzett, a kitűzött cél elérésére tett lépésekből álló tevékenységről számol be. Az olvasó bevezetőként egy történeti áttekintést és elméleti alapokat tartalmazó fejezettel találkozunk. Attól eltekintve, hogy egy ilyen bevezetés minden esetben célszerű, ez a bevezetés nemcsak ismereteket közöl a későbbiek könnyebb megértése céljából, hanem egyúttal arra is magyarázatot ad, hogy mi a földi plazmaszférával kapcsolatos vizsgálatok értelme, milyen haszonnal járnak a tudomány számára az értekezésben leírt fejlesztések a mérési tevékenység, az adatfeldolgozás és az értelmezés terén. Hangsúlyozni kell, hogy a whistlerek esetében olyan természeti jelenségről van szó, amelynek előfordulása, megjelenési formája rendkívüli módon megnehezíti a mérések automatizálását, amely egy ilyen célkitűzés esetén, ami a jelölt részéről a földi plazmaszféra vizsgálatával kapcsolatban megfogalmazódott, elkerülhetetlen.

Az automatizálás a whistlerek felismerésén, detektálásán kell hogy kezdődjön. Ismerve a whistlerek képi megjelenését, ez nem látszik egy könnyű feladatnak különösen akkor, ha arra gondolunk, hogy a világ különböző részein létrehozott állomásokon regisztrált whistler jeleket kell detektálni.

A whistler jel feldolgozásához megfelelő inverziós eljárásra van szükség. Itt szintén az automatizálás okozza a legnagyobb gondot, különös tekintettel a whistlercsoportok előfordulására.

Ahhoz, hogy a feldolgozás adatai rendelkezésünkre állhassanak, a whistlerek elemzését is automatizálni kell. Mindig arra kell gondolni, hogy egy állomáshálózat nagy számú detektált whistlereinek elemzését kell elvégezni, mégpedig a valós idejű elemzést.

A jelölt előzőekben ismertetett eredményei tették lehetővé a kitűzött cél elérését, a globális automatikus whistlerdetektor és elemző hálózatnak a kiépítését és működtetését. A jelöltnek ezzel egy ambiciózus tervét sikerült megvalósítani, ami lehetővé teszi a plazmaszféra globális monitorozását.

Értekezésének befejező részében a jelölt a whistlert keltő villámok problémájával foglalkozik. Ez a whistlerek elemzésénél mindig felmerülő probléma, annál is inkább, mivel maguk a villámok is összetett jelenségek (pl. földvillám–felhővillám, a villámok különböző fázisai, többszörös villám).

A részletekre áttérve az 1. fejezetben a „Plazmaszféra elektronsűrűség-eloszlásának meghatározása whistlerek segítségével” a geomágneses tér dipólus közelítésével kapcsolatban Berube et al. (2006) vizsgálatai szerint a dipólus közelítés csak $L = 2$ értékig alkalmazható. Ennek itt nincs jelentősége. Egyébként a későbbiekben, ahol erre szükség van, a jelölt korrekciót alkalmaz (3.3 fejezet). Az elméleti alapokkal foglalkozó fejezetben a gerjesztő jel alakját tekintve – a modell a gerjesztőjel alakjának a változtatásával illeszthető a mért jelre. Így a gerjesztő jel is meghatározható. A gerjesztőjel a szferikusz jel időbeli változásának a függvénye, ez utóbbi pedig a kisülési csatornában a fővillám időtartama alatt folyó áram erősségének a változását tükrözi. Csak tájékoztatásként, a villámáramok időbeli változására egy általános érvényűnek tartott formulát is megadtak, amely exponenciális függvényekből áll. Egy ilyen megközelítés szerint a villámáramok időbeli változása a következő formulával írható le:

$$J = Ae^{-\alpha t} - Be^{-\beta t} + Ce^{-\gamma t}$$

ahol a szorzó tényezők értékei $A = 20 \text{ kA}$, $B = 25 \text{ kA}$, $C = 5 \text{ kA}$, továbbá $\alpha = 5 \cdot 10^4 \text{ s}^{-1}$, $\beta = 5 \cdot 10^5 \text{ s}^{-1}$, $\gamma = 7 \cdot 10^2 \text{ s}^{-1}$. Mérések szerint a fővillámban az áramerősség sematizált időbeli lefolyása: az áramerősség csúcserőértékét $2 \mu\text{s}$ alatt éri el, majd kb. $24 \mu\text{s}$ alatt csökken a csúcserő felére (Hepburn, 1957). A kisülési csatornát annak szabálytalanságaitól eltekintve egy vertikális elektromos dipólusnak tekintik és annak elektromágneses terét ennek alapján határozzák meg (Simonyi, 1955).

A plazmaszféra elektronsűrűség eloszlásának a meghatározása whistlerek segítségével c. fejezetben leírtakkal kapcsolatban szeretném a jelölt figyelmét az IRI 2007 modellre felhívni, amely 1000 km magasságig minden fontos plazmaparaméterre vonatkozó érték kiszámítását lehetővé teszi különböző időpontra és különböző földrajzi koordinátákra. A mágneses erővonalmenti elektronsűrűség eloszlást sokszor hatványfüggvénnyel fejezik ki. Az Angerami féle mágneses erővonal menti elektronsűrűség eloszlást tekintve éppen a hőmérséklet esetében alkalmaz durva megközelítést, amennyiben az elektronok és az ionok hőmérséklete nagyon különböző, valamint a magassággal különösen az elektronhőmérséklet erősen változik, növekszik. A hőmérsékletet azért emelem ki, mert az erővonalmenti diffúzióban fontos szerepe van mind az abszolút értéknek, mind a gradiensnek. Az ambipoláris diffúzió egyenletében a plazmahőmérséklet inkább az elektronok hőmérsékletének felel meg. Másrészt a diffúziós egyenlet megoldásaként kapott exponenciális függvény kitevőjében a plazma skálamagassága az, ami lényegében meghatározza az erővonalmenti ionsűrűség eloszlást. A plazma skálamagasságának a képlete szerint a plazma skálamagassága a plazmahőmérséklet növekedésével növekszik. Ennek megfelelően az ionsűrűség erővonalmenti változásának az üteme a plazmahőmérséklet növekedésével exponenciálisan csökken. Azonban ha egy állomáshálózatra gondolunk, a feldolgozandó adatmennyiségre, az elfogadható közelítéseknek fontos szerepe van. Az Angerami féle összefüggés az erővonalmenti diffúziós egyensúlyra vonatkozik. Ezt a körülményt geomágneses szempontból zavart időszakokban célszerű figyelembe venni. Az erővonalmenti ionsűrűségekre vonatkozó összefüggés abban az időben született, amikor még nem álltak rendelkezésünkre megfelelő in situ mérések adatai. Jelenleg már vannak mesterséges holdak segítségével végzett méréseken alapuló, az ionsűrűség erővonalmenti eloszlására vonatkozó összefüggések [a POLAR mesterséges hold adatain alapuló eloszlás, amely a geocentrikus távolság hatványfüggvényével fejezi ki az eloszlást (Denton et al. 2001, 2002, 2004), vagy az IMAGE mesterséges holddal végzett RPI (Radio Plasma Imager) modellezés eredményeit kifejező egyenlet (Reinisch et al. 2001, Huang et al. 2004)]. Az új inverziós eljárásban (3. fejezet) a jelölt ezek egyikét alkalmazza.

Ahhoz, hogy whistlerek segítségével megvalósítható legyen a plazmaszférában az elektronsűrűség idő és térbeli változásainak a monitorozása, állomáshálózatra van szükség. Az állomáshálózat adatainak a felhasználásához, az egyébként kezelhetetlen mennyiségű felvétel feldolgozásához automatikus whistler detektálásra (AWDA) van szükség. Problémát jelentenek a többügrású whistlerek, a többutas terjedésű csoportok. A jelölt pontosan megfogalmazott követelményeket állít fel és a whistler detektálásra szolgáló szoftvert ennek alapján dolgozza ki. A feladat bonyolultságára való tekintettel külön algoritmust dolgozott ki a közepes szélességeken, a nagyobb és nagy, valamint a kis szélességeken terjedő whistlerek detektálására. A kidolgozott algoritmusokat határfokuk szempontjából is vizsgálta megkülönböztetve két lehetséges esetet, a nem detektálást és a hamis detektálást. Ismerve az értekezésben is bemutatott whistler felvételek bonyolultságát, a háttértől sokszor alig megkülönböztethető whistler jeleket tekintve a jelölt ezen a területen is megnyilvánuló felkészültségéről, invenciózusságáról tesz tanúságot.

A jelölt ahhoz, hogy az állomáshálózat adatainak a feldolgozását minél több tapasztalatra alapozhassa, statisztikai tanulmányokat is végzett. Ehhez egy közepes és egy nagyobb

szélességű állomást használt fel. A közepes szélességű állomáson, Tihanyban a whistlerek előfordulásának a napi változása éjszakai maximumot mutat. Az évszakos változás maximuma március és április hónapokban jelentkezik (1970 december-1975 május). A napi és az évszakos eloszlásra vonatkozó további vizsgálatok arra az eredményre vezettek, hogy az eloszlás évszakos változásában a maximum nem korlátozódik március és április hónapokra, hanem a téli hónapokra is kiterjed. A 2002 és 2007 közötti időszak éveit tanulmányozva megállapítható, hogy a whistlerek előfordulása a naptevékenység csökkenésével csökken. Ami az évszakos változást illeti, az évről évre nagyon erős ingadozásokat mutat. Az előfordulás napi változása egyrészt a globális zivatar-tevékenység, másrészt a terjedési viszonyok függvénye. A nagyobb szélességű (nagyobb L értékű) állomás Dunedin esetében a whistler előfordulás napi változása figyelembe véve a világidő és a helyi idő közötti különbséget inkább délutáni maximumot jelez. Az évszakos változást tekintve itt a Tihanyban a téli hónapokra eső maximum lényegében július hónapra korlátozódik. A whistlergyakoriság idő és térbeli változásának a taglalására azért is tértünk ki, mert a későbbiekben ezzel még foglalkozunk.

A jelölt az állomáshálózat adatainak feldolgozásához új inverziós eljárást is kidolgozott. A felszínen megfigyelt whistler útja több szakaszból áll. Ezek között szerepel az ionoszféra is. A whistlerekkel foglalkozók információ hiányában a vevő helyének megfelelő kritikus frekvenciát (f_oF_2) használják a whistlert keltő hely f_oF_2 értékeként. Bár a whistler jel által az ionoszférában megtett út hatása korrekció szintjén szerepel, megjegyzésként egy-két esetben meglehetne vizsgálni külön-külön a whistler jel ionoszférába történő belépésekor az ionoszférában megtett út és a kilépés előtt az ionoszférában megtett út hatását [a kilépés közelében működő ionoszféra állomás pl. Tihany esetében a dél-afrikai Grahamstown ($33.3^\circ\text{S}, 26.5^\circ\text{E}$), Louisvale ($28.5^\circ\text{S}, 21.2^\circ\text{E}$), mindkét állomás a Rhodes University kezelésében]. A mágneses tér modellel kapcsolatban már az 1.3.2 pontban említett, a mágneses dipólus tértől való eltérést az L^* paraméter használatával korrigálja. Egy ilyen esetben, mint egy állomáshálózat működtetése célszerű az alkalmazni kívánt algoritmus, jelen esetben a sűrűségmodellek, illetve az inverziós eljárások összehasonlítása. A konklúzió: a különböző inverziós eljárásokkal kapott becslések matematikailag ugyanolyan jól illeszkedhetnek és annak ellenére, hogy a kapott eredmények különbözőek lehetnek, az illeszkedés jósága nem teszi lehetővé eldönteni melyik eljárás áll közelebb a valósághoz. Ennek a problémának a megoldására azonban a jelölt olyan közvetett módszert dolgozott ki, amellyel az inverziós eljárást ellenőrizni lehet. Az egyenlítői elektronsűrűség L értékkel történő változására vonatkozó feltevés alapján a kidolgozott többutas terjedésű whistlercsoport modellhez a jelölt létrehozott egy transzformációt. Ezt a transzformációt virtuális whistlernyom transzformációnak (VTT) nevezte el, mivel az a L, n_{eq} és a virtuális nyomok közötti megfeleltetésen alapszik. A VTT kiegyenesíti a virtuális nyomokat. A VTT-nek ez a tulajdonsága teszi lehetővé, hogy megállapítsuk, a modell paraméterek megegyeznek a VTT paramétereivel, vagy az egyenlítői elektronsűrűség nemlineáris. A virtuális whistlernyom transzformációval a jelölt olyan eszközre tett szert, amely rendkívüli módon megkönnyíti az egyébként sok buktatóval járó whistlernyom meghatározást. A többutas terjedésű csoport modell alkalmazására példákat is mutat be, amelyekben a VTT bizonyította az új inverziós eljárás helyességét, amennyiben annak elemei a hullámterjedési modellt tekintve az Appleton-Hartree / Ferencz-féle diszperziós reláció, a Denton-féle erővonalmenti elektronsűrűségeloszlás, valamint a geomágneses tér mágneses dipólussal történő leírása.

Ha nagy mennyiségű felvételt kell kiértékelni, akkor elengedhetetlen egy automatikus whistlerelemző algoritmus kidolgozása. Az első lépés a manuális kiértékeléshez (skálázás) hasonlóan az $f - t$ párok kiolvasása, itt annak automatizálása. Az $f - t$ párok megállapításának helyességét szolgálja a VTT eljárás, különösen többutas terjedésű whistlerek esetében. A spektrogramokon nagyon sok zavaró jel észlelhető. Ahhoz, hogy a hasznos jelek

biztonságosabban legyenek kiolvashatók, a spektrogrammot meg kell tisztítani ettől a zavaró „háttérzaj”-tól. Ekkor a spektrogrammok felbontását is érdemes megnövelni. Az automatikus whistlerelemző algoritmusnak jól megfogalmazott követelményeknek kell eleget tennie. Ezek közül a legfontosabb az, hogy az eljárásnak közel valós idejűnek kell lennie.

Megjegyzésként elsősorban a többutas terjedésű whistlerekkel összefüggésben véleményem szerint nem lehet megkerülni az ionoszférikus irregularitásoknak, mint daktoknak esetleges szerepét. Az ionoszférában fellépő két legfontosabb irregularitástípus a szporadikus E réteg és a spread F jelenséget előidéző irregularitások. Mind a kettő jól megfigyelhető az ionoszféra függőleges szondázásának eredményeként kapott ionogrammon. A két irregularitás közül esetünkben a spread F által jelzett irregularitások jöhetnek számításba. Ennek a feltételezéséhez a whistlerek és a spread F napi és évszakos változásának a hasonlósága szolgáltatja az alapot (Bencze and Márcz, 1998). Mind a whistlerek, mind a spread F előfordulásának a napi változása az éjszakai órákban éri el a maximumát. Ugyanígy mind a whistlerek, mind a spread F évszakos változása maximumát a téli hónapokban éri el. Az inkoherens szóródáson alapuló radar mérések és a mesterséges holdak segítségével végzett, megfelelő időbeli felbontású elektronsűrűség mérések azt mutatják, hogy a spread F-et létrehozó elektronsűrűség irregularitások a mágneses erővonal mentén alakulnak ki. Ezt már az ionoszféraszondázás korábbi időszakában feltételezték azzal együtt, hogy ez az irregularitás az erővonal mentén nem folytonos, szakaszok maradnak ki (Rawer and Suchy, 1955). Ez azt jelentheti, hogy a terjedést részben a dakt, részben csak a mágneses tér jelenléte biztosítja. A plazma buborékokkal összefüggő kutatások azt mutatták, hogy ezek az irregularitások ugyancsak a mágneses erővonalak mentén alakulnak ki a környezetükhöz viszonyítva csökkent elektronsűrűségű képződményekként. A plazmabuborékok az éjszakai órákban az F2 réteg alján légköri gravitációs hullámok hatására létrejövő polarizációs elektromos tér és a geomágneses tér által létrehozott függőleges drift ($(\vec{E} \times \vec{B})$) következményeként jönnek létre (Rayleigh-Taylor instabilitás). A plazmabuborékok geometriáját tekintve, plazmabuborékok sora keletkezik longitudinális irányban. Ezek egyesülhetnek és széles, akár 700 km kiterjedésű buborékokat képezhetnek. Az egyesüléstől függetlenül egyes plazmabuborékok is fennmaradhatnak (Huang et al. 2011). Függőleges kiterjedésük az 1500 km-t is elérheti. Emelkedési sebességük $100 - 500 \text{ ms}^{-1}$. A kutatások azt is kimutatták, hogy a plazmabuborékok okozzák az ionoszféra F tartományában a spread F jelenséget (Argo and Kelley, 1986; Bencze and Márcz, 2011). Így a spread F idő és térbeli változására vonatkozó eredmények a plazmabuborékokra is kiterjeszthetők lennének. Érdemes megemlíteni, hogy a spread F előfordulásának gyakorisága mágneses egyenlítői és magas szélességi maximumot mutat (Lyon et al., 1960).

Az értekezésben leírt és itt is tárgyalt lépések, illetve az ezekkel kapcsolatban született eredmények (automatikus whistlerdetektálás, új inverziós eljárás, többutas terjedésű whistlercsoport modell, VTT eljárás és automatikus whistlerelemző algoritmus) tették lehetővé, hogy ellehessen kezdeni egy állomáshálózat felépítését. Ez az AWDANet hálózat. A már működő 15 és a jövőben további 14 állomással bővülő állomáshálózatnak a létrehozása a jelölt kiemelkedő tudományos eredményei mellett fáradságot nem ismerő szervezőképességének tulajdonítható. A munka nehézségével kapcsolatban csak egyetlen követelményt emelnék ki, azt, hogy az állomáshálózat tervezésénél arra kellett törekedni, az állomások közel egyenletes eloszlásúak legyenek.

A jelölt befejezésül a whistlerelemzés szempontjából fontos kérdéssel, a villámok és a whistlerek közötti korrelációval foglalkozik. Ennek során megállapítást nyert, hogy Tihany esetében a konjugált pont környékével a legnagyobb a villámok és a whistlerek közötti pozitív korreláció. A dunedini whistlerek és a villámok közötti korreláció vizsgálata pillanatnyilag nem ad egyértelmű választ a whistlerek terjedési útjára vonatkozóan. Az

antarktiszi whistlerek és villámok közötti korrelációt vizsgálva az a vevőállomások mágneses meridiánjában való terjedést valószínűsíti.

Csak egy apró megjegyzés, a szferik szerintem szferiksz az *atmospherics* szó rövidítéséből származik és ezért lenne helyes a szferiksz kifejezés.

A jelölt tézisei jól tükrözik annak a nagy volumenű, koncepciózus kutatómunkának az eredményeit, amelyek az AWDANet állomáshálózat kiépítésének az elkezdését és működtetését lehetővé teszik. A jelölt téziseit elfogadom, ezek tömören tartalmazzák a kutatás során született eredményeket.

Mindezek alapján Lichtenberger János MTA doktori értekezésének nyilvános vitára bocsátását melegen támogatom.

Sopron, 2011. május 12.

Bencze Pál
az MTA doktora
c. egyetemi tanár

Az opponensi véleményben használt és az értekezésben nem idézett irodalmi hivatkozások:

Argo, P.E., Kelley, M.C., Digital ionosonde observations during equatorial spread F. *J. Geophys. Res.*, 91, 559, 1986.

Bencze, P., Márcz, F., Contribution to the variability of the ionosphere-spread F at mid-latitudes. *Proc. 2nd COST 251 Workshop „Algorithms and Models for COST 251 Final Product”*, 30-31 March 1998, Side, Turkey.

Bencze, P., Márcz, F., Occurrence frequency of whistlers and ionospheric conditions. *J. Atmos. Solar-Terr. Phys.* -hez benyújtva.

Berube, D., Modwin, M.B., Ahn, M., Computing magnetospheric mass density from field line resonances in a realistic magnetic field geometry. *J. Geophys. Res.*, 111 (A8), 206, 2006.

Denton, R.E., Lessard, M.R., Anderson, R., Miftakhova, E.G., Hughes, J.W., Determining the mass density along magnetic field lines from toroidal mode eigenfrequencies: Polynomial expansion applied to CRESS data. *J. Geophys. Res.*, 106(A12), 29915-29924, 2001.

Hepburn, F., Wave-guide interpretation of atmospheric waveforms. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 10, 121-135, 1957.

Huang, Chao-S. et al., Evolution of equatorial ionospheric plasma bubbles and formation of broad plasma depletions measured by the C/NOFS satellite during deep solar minimum. *J. Geophys. Res.*, 116 (A3), A03309, 2011.

Lyon, A.J., Skinner, N.J., Wright, R.W., The belt of equatorial spread F. *J. Atmos. Terr. Phys.*, 19, 145, 1960.

Rawer, K., Suchy, K., *Encyclopedia of Physics* (ed. Flügge), vol. XLIX/2, Geophysics III/2

Simonyi K., *Elméleti Villamosságtan*. Tankönyvkiadó, Budapest, 1955.