

## Automatikus kiértékelő program ionogramok értelmezéséhez

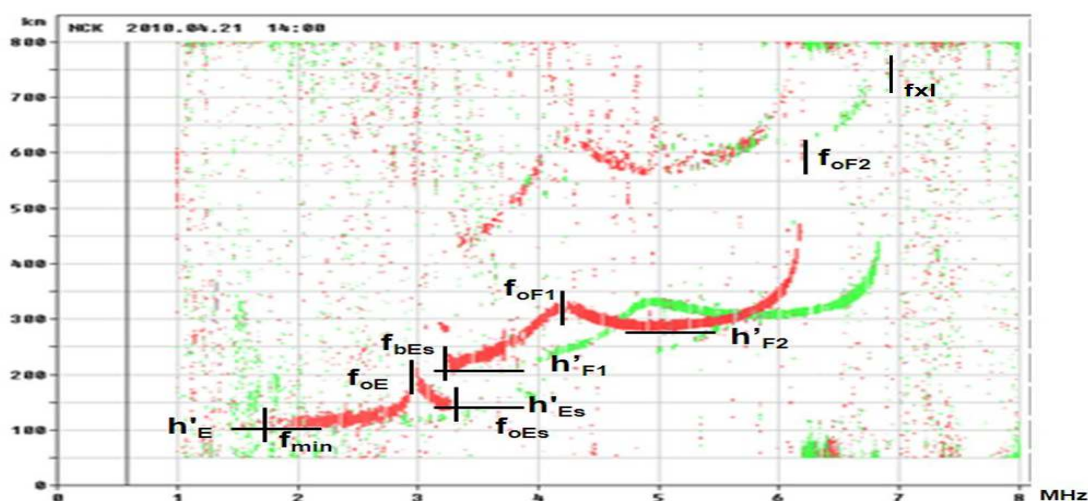
Kalmár János  
MTA CSFK GGI  
kalmar@ggki.hu

**ÖSSZEFOGLALÓ.** Az ionoszondák (speciális radarok) előállította ionogramok adnak tájékoztatást az ionoszféra aktuális állapotáról és szerkezetéről [4], melyből a rádióhullámok terjedési sajátosságaira és az üridőjárásra (pl. napkitörések) következtethetünk. A tanulmány bemutatja az ionogramok automatikus kiértékelését végző, a szerző által írt programot.

**ABSTRACT.** Ionograms produced by ionosondes (special radars) provide information on the instantaneous state and structure [4] of the ionosphere. This information can be used to infer radio propagation characteristics and effects of space weather events (eg. Solar flares) on the Earth's upper atmosphere. This study introduces a software developed by the author for automatic processing of ionogram.

### 1. Bevezetés.

Az ionogramokat ionoszondák állítják elő: széles frekvenciasávon (1-16 MHz) rádiójelekkel 'bombázzák' az ionoszférát, és (mint a radar) mérik az ionoszféra réteghatárokon visszavert jelek által megtett utat, vagyis a visszaverő felület magasságát. A mérés eredménye lényegében zajos digitális képként (1. ábra) jelenik meg, melynek értelmezése még gyakorlott kiértékelőnek sem egyszerű feladat.



1. ábra. Ionogram a meghatározandó pozíciókkal és értékekkel

A kiértékelés célja az ionoszféra rétegek és jellemző pontjaik azonosítása (digitalizálása). A manuális digitalizálás szubjektív hibákkal terhelt. A kiértékelés minőségét és sebességét jelentősen befolyásolja a kiértékelő személy tapasztalata és gyakorlata. Pontatlansága mellett jelentős élőerőt köt le, és kapacitás hiányában intézetünkben jelentős számú ionogram vár még kiértékelésre, ezért indokoltnak látszott a folyamat felgyorsítása automatizálás révén.

## 2. Az ionogram kiértékelés jelene

A humán ionogram feldolgozás betanítással kezdődik, mert a valós ionoszféra rétegek ( $E$ ,  $E_s$ ,  $F_1$ ,  $F_2$ ) ordinary (piros pontok az 1. ábrán) visszhangja mellett az extraordinary (vízszintesen eltolt zöld) és a másodlagos (függőlegesen eltolt, többszörös visszaverődésű) reflexiós rétegek is megjelenhetnek a képen. Egy réteg képe az ionogramon vonalszerű folt, mely foltok akár összeecsúszhatnak, illetve szét is szakadhatnak, ami tovább nehezíti azonosításukat. A rétegek kialakulása függ a mérés időpontjától is, ezért csak abban lehetünk biztosak, hogy a legfelső,  $F_2$  réteg biztosan előfordul, ezért az  $f_{0F2}$  határfrekvencia minden ionogramon megtalálható. Tudjuk továbbá, hogy 80 km alatti és 500 km feletti réteg nem fordulhat elő – tehát ami ott van, csak zaj lehet.

A kiértékelés automatizálásának igénye már korábban felmerült, pl. az Artist programot [2] amerikai kutatók (Massachusetts University) fejlesztik több mint 25 éve, közvetlen elődje az UMLCAR SAO-X DIDBase [1] program volt. Olasz kutatók fejlesztik az Autoscala programot [3]. Mindkét program 95%-os valószínűséggel határozza meg az ionogram jellegzetes pontjait legfeljebb 0,25-0,75 MHz és 25-75 km hibával [6], ami az elméleti felbontás 10-100 szorosa! Alkalmasak viszont többféle ionoszonda regisztrátumának elemzésére.

## 3. Az ionogram kiértékelés jövője

Az automatizált, számítógéppel támogatott ionogram feldolgozás előnyei:

- Gyorsabb, pontosabb, kevesebb élőerőt igényel,
- Egyszerűsíti az utófeldolgozást és a 'hátralék' feldolgozását,
- Lehetővé teszi a sűrűbb mintavételezést (ez jelenleg a GGI-ben fél óra),
- Feldolgozás után az ionogram tömörebben, függvényekkel tárolható,
- Valós időben képes automatikusan elemezni az ionoszonda adatokat, ezért riasztásra is alkalmas pl. úrvihar esetén [5].

## 4. Az ionogram kiértékelés matematikai modellje

Az ionogram modellünkben egy raszteres digitális kép, eszerint kezeljük és elemezzük. Egyidejűleg az ionogramnak csak egyik színét vizsgáljuk (elsősorban az ordinary komponenst), ezért az ionogramot fekete-fehér digitális képnek tekintjük. A nem vizsgált színeket (és később az elkülönített zajt is) a háttérszínnel helyettesítjük. Egy átlagos ionogramon a színes pixelek száma többszáz ezer, ezért elemzése időigényes. A zajos digitális képen a klaszteranalízis összevonás és felosztás módszereivel keressük meg a releváns ionoszonda visszhangokat, ahol egy klaszter (osztály) a kép azon része, mely az ionoszféra adott réteghatárához tartozó visszhangokat tartalmazza - ez a gyakorlatban egy vonalszerű foltja a képnek.

## 5. Az ionogram kiértékelés algoritmusa

Folt a kép azon összefüggő része, melynek bármely két pontja összeköthető azonos színű, szomszédokon átvezető úttal (foltkeresés rekurzív algoritmussal) – ebben az értelemben egy ionogram még több ezer foltot tartalmaz!

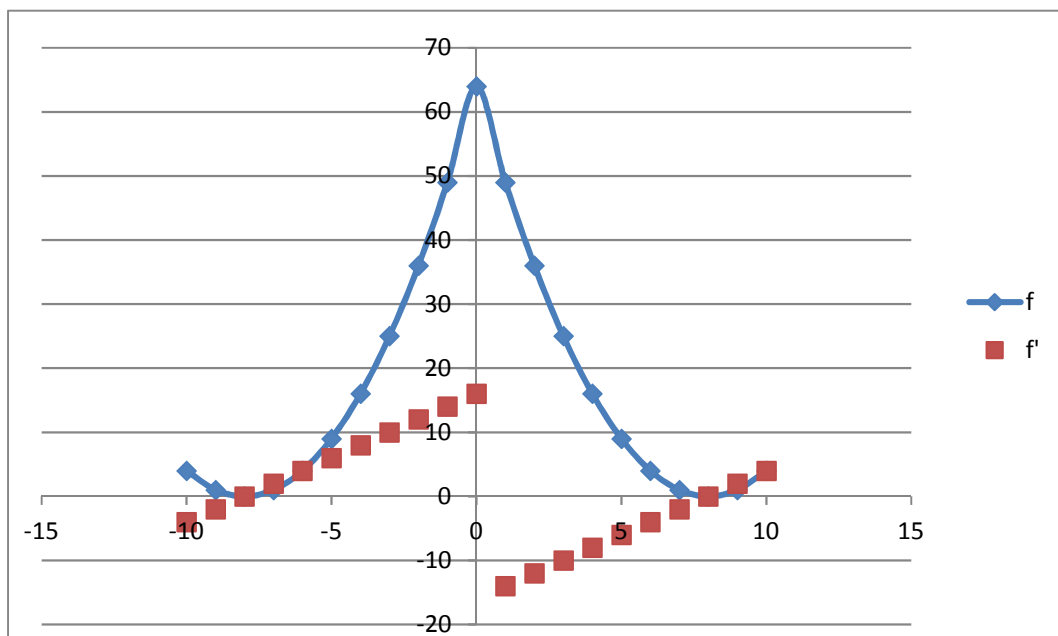
Vonjuk össze azon foltokat (ugyanis mérési hiba is okozhatja az elkülönülést), melyeknek a legközelebbi szomszéd elv szerinti L1 norma távolsága adott korlát alatti (default 4 pixel) – így küszöböljük ki az ionogram szakadási pontjait.

Az összevonások után ellenőrizzük a foltokat: ha egy folt pixeleinek száma adott korlát (default 160) alatti (vagyis túl kicsinek tűnik), akkor a foltot zajnak tekintjük és töröljük – ezután már csak kb. tucatnyi foltot kell megvizsgálni.

Akkor tekintünk egy foltot egy ionoszféra réteg visszhangjának, ha rá úgy illeszthető parabola, hogy az illesztés átlagos hibája (a szórás) kisebb egy előre adott (default 10 pixel) paraméternél, vagyis a folt vonalszerű.

Tehát csak a sokelemű, vonalszerű foltokat tekintjük az ionogram részének, és a foltot az alsó burkolójára illesztett függvény (parabola vagy hiperbola) paramétereivel tárolom az érvényességi frekvencia-határokkal együtt.

Ha a folt ugyan kiterjedt volt, de a parabolaillesztés mégsem sikerült (4. ábra), megvizsgáljuk az okát: lehet, hogy a különböző ionoszféra rétegekhez tartozó visszhangok összeecsúsztak, ami onnan ismerhető fel, hogy bár a folt váza folytonos görbének látszik, de a csatlakozási pontban töréspontja van (2. ábra). Ekkor a törésponttól balra eső pontokra illesztett egyenes meredeksége jelentősen eltér a jobbra található pontokra illesztett egyenes meredekségétől, más szóval a töréspontban a bal és jobboldali differenciahányadosok jelentősen különböznek.

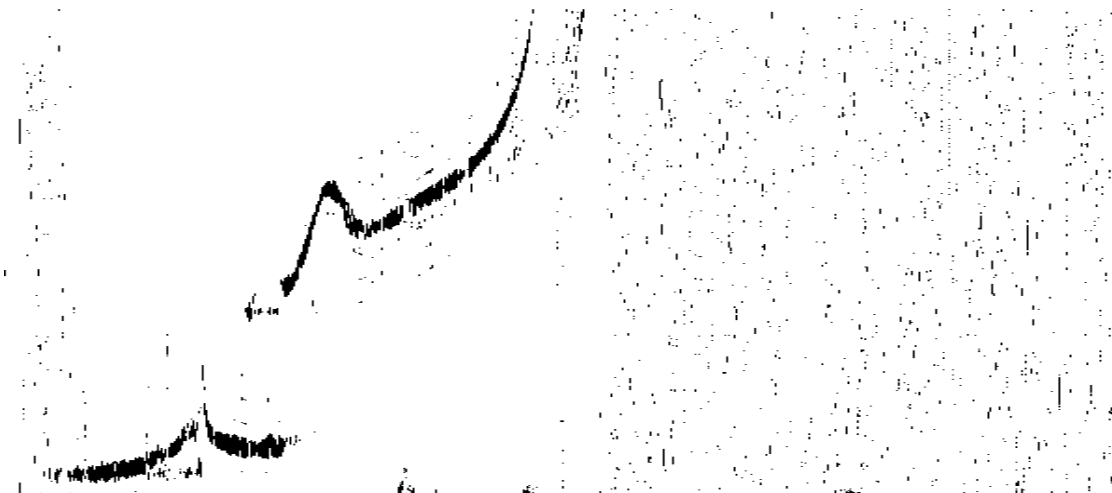


2. ábra. Metsző parabolák és deriváltjaik viselkedése a töréspontban

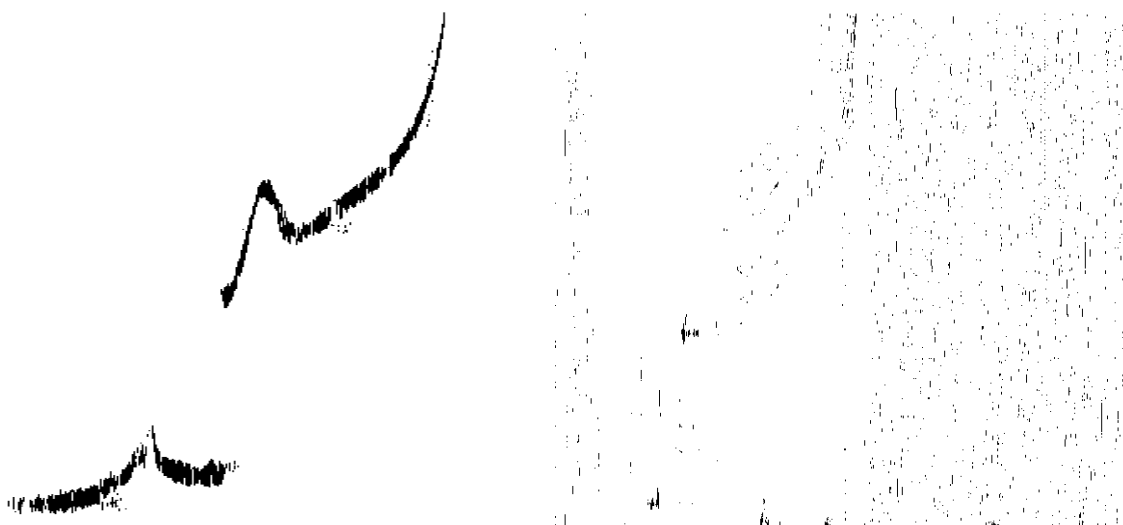
A klaszter vágási frekvenciáját úgy keressük meg, hogy a folt minden frekvenciájához meghatározzuk a differencia-hányadosok bal- és jobboldali határértékét; ahol a különbségüknek maximuma van, és ennek mértéke 2-nél nagyobb, ott a foltot kettévágjuk, a

részfoltokat új klaszternek tekintjük (5. és 6. ábra), és visszalépünk a foltok nagyságának ellenőrzésére.

Ha nem sikerült a parabolaillesztés és szakadási pontot sem találtunk az előző pont szerint, akkor a foltot (klasztet) nagyságától függetlenül zajnak nyilvánítjuk, és töröljük.



3. ábra. Egy alul (80 km-ig) és felül (500 km felett) törölt ordinary ionogram



4. ábra. A 3. ábra ionogramjának releváns foltjai (balra) és a zaj (túl kicsi, vagy nem vonalszerű foltok) a jobb oldalon



5. ábra. A szétválasztott E és Es ionoszféra rétegek visszhangja az illesztett görbékkel



6. ábra. A szétválasztott F<sub>1</sub> és F<sub>2</sub> ionoszféra rétegek visszhangja az illesztett görbékkel

| min kHz                  | magasság | max kHz                  | magasság | b <sub>0</sub> | b <sub>1</sub> | b <sub>2</sub> |
|--------------------------|----------|--------------------------|----------|----------------|----------------|----------------|
| 1575(f <sub>min</sub> )  | 100,2 km | 3625 (f <sub>0E</sub> )  | 127,7 km | 266,1          | -0,1284        | 2,8e-05        |
| 3650 (f <sub>0E</sub> )  | 143,6 km | 5000 (f <sub>0Es</sub> ) | 129,5 km | 1623,6         | -0,6685        | 7,6e-05        |
| 4750 (f <sub>bEs</sub> ) | 250,7 km | 5375 (f <sub>0F1</sub> ) | 351,0 km | 5555,4         | -2, 26         | 2,4e-04        |
| 5375 (f <sub>0F1</sub> ) | 329,9 km | 8075 (f <sub>0F2</sub> ) | 447,4 km | 2696,1         | -0,5828        | 4,8e-05        |

1. táblázat. Az ionoszféra rétegek visszhangjára illesztett  $h(fr) = b_0 + b_1 \cdot fr + b_2 \cdot fr^2$  parabolák

| min kHz                  | magasság | max kHz                  | magasság | a      | b       | c    |
|--------------------------|----------|--------------------------|----------|--------|---------|------|
| 1575(f <sub>min</sub> )  | 89,97 km | 3625 (f <sub>0E</sub> )  | 139,1 km | 112,16 | -17906  | 3869 |
| 3650 (f <sub>0E</sub> )  | 151,7 km | 5000 (f <sub>0Es</sub> ) | 114,5 km | 149,28 | 4972    | 3556 |
| 4750 (f <sub>bEs</sub> ) | 245,7 km | 5375 (f <sub>0F1</sub> ) | 348,5 km | 76,07  | -446144 | 6523 |
| 5375 (f <sub>0F1</sub> ) | 308,4 km | 8075 (f <sub>0F2</sub> ) | 471,7 km | 369,15 | -135436 | 8596 |

2. táblázat. Az ionoszféra rétegek visszhangjára illesztett  $h(fr) = a + b/(fr - c)$  hiperbolák

## 6. A program továbbfejlesztésének lehetséges irányai

A program egyelőre külön kezeli az ionogram ordinary (piros) és extraordinary (zöld) görbéit – mivel egyik a másiktól eltolással állítható elő, ezért a hiányos ordinary görbék extraordinary párjuk ismerete alapján kiegészíthetők; sajnos, a szakirodalom szerint olyan mérési hiba is előfordulhat, amikor az ordinary és extraordinary görbék teljesen felcserélődnek

Az ionogram görbék függőleges aszimptotáinak ( $f_{0E}$ ,  $f_{bEs}$ ,  $f_{0F1}$ ,  $f_{0F2}$ ) meghatározását hiperbola-illesztéssel próbáltuk pontosítani. Sajnos a hiperbolaillesztés pontossága egyrészt nem érte el a parabola-illesztés pontosságát, másrészt sokkal időigényesebb volt, és az aszimptoták pozícióját (a 2. táblázat c paramétere) durvábban adta vissza, mint a leolvasott intervallum-korlátok. A még ajánlott tangensfüggvény illesztést nem sikerült elfogadható hibával kivitelezni, a szokásos ionogram görbékre a függvény rosszul illeszthető.

A másodlagos (reflexió) visszhangok - ha vannak - görbéit törölni kell, mert érdektelenek.

A feldolgozás után kapott paraméteres görbéket egy szakértői (mesterséges intelligencia) rendszer elemezhetné tovább az ionoszféra rétegek azonosítása és a jellegzetes pontok meghatározása végett, melynek a szakirodalom szerint a mérés földrajzi helyét és időpontját (évszak, napszak) is figyelembe kell vennie.

## 7. Összefoglalás

Az ionogramok automatikus kiértékelését végző új program nagyon jó hatásfokkal képes elkülöníteni a zajt a releváns információtól, helyesen választja szét az ionoszféra rétegek visszhangját, és az ionogram releváns görbéit parabolaként tárolva lehetővé teszi azoknak egy későbbi, szakértői rendszer bázisú azonosítását.

## Irodalomjegyzék

- [1] **Fox, M.W.** and **Blundell, C.**, 1989. Automatic scaling of digital ionograms. Radio Science, 24, 747-761. <http://dx.doi.org/10.1029/RS024i006p00747>
- [2] **Galkin, I.A.**, **Reinisch, B. W.**, Grinstein, G. Khmyrov, G. Kozlov, A. Huang, X. and Fung, S. 2004. Automated Exploration of the Radio Plasma Imager Data, J. Geophys. Res., 109, A12210, <http://dx.doi.org/10.1029/2004JA010439>
- [3] **Scotto, C.** and **Pezzopane, M.**, 17-24 August 2002. A software for automatic scaling of foF2 and MUF(3000)F2 from ionograms, Proceedings of URSI 2002, Maastricht.
- [4] **Reinisch, B.W.** and **Huang, X.**, 2001. Deducing topside profiles and total electron content from bottomside ionograms, Advances in Space Research, 27, 1, 23-30. [http://dx.doi.org/10.1016/S0273-1177\(00\)00136-8](http://dx.doi.org/10.1016/S0273-1177(00)00136-8)
- [5] **Reinisch, B. W.**, **Huang, X.**, **Galkin, I. A.**, **Paznukhov, V.** and **Kozlov, A.**, 2005. Recent advances in real-time analysis of ionograms and ionospheric drift measurements with digisondes, J. Atmos. and Solar-Terr. Phys., 67, 1054-1062. <http://dx.doi.org/10.1016/j.jastp.2005.01.009>
- [6] **Stankov, S.M.**, **Jodogne, J.C.**, **Kutiev, I.**, **Stegen, K.**, **Warnant, R.**, 2012. Evaluation of automatic ionogram scaling for use in real-time ionospheric profile specification, Annals of Geophysics, 55, 2, 283-291. <http://dx.doi.org/10.4401/ag-4976>