

Monitoring Global Lightning and the Lower Ionosphere with Schumann Resonances

Doktori értekezés tézisei

Bozóki Tamás



Témavezetők:

Dr. Sători Gabriella

Kutató Professor Emeritus, Földfizikai és Űrtudományi
Kutatóintézet (ELKH FI)

Prof. Dr. Szabó Gábor

Professzor, Optikai és Kvantumelektronikai Tanszék, Szegedi
Tudományegyetem

Szegedi Tudományegyetem

Természettudományi és Informatikai Kar
Fizikai Doktori Iskola

Szeged

2022

Bevezetés és célkitűzések

A Schumann-rezonanciák (SR-ák) a Föld–ionoszféra üregrezonátor globális elektromágneses (EM) rezonanciái (Schumann, 1952, Price, 2016). A villámok által kisugárzott EM hullámok az extrém alacsony frekvenciasáv (ELF sáv; 3 Hz – 3 kHz) legalsó részén (<100 Hz) nagyon kis csillapítással (~0.5 dB/Mm) terjednek a Föld felszíne és az alsó ionoszféra által alkotott hullámvezetőben, és többször is körbekerülik a Földet mielőtt, energiájuk nagy részét elveszítenék. Ezeknek az ellentétes irányban terjedő (direkt és antipodális) hullámoknak a konstruktív interferenciája hozza létre a SR-ákat, melyek körülbelül 8, 14, 20 stb. Hz-en figyelhetőek meg. A globális villámtevékenység, amely másodpercenként hozzávetőlegesen 30–100 villámlást jelent, folyamatosan fenntartja ezt az EM rezonanciateret. A SR-ák a globális villámtevékenység és az alsó ionoszféra állapotában bekövetkező nagyléptékű változások vizsgálatának hatékony eszközeként ismertek (Nickolaenko és Hayakawa, 2014). Általánosabban fogalmazva a SR-ák a Föld éghajlatának és az úridőjárásnak a tanulmányozására szolgáló kutatási eszköznek tekinthetőek.

Talán ez a két terület a két legfontosabb és legnagyobb szakmai érdeklődésre számot tartó kutatási irány a SR-ákhoz kapcsolódóan. Fontos kiemelni, hogy a két kutatási irány semmiképpen sem tekinthető függetlennek, mivel a hozzájuk kapcsolódó hatások (más további hatásokkal együtt) együttesen jelennek meg a SR-adatokban. Ahhoz, hogy megalapozott eredményeket kapjunk a globális villámtevékenységről, meg kell győződnünk a Föld–ionoszféra üregrezonátor stabilitásáról a vizsgált időszakban (vagy ki kell tudnunk küszöbölni az úridőjáráshoz

köthető hatásokat). Ahhoz pedig, hogy következtetni tudjunk az alsó ionoszféra állapotában bekövetkező változásokra, ismernünk kell a villámtevékenységgel kapcsolatos változásokat a SR-idősorokban.

A SR-kutatás egyik régóta kitűzött célja a globális villámtevékenység intenzitásának és térbeli eloszlásának meghatározása (invertálása) SR-mérések alapján. A múltban számos próbálkozás történt ezen a területen, de a kifejlesztett módszerek nem jutottak el az alkalmazásig, például nem került sor konkrét tudományos kérdések invertált villámeloszlások alapján történő vizsgálatára, vagy kvázi valós idejű adatszolgáltatásra. Bár jelentős nemzetközi érdeklődés mutatkozik a globális villámtevékenység klimatológiai célú vizsgálata iránt, ezt jelenleg erősen korlátozza a rendelkezésre álló villámmegfigyelési technológiák detektálási hatékonysága (Williams és Mareev, 2014). Egy geofizikai inverzió alapvetően két részből áll össze: az előremodellezésből (forward modell) és az inverziós algoritmusból. Jelen esetben a forward modell meghatározza a globális villámtevékenység egy adott eloszlásából várható SR-ákat, míg az inverziós algoritmus iterációs lépéseken keresztül meghatározza azt a globális villámeloszlást, ami a tényleges mérésekhez legközelebb álló SR-spektrumokat eredményezi. A globális villámtevékenység SR-alapú megfigyelésének egyik fő erőssége, hogy nem szenved a detektálási hatékonyság problémájától, mivel a villámok által kisugárzott ELF hullámok rendkívül gyenge csillapítása miatt minden függőleges kiterjedéssel rendelkező villám hozzájárul a globális rezonanciaterhez (Williams és Mareev, 2014). Ez a tény kiválóan alkalmazhatóvá teszi a módszert klimatológiai célú vizsgálatokban. A Föld néhány távoli pontján található SR-mérés alapján az inverziós algoritmus meghatározza a villámtevékenység C^2km^2/s egységben mért eloszlását, amely a globális éghajlatot jellemző új paraméternek

tekinthető. Továbbá hangsúlyozni kell, hogy ez a megközelítés a villámtevékenység intenzitását egy abszolút fizikai mennyiségben adja meg, amelyet nem torzít az egyéb műholdas- és földfelszíni villám megfigyelési módszerekre jellemző mesterséges eseményszelekció.

Doktori munkám egyik fő célkitűzése egy új SR-inverziós modell fejlesztése volt, ennek a folyamatnak a fontosabb mérföldköveit ismertetem az értekezés első részében. Az értekezés második része két különálló tanulmányt mutat be. Az első tanulmány az El Niño–Déli Oszcillációhoz (El Niño–Southern Oscillation, ENSO) kapcsolódó eredményekkel demonstrálja, hogy a SR-ák az inverzió nélkül is hatékony eszközt jelentenek a globális villámtevékenység vizsgálatára. A második tanulmány azt mutatja be, hogy a SR-mérések hogyan használhatóak fel az alsó ionoszféra tulajdonságaiban bekövetkező, úridőjárással kapcsolatos változások kimutatására.

Alkalmazott módszerek és a munkamegosztás

A SR-inverzió fejlesztése elsősorban egy elméleti munka volt, amiben a különböző lépések implementálásán és tesztelésén volt a fő hangsúly. A modellfejlesztés matematikai kidolgozását és a modellek implementálását Dr. Prácser Ernő (ELKH FI) végezte, az értekezés szerzője pedig a közös gondolkodáson és tervezésen túl elsősorban a modellek validálásában (például szintetikus tesztek tervezésében és kiértékelésében), valamint a jelenség fizikai hátterének megértésében vállalt jelentősebb szerepet. A Dr. Prácser Ernő által fortran-ban implementált, homogén üregrezonátorra vonatkozó SR-modell alapján a szerző elkészítette a program python-ban írt változatát, melyet szabadon hozzáférhetővé tett a tudományos közösség számára. A SR-inverzió bemeneteként

szolgáltató valós mérési adatok előkészítése (előfeldolgozása) is a szerző feladatai közé tartozott, az ezzel kapcsolatos előzetes eredmények azonban publikált kimenet hiányában nem kerültek bele a doktori értekezésbe.

A bemutatott két tanulmány több állomáson mért SR-adatok, valamint független villámmegfigyelési- és egyéb geofizikai adatrendszerek feldolgozásán és együttes értelmezésén alapul. Az adatfeldolgozás a szerző feladata volt, az eredmények értelmezését pedig Dr. Sántori Gabriellával (ELKH FI, témavezető) és Earle Williams professzorral (MIT, USA) együtt végeztük.

A doktori értekezés tézisei

1) A schupy nyílt forráskódú python csomag

Az értekezésben Bozóki et al. (2019) alapján bemutatom az általam implementált schupy nyílt forráskódú python csomagot és annak első függvényét a `forward_tdte`-t, amely lehetővé teszi megadott villámforrások által generált SR-ák szimulálását, és visszaadja az elméleti elektromos és mágneses tereket egy tetszőleges földrajzi helyen. A `forward_tdte` függvény a veszteséges, homogén üregrezonátort leíró analitikus megoldást tartalmazza, és képes pont-, valamint kiterjedt források szimulálására. A schupy elérhető a pip csomagkezelő rendszeren és a projekt Github oldalán keresztül. Bemutatom három kisebb esettanulmányt, amelyekben a `schupy.forward_tdte` függvény segítségével az elméleti spektrumok konvergenciáját, antipodális források spektrumait, valamint egy kiterjedt forrás spektrumát vizsgáltam. Ezek az esettanulmányok bizonyítják a schupy hasznosságát SR-val kapcsolatos tudományos kérdések vizsgálatában.

2) Analitikus és numerikus SR-modellek összehasonlítása

Prácsér et al. (2021) alapján bemutatok három numerikus tesztet a kétdimenziós táviró egyenletet (TDTE) analitikus és numerikus megoldásainak összehasonlítására. Mindkét megközelítés esetében várható némi pontatlanság, és ez különösen igaz az inhomogén esetre, amikor a Föld–ionoszféra üregrezonátor nappali-éjszakai aszimmetriáját is figyelembe vesszük. Ennek ellenére a vizsgálatok kiváló egyezést mutatnak az analitikus és a numerikus modellek által szolgáltatott eredmények között (az inhomogén esetben is). Ez az egyezés egy erős validációja mindkét modellnek. Mivel a két megoldás teljesen független, az eredmény nemcsak a formalizmusok, hanem az implementációk (a kódolás) helyességét is igazolja.

3) A globális villámtevékenység vizsgálata ENSO-időskálán

Williams et al. (2021) alapján bemutatom, hogy a SR-intenzitás több állomáson történő megfigyelése hasonló viselkedést mutat a kontinentális léptékű villámtevékenység alakulásában az 1997/98-as és a 2015/16-os szuper El Niño események során. Ez az első olyan tudományos munka az ENSO időskálán, amely dokumentálta az El Niño epizódokat megelőző átmeneti időszak jelentőségét a villámtevékenység szempontjából. A két szuper El Niño eseményt megelőző átmeneti hónapokban a SR-intenzitás jelentős (néhány tíztől néhány száz százalékig terjedő) megnövekedést mutatott 1997-ben Nagycenken az elektromos-, és Rhode Island-en (USA) a mágneses térkomponensben, csakúgy, mint 2014–2015-ben Hornsundon (Svalbard), Eskdalemuirban (Egyesült Királyság), Boulder Creekben (Kalifornia, USA) és Albertában (Kanada) a mágneses térkomponensben. A SR-intenzitás anomáliáinak világszerte mutatózó eloszlása alapján kimutatom,

hogy 1997-ben a villámtevékenység főként Délkelet-Ázsiában és Indiában, azaz az ázsiai zivatarrégióban nőtt meg. Ugyanakkor a villámtevékenység globális változását jelezték 2014-ben és 2015-ben a SR-intenzitás anomáliái. Megállapítom, hogy a SR-intenzitás adatok tükrözik a két szuper El Niño esemény kialakulása közötti fontos különbségeket is. Az átmeneti időszakra jellemző SR-intenzitás növekedés egy 2-3 hónapos időszakra koncentrálódik az 1997/98-as szuper El Niño eseménynél. Ugyanakkor a 2015/16-os esemény két részletben épült fel, és ezzel összhangban két átmeneti időszak azonosítható a SR-intenzitás adatokban. A SR-alapú eredményeket megerősítem az Optical Transient Detector (OTD) és a World Wide Lightning Location Network (WWLLN) független villámfigyeléseivel való összehasonlítással, amelyek szintén fokozott villámtevékenységet mutatnak az átmeneti hónapokban. Az átmeneti időszak során megnövekedett villámlás a felszín és a középtroposzféra közötti termodinamikai egyensúly hiánya miatt megnövekedett instabilitásnak tulajdonítható. A kutatás fő következtetése az, hogy a SR intenzitásának változása előrejelzője lehet e szélsőséges éghajlati események előfordulásának és nagyságának, és a korábbi eredményekkel összhangban a globális felszíni levegőhőmérséklet maximumait is előrejelezheti.

4) A Föld–ionoszféra üregrezonátor vizsgálata napciklus-időskálán

Bozóki et al. (2021) alapján elemzem a Föld–ionoszféra üregrezonátor tulajdonságaiban napciklus-időskálán bekövetkező változásokat. A kutatás célja annak az elméletnek a megerősítése volt, hogy a SR intenzitásának napciklus-időskálán történő modulációját (melyet eredetileg csak magas szélességű állomásokon mutattak ki), a Föld–ionoszféra üregrezonátor kiszóródó

elektronokhoz kapcsolódó helyi deformációja (csökkenő magassága) okozza. Ennek érdekében az első mágneses SR-módus intenzitásának nyolc távoli állomáson mért hosszútávú idősorait kiszóródó, közepes energiájú elektronok fluxusával és független mérésekben azonosított energetikus elektronkiszóródási (EEK) eseményekkel hasonlítom össze. Bár az eredmények megerősítik az EEK-hoz kapcsolódó deformáció szerepét, ugyanakkor az EEK önmagában nem magyarázza az összes SR-alapú megfigyelést. Arra a következtetésre jutok, hogy a Nap röntgensugárzásának és az EEK-nak az együttes hatását kell figyelembe venni a megfigyelések értelmezéséhez. Négy különböző tényezőt azonosítok, amelyek fontos szerepet játszanak a hosszútávú SR-intenzitás idősorok alakításában: 1) az üreg röntgensugárzással összefüggő deformációja, 2) az üreg jósági tényezőjének röntgensugárzással összefüggő változása, 3) az üreg EEK-al összefüggő deformációja és 4) az üreg jósági tényezőjének EEK-al összefüggő változása. Az üreg helyi deformációja (magasságváltozása) várhatóan lokálisan befolyásolja a SR-intenzitást a deformált terület(ek) alatt, míg a jósági tényező változása várhatóan globálisan megfigyelhető változásokat okoz a SR-intenzitásban. Dokumentálok egyedi EEK-eseményekhez kapcsolódó SR-intenzitás és jósági tényező növekedéseket napi időskálán, és kimutatom, hogy bizonyos EEP-események hatása jól azonosítható mind a déli-, mind az északi féltekén (éjszakai és nappali oldalon), különböző hosszúsági szektorokból származó SR-intenzitás adatokban, és a SR-intenzitás EEK-hoz kapcsolódó relatív növekedése elérheti az 50-100%-ot is. Bemutatom az éves SR-intenzitásváltozás nagyságának napciklus-időskálán jelentkező modulációját, és erőfeszítéseket teszek az EEK-hoz kapcsolódó ionoszférikus magasságváltozások számszerűsítésére. A Föld-ionoszféra hullámvezető effektív magasságának a DEMETER műhold méréseiből származtatott értékei független képet nyújtanak a

Föld–ionoszféra üreg hosszútávú deformációjáról. Megmutatom, hogy az üreg legnagyobb magassága közepes (geomágneses) szélességen található, míg a hullámvezető alacsony és magas (geomágneses) szélességen alacsonyabb, ami egybevág azzal az általános következtetéssel, hogy a Föld–ionoszféra üreget alacsonyabb szélességen a Nap röntgensugárzása, míg magasabb szélességen az EEK deformálja. Azt is kimutatom, hogy a hullámvezető effektív magassága napciklus-időskálán minden (geomágneses) szélességen változik, és ez a hatás erősebb magas (geomágneses) szélességen, ahol a kiszóródó elektronok a mágneses erővonalak mentén belépnek a felsőléggörbe. Az eredmények alapján a SR-mérések alkalmasak lehetnek EEK-hoz kapcsolódó változások nyomonkövetésére az alsó ionoszférában.

Doktori értekezéshez kapcsolódó publikációk

Prácsér, E., **Bozóki, T.**, Sátori, G., Williams, E., Guha, A., and Yu, H. (2019): Reconstruction of Global Lightning Activity Based on Schumann Resonance Measurements: Model Description and Synthetic Tests. *Radio Science*, 54, 3, 254-267. <https://doi.org/10.1029/2018RS006772>

Bozóki, T., Prácsér, E., Sátori, G., Dálya, G., Kapás, K., and Takátsy, J. (2019): Modeling Schumann resonances with schupy. *Journal of Atmospheric and Solar-Terrestrial Physics*, 196. <https://doi.org/10.1016/j.jastp.2019.105144>

Bór, J., Sátori, G., Barta, V., Szabóné-André, K., Szendrői, J., Wesztergom, V., **Bozóki, T.**, Buzás, A., and Koroncay, D. (2020): Measurements of atmospheric electricity in the Széchenyi István Geophysical Observatory, Hungary. *History of Geo- and Space Sciences*, 11, 1, 53-70. <https://doi.org/10.5194/hgss-11-53-2020>

Prácser, E., **Bozóki, T.**, Sátori, G., Takátsy, J., Williams, E., and Guha, A. (2021): Two Approaches for Modeling ELF Wave Propagation in the Earth-Ionosphere Cavity with Day-Night Asymmetry. *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 69, 7. <https://doi.org/10.1109/TAP.2020.3044669>

Williams, E., **Bozóki, T.**, Sátori, G., Price, C., Steinbach, P., Guha, A., et al. (2021): Evolution of Global Lightning in the Transition from Cold to Warm Phase Preceding Two Super El Niño Events. *Journal of Geophysical Research: Atmospheres*, 126, 3. <https://doi.org/10.1029/2020JD033526>

Bozóki, T., Sátori, G., Williams, E., Mironova, I., Steinbach, P., Bland E.C., et al. (2021): Solar Cycle-Modulated Deformation of the Earth–Ionosphere Cavity. *Frontiers in Earth Science*, 9. <https://doi.org/10.3389/feart.2021.689127>

Doktori értekezéshez kapcsolódó konferencia kivonatok

Bozoki, T., Pracser, E., Satori, G., Williams, E., Guha, A., Yu, H., et al. (2019): Reconstruction of global lightning activity based on multi-station Schumann Resonance measurements. *EGU General Assembly 2019*, 7-12 April 2019, Vienna, Austria. *Geophysical Research Abstracts*, Vol. 21, Abstract No. EGU2019-4172, oral

Prácser, E., **Bozóki, T.**, Sátori, G., Bór, J., Williams, E., Liu, Y., et al. (2019): Inferring Global Lightning Activity based on Multi-station Schumann Resonance Measurements – The Nelson-Pracser Approach. *27th International Union of Geodesy and Geophysics (IUGG) General Assembly*, 8-18 July 2019, Montreal, Canada. *Symposium JA04b Global Electrodynamics and Energetics of Atmospheric Regions from Ground to Space (IAGA, IAMAS)*, Abstract: IUGG19-3094, invited oral

Bozóki, T., Sători, G., Steinbach, P., Bór, J., Pető, T., Williams, E., and Mironova, I. (2020): The applicability of the lowest part of the ELF frequency range (<100 Hz) for remote sensing of the atmosphere-ionosphere-magnetosphere system. VERSIM 2020 Virtual Meeting, 16-20 November 2020, online, poster (online)

Bozoki, T., Satori, G., Pracser, E., Bor, J., Szabone Andre, K., Rodriguez-Camacho, J., et al. (2020): Schupy: a python package for modeling and analyzing Schumann resonances. EGU General Assembly 2020, 4-8 May 2020, online, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu2020-4872>, display

Bozóki, T., Pracser, E., Sători, G., Kulak, A., Mlynarczyk, J., and Williams, E. (2021): Modeling ELF waves in the non-uniform Earth-ionosphere cavity. EGU General Assembly 2021, 19-30 April 2021, online, <https://doi.org/10.5194/egusphere-egu21-3973>, vPICO (online)

Bozóki, T., Pracser, E., Sători, G., Bór, J., Williams, E., Liu, Y., et al. (2021): Charge moment change-based characterization of global lightning activity via the inversion of Schumann resonance measurements. IAGA-IASPEI 2021 Joint Scientific Assembly, 21-27 August 2021, online, Abstract No: 344, oral (online)

Bozóki, T., Sători, G., Williams, E., Mironova, I., Steinbach, P., Bland, E., et al. (2021): Long-term changes in the Earth-ionosphere cavity caused by solar X-rays and energetic electron precipitation. IAGA-IASPEI 2021 Joint Scientific Assembly, 21-27 August 2021, online, Abstract No: 343, oral (online)

Bozóki, T., Sători, G., Williams, E., Mironova, I., Steinbach, P., Bland, E., et al. (2021): Energetic Electron Precipitation-related Changes in the Earth-Ionosphere Cavity as Indicated by Schumann Resonance Measurements. AGU Fall Meeting, 13-17 December 2021, New Orleans, USA. Paper SM25C-2026, poster (online)

Hivatkozások

Nickolaenko, A. P., and Hayakawa, M. (2014): Schumann Resonance for Tyros. Japan: Springer. Retrieved from <https://doi.org/10.1007/978-4-431-54358-9>

Price, C. (2016): ELF electromagnetic waves from lightning: The Schumann resonances. Atmosphere, 7(9). <https://doi.org/10.3390/atmos7090116>

Schumann, W. O. (1952): Über die strahlungslosen Eigenschwingungen einer leitenden Kugel, die von einer Luftschicht und einer Ionosphärenhülle umgeben ist. Zeitschrift und Naturforschung, 7(2), 149–154. <https://doi.org/10.1515/zna-1952-0202>

Williams, E. R., and Mareev, E. A. (2014): Recent progress on the global electrical circuit. Atmospheric Research, 135–136, 208–227. <https://doi.org/10.1016/j.atmosres.2013.05.015>