

## Válasz Szegő Károly, az MTA doktora opponensi véleményére

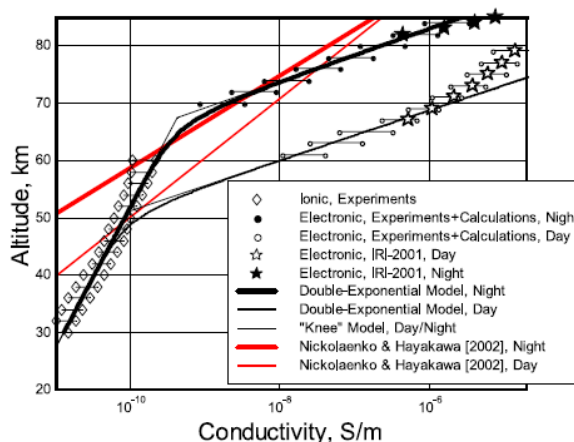
Megköszönöm Szegő Károlynak, a fizikai tudományok doktorának a „Schumann-rezonancia, mint globális változások jelzőrendszere” c. doktori munkám értékelését. Az opponensi véleményben az alábbi kérdésekre kérte a válaszomat:

1. Az ideális hullámvezetőtől való eltérés milyen változásokat okoz a 3. fejezet 1-4. egyenleteiben, pl. a 7.1. fejezetben leírt effektus.

Az alapvető változást a bonyolultabb ionoszféra-modell alkalmazása jelenti, amely a komplex refrakciós index megváltozásán keresztül érvényesül a téregyenletekben. A 7.1. fejezetben leírt effektust, a Föld-ionoszféra üregrezonátor nappali-éjszakai aszimmetriájának a hatását, ami laterális inhomogenitásnak felel meg, a 3.1. fejezetben leírt modell már nem képes leírni. A valóságban a Föld-ionoszféra üreg a magassággal változó, nappal és éjszaka egymástól eltérő vezetőképességű profillal jellemezhető, ahogyan azt a dolgozat 7.2. ábrája szemlélteti. 50 km magasság felett a nappali és éjszakai vezetőképesség közötti már több nagyságrendnyi az eltérés, az ionoszférikus D-tartomány éjszakai leépülésének a következtében. Madden and Thompson (1965) javasolta először a két-dimenziós távíróegyenlet alkalmazását az ELF-hullámok (3 Hz-3 kHz) Föld-ionoszféra hullámvezetőben történő terjedésének a leírására. Ezzel közel ötven éve lefektette az inhomogén (“non-uniform”) hullámvezetőben történő ELF hullámterjedési elmélet alapját. Greifinger and Greifinger (1978) úttörő munkája hozta az áttörést, amikor az ionoszférikus vezetőképességet két eltérő meredekségű, exponenciális görbével és két komplex karakterisztikus magassággal jellemezte. Ekkor a komplex refrakciós index négyzete a  $H_L(f)$  a komplex felső karakterisztikus magasság és  $H_C(f)$  pedig a komplex alsó karakterisztikus magasság hányadosaként adható meg.

$$S_0^2(f) = \frac{H_L(f)}{H_C(f)}$$

Az alábbi ábrán egyrétegű (Nickolaenko and Hayakawa, 2002) és kétrétegű ionoszférikus vezetőképesség-modellek és mért értékek láthatók nappali és éjszakai ionoszférára vonatkozóan. Mushtak and Williams (2002) vezette be a térd („knee”) modellt.



Kirillov két munkájával, Kirillov et al. (1997) és Kirillov (2002), vált rutinszerűvé a “két-dimenziós távíró egyenlet” (TDTE: Two-Dimensional Telegraph Equation) alkalmazása az elektromos és mágneses térkomponensek számítására az ELF tartományban inhomogén (“non-uniform”) hullámvezetőben. A két-dimenziós távíróegyenlet a hullámvezető bármilyen

aszimmetriája esetén (nappali-éjszakai aszimmetria, szélességfüggés, poláris anomália, helyi ionoszféra zavar) szolgáltat megoldást. A numerikus megoldás, bár időigényes, tetszőleges megválasztott terjedési paraméterre lehetséges. A 7.1. fejezetben a Mushtak-féle „térmodell” került alkalmazásra a két-dimenziós távíróegyenlet analitikus megoldásával (Kirillov et al., 1997) „részben uniform” („partially uniform”) ionoszféra modellt használva. Ez azt jelenti, hogy a két komplex karakterisztikus magasság nappali és éjszakai átlagértékei lettek figyelembe véve a nappali és éjszakai féltékére.

*2. Milyen egyéb módszereket lehetne használni az adatok analizisére, más csoportok milyen módszereket használnak, az előnyök, hátrányok összehasonlítása.*

Háromféle spektrális módszer terjedt el a Schumann-rezonancia paraméterek (amplitúdó, frekvencia, csillapítás, jósági tényező) számítására háttér Schumann-rezonancia idősorokból. Ezekből két módszer, a komplex demoduláció (Sátori et al., 1996) és a Prony-módszer (Füllekrug, 1995; Yang and Pasko, 2005) az időtartományban határozza meg a spektrális paramétereket, a Lorentz-illesztés (Sentman, 1987; Mushtak and Williams, 2002; 2008) pedig a frekvenciatartományban működik.

A komplex demoduláció a kiválasztott rezonancia-módus csúcs-frekvenciáját és az ahhoz tartozó amplitúdót határozza meg megfelelően kiválasztott hosszúságú időablakokból. Ez a spektrális eljárás hatékonyan működtethető kvázi valós idejű („real-time”) üzemmódban, a mintavételezést és szűrést váltakoztatva. Ezen módszer nagy erénye, hogy a frekvenciák nagyon pontosan (néhány század Hz) meghatározhatók, mivel a tapasztalati úton meghatározott extrém amplitúdókhoz (túl nagy/túl kicsi) tartozó frekvenciaértékek nem kerülnek bele az adott időablakra meghatározott frekvenciaátlagba, a számított amplitúdók értékét pedig korrigálni lehet az adott módusra tervezett szűrő karakterisztikájával. A módszer hátránya, hogy a jósági tényező meghatározására nem alkalmas.

A Föld-ionoszféra üreg rezonanciái statisztikus értelemben leírhatók egy lineáris dinamikus rendszer megoldásaiként is. A lineáris dinamikus rendszernek a Prony-algoritmussal történt analízise gerjesztési és belső rendszer-paraméterek készletét eredményezi. Az amplitúdók leírják a gerjesztési mechanizmust, a csillapítás és sajátfrekvencia a Föld-ionoszféra üreg belső sajátjaival kapcsolatos.

A Lorentz-illesztés során mérésekből FFT-vel (Fast Fourier Transformation) meghatározott energiaspektrumokra legkisebb négyzetes módszerrel Lorentz-függvény illesztésével történik a Schumann-rezonancia paraméterek (energia, frekvencia, jósági tényező) meghatározása, azzal a feltételezéssel, hogy a Schumann-rezonancia spektrumok jól közelíthetők egy harmonikus oszcillátor csillapodó rezgéseivel. Ismereteim szerint a világon jelenleg működő SR obszervatóriumok többségében ezt a módszert használják.

Az időtartományban működő Prony-algoritmus előnyeire vagy hátrányaira vonatkozóan nincs ismeretem, viszont az ugyancsak időtartományban működő nálunk alkalmazott komplex demodulációs módszerrel meghatározott spektrumokat magunk is összehasonlítottuk frekvenciatartományban működő, FFT-vel számított spektrumokkal, szimulált és mért idősorokon tesztelve a két módszert (Veró et al., 2000). A fő probléma az idősorok analízisének a megfelelő idő/frekvencia-felbontás megválasztása. A Fourier transzformáció alkalmazásakor, a dinamikus spektrum számítására, azaz a spektrális paraméterek időbeli változásának a meghatározására ez eleve rögzítésre kerül az idő/frekvencia-ablak megválasztásával, amelyen belül a számítások történnek. A komplex demoduláció esetében az alkalmazott konvolúciós szűrők több rugalmasságot jelentenek a frekvencia-felbontás tekintetében, az szabadon választható, a szűrőnek kell elegendő hosszúságúnak lenni időben, ami tulajdonképpen kritérium az időfelbontás vonatkozásában. A konvolúciós szűrők további előnye, hogy egy időablakon belül is a zavart szakaszok könnyen eltávolíthatók, anélkül, hogy az időablak további részéből nyert eredményt befolyásolná. Ez eleve hatékony zajszűrést

jelent, ami igen fontos szempont a különböző eredetű lokális zavarokkal terhelt Schumann-rezonancia mérések tekintetében. Összességében elmondható, hogy impulzusmentes idősorokat tekintve a két spektrális módszer nagyon hasonló eredményeket szolgáltat amplitúdóra és frekvenciára, FFT-vel még a jósági tényező is meghatározható. A valóságban azonban ritkán fordulnak elő teljesen zavarmentes időszakok, a zavaró impulzusok számának növekedésekor egyértelműen megmutatkozik a komplex demoduláció előnye, különösen, hogy Nagycenken kvázi valós időben történik a spektrális analízis. Ez az összehasonlító elemzés egy további vonatkozásban is fontossá vált. Az SR-alapmódus hullámhossza a Föld kerülete, ez azt jelenti, hogy a hullámhosszhoz képest közelinek (néhány 100 km) számító SR obszervatóriumok spektrális paraméterei elvileg helyettesíthetik egymást arra az esetre, ha egyik helyen valamilyen oknál fogva szünetelt a mérés (Példa az 5.6 a) ábra a 21. oldalon). A módszertani összehasonlítás tükrében azonban szigorú kritérium, hogy csak azonos spektrális eljárással végzett analízis után tehető meg a helyettesítés.

3. Kérem, fejtse ki részletesebben, ha lehet a villámkeletkezés fizikai mechanizmusára alapozva, hogy kis légköri hőmérsékletváltozások miért vezethetnek a villámlások számának a megsokszorozódására.

A villámlások számának kis légköri hőmérsékletváltozás hatására történő megsokszorozódása lényegében tapasztalati felismerés, amelyről Earle Williams is beszámolt a Science c. folyóiratban, 1992-ben egy hosszú trópusi tanulmányújtját követően, s felvetette azt az elképzelést, hogy a Schumann-rezonancia jelenség „trópusi hőmérőként” is használható (Williams, 1992). Én is erre a munkára hivatkoztam a dolgozatomban. A hőmérsékletnek a villámok keletkezési gyakoriságára kifejtett hatását ma is sokan vizsgálják. A feltett kérdésre Earle Williams-szel történt privát kommunikáció és szakirodalmi búvárkodás alapján a következőket tudom válaszolni.

A zivatar általában a meleg időszakban alakul ki, amikor a hőmérséklet nagysága és a napsugárzás miatt elég energia, ún. konvektív hasznosítható potenciális energia, (CAPE-Convective Available Potential Energy) szabadul fel, és a feláramlás következtében létrejön a zivatarfelhő, amelyben a töltések keletkezése és előjel szerinti szétválása megtörténik. A konvekció révén elérhető potenciális energia az az energiamennyiség, ami rendelkezésre áll egy légtömeg („air parcel”) felemeléséhez.

$$CAPE = \int_{z_f}^{z_n} g \left( \frac{T_{v,parcel} - T_{v,env}}{T_{v,env}} \right) dz$$

Általánosan a „CAPE” egy légtömeg lokális felhajtóerejének az integrálja a magasság mentén a szabad konvekció szintje ( $z_f$ ) és az egyensúlyi szint ( $z_n$ ) között.  $T_{v,parcel}$  a specifikus légtömeg virtuális hőmérséklete,  $T_{v,env}$  pedig a környezet virtuális hőmérséklete,  $g$  a gravitációs gyorsulás. A „CAPE” értékét rendszerint Joule/kg-ban fejezik ki, de megadható  $m^2/s^2$ -ban is, mert ez a két mértékegység ekvivalens egymással. Az aktuális feláramlás sebességét, tehát a „CAPE” értékének négyzetgyöke szabja meg, ami egy termodinamikai diagramon szemléltetve az a terület, amelyet a szondázás révén meghatározott hőmérsékleti profil ( $T$ ) és a nedves adiabata ( $\theta_w$ ) határol, amit a felszínközeli levegő hőmérséklete és nedvesség-tartalma határoz meg. A nedves potenciális hőmérséklet  $1^\circ C$ -nyi változása közelítőleg 1000 J/kg különbségnek felel meg. A villámlásra vonatkozó skála-összefüggések szerint, a villámszám egy zivatarcellában a feláramlási sebesség negyedik(ötödik) hatványával változik a felhő magasságától, méretétől függően (Boccippio, 2010).

A zivatarfelhő belsejében, ahol a víz három fázisa is jelen van (vízgőz, víz, jég), bonyolult ütközési és töltésképződési folyamatok mennek végbe a heves fel- és le-áramlásokban.

Jégkristályok, hókristályok ütköznek egymással, túlhűlt víz fagy rájuk és hódara képződik. A hódara részecskék növekedését érzékenyen befolyásolja a feláramlás sebessége, miközben ezek a részecskék lebegnek a zivatar feláramában. Az ütközésenkénti töltés-szeparáció nem-lineárisan növekszik az ütközési sebességgel, amikor jégdara ütközik jégkristályokkal, Ez a nem-lineáris viselkedés csupán empirikusan ismert jelenleg (E. Williams, privát kommunikáció). Végül az ellentétes előjelű töltéseket tartalmazó térrészek között egy kritikus potenciálkülönbség elérésekor elektromos kisülés, azaz villám következik be.

#### Irodalom

Bencze Pál, Major György, Mészáros Ernő (1982) Fizikai Meteorológia, Akadémiai Kiadó, Budapest

Boccippio D, (2010) Lightning Scaling Relations Revisited, Journal of the Atmospheric Sciences, Vol. 59, 1086-1104.

Geresdi István (2004) Felhőfizika, Dialóg Campus Kiadó, Budapest-Pécs


4. A 11-éves napciklus vizsgálata során volt-e összehasonlító vizsgálat az SR adatok és a Napról készített felvételek között (pl. Yohkoh szonda röntgen spektrumban készült képei), amelyen a ciklus intenzitása jól nyomon követhető (pl. 7.2.2 ábra); vagy elegendőnek bizonyult az SR adatok és a röntgen fluxus összehasonlítása.

Az SR-adatokat nem vetettük össze a Napról röntgen spektrumban készült képekkel. A 7.2. fejezet, amely a Föld-ionoszféra üregrezonátor 11-éves napciklussal történő változását tárgyalja, valójában a következő logika szerint épült fel. Három távoli Schumann-rezonancia mérései szerint, mind az SR frekvenciák, mind a jósági tényezők maximumot mutattak a naptevékenységi maximum időszakában és minimumot a naptevékenységi minimumkor, függetlenül az állomás helyétől, a térkomponenstől és a módus számtól. Ez a viselkedés egyértelműen a Föld-ionoszféra üregrezonátor elhangolódására jellemző, és a felső határoló régióban történt változásokkal függ össze. Az ionoszférikus vezetőképesség csökkenése/növekedése értelemszerűen a hullámvezetőben terjedő hullám fázissebességének csökkenéséhez/növekedéséhez vezet, s ennek következtében a frekvencia néhány tízed Hz-et csökken/nő. A megfigyelt frekvenciaváltozás alapján és a modellszámítás szerint is, egy olyan ionizáló forrást kellett találni, amely legalább két nagyságrendű ionizáció-változást, és a rekombináció következtében egy nagyságrendű (tízszerez) vezetőképesség-változást képes okozni a 11-éves napciklus során a Föld-ionoszféra üreg felső karakterisztikus rétegében. Ezt a feltételt a szoláris kemény röntgensugárzás fluxusának napciklussal történő kb. két nagyságrendű változása teljesíti a 90-100 km magasságban okozott két nagyságrendű ionizáció-változással (Popoff et al., 1964). A szoláris kemény röntgen fluxusnak az említett mértékű, napciklussal történő változását a GOES műholdak adataival demonstráltuk a vizsgált időszakban (7.2.4. ábra).

Megjegyzés: A fentiekben (3.) azokat az irodalmi hivatkozásokat adtam meg részletesen, amelyek nem szerepelnek a dolgozatban.

Még egyszer köszönetemet fejezem ki Szegő Károly opponensnek gondolatébresztő kérdéseit, a dolgozatomban bemutatott eredmények értékelését.

Sopron, 2013. március 5.



Satori Gabriella