

A rádiós meteorészlelés hullámterjedési alapjai

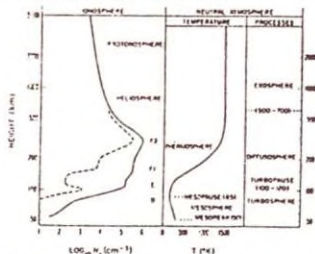
Az utóbbi időben a rádiós meteorészlelés polgárjogot nyert a hazai meteorosok körében is. Ezt egyre több lelkes amatőr kitartó és nem kis türelmet igénylő munkája és eredményei bizonyítják. A módszer előnyei közismertek: szinte bármikor végezhető az észlelés, időjárástól, a Hold és a Nap állásától függetlenül, és megbízhatóbb, összefüggőbb adatsorok nyerhetők vele a meteoraktivitásról. Mind több gyakorlati tapasztalat gyűlik össze erről a témáról, emelve a munka színvonalát. Gyakorlati fogások mellett azonban bizonyára sokakat érdekel a rádiós meteorozás elméleti háttere is. Ebben a cikkben a meteorvisszhangok kialakulásának körülményeiről, jellemzőikről, illetve a rádióvisszaverődések megfigyelhetőségét befolyásoló tényezőkről lesz szó. Mint az köztudott, a meteorok észlelésére az ultrarövidhullámú (néhány méter hullámhosszúságú) rádiósáv használatos. Hogy ennek okát meg tudjuk, vizsgáljuk meg az ionoszférát, a felsőlégkörnek azt a rétegét, amely a rádióhullámok terjedését döntően meghatározza, és ahol a meteorjelenségek lejátszódnak.

Az ionosféra felépítése és hatása

Ionoszférának a légkör kb. 50 km magasság feletti tartományát nevezzük. Itt a légkör sűrűsége már rendkívül kicsi. Ez teszi lehetővé, hogy a kívülről érkező kozmikus eredetű részecskék ill. sugárzások a légkör részecskéit gerjesszék, így azok ionokra és elektronokra esnek szét. Ezáltal a réteg elektromos vezetővé válik. Mivel sűrűsége és anyagi összetétele különböző magasságokban eltérő, így az elektronsűrűség (a térfogategységenkénti szabad elektronok száma) is változó (1. ábra).

Kialakulnak bizonyos rétegek (D, E, F), ahol nagyobb az ionizált részecskék aránya. Ezek bizonyos rádióhullámokat áteresztenek, másokat elnyelnek vagy tükröként visszavernek. Az egyes rétegek magassága és erőssége évszakonként és napszakonként változik, ennek oka a Nap hatása, ugyanis az ionizáció legfőbb forrása a napsugárzás. A Nap mellett azonban a kozmikus sugarak és a meteorok is szerepet játszanak. A meteorok hatása kettős: egyrészt a rendkívül sok mikrometeor egy nagyjából állandó ionizációt okoz, másrészt a kevesebb, de nagyobb meteor szakaszos, rövid ideig tartó, de erős hatást kelt — ez az, ami megfelelő módszerrel észlelhető.

A hullámterjedés szempontjából az ionosféra rétegei közül a 90–120 km magasságban elhelyezkedő E-réteg a legfontosabb. Elsősorban ez teszi lehetővé, hogy a hullámok röla ill. a földfelszínről többszörösen visszaverődve több tízezer km-t is megtegyenek, sőt akár többször is meg tudják kerülni a Földet. Mivel a napsugárzás döntően befolyásolja ennek a tartománynak a visszaverő képességét (az ionizálás miatt szabaddá vált töltéshordozók elektromosan vezetővé teszik a réteget, így képes a megfelelő frekvenciájú elektromágneses hullámok visszaverésére, akár egy fémlap), a terjedési viszonyok nappal és éjszaka erősen eltérőek. Ezt mindenki tapasztalhatta már, aki rövid- és középhullámú rádióadásokat

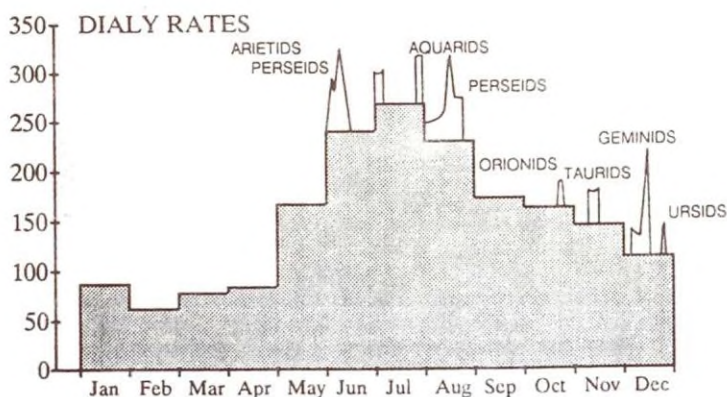


1. ábra. Az elektronsűrűség és a hőmérséklet változása az ionoszférában a magasság függvényében

1. ábra. Az elektronsűrűség és a hőmérséklet változása az ionoszférában a magasság függvényében

hallgatott. A tükrözőképesség nemcsak napszakonként változik, de más és más az év különböző szakaszaiban, és függ a naptevékenységtől is. Némileg eltérően, de a nagyobb hullámhosszúságú rádiósugárzást is befolyásolja az ionoszférának ezen viselkedése. A néhány méternél rövidebb hullámhosszúságú ultrarövid hullámok azonban normális esetben áthaladnak az ionoszféra rétegein. Csak különleges esetben verődnek onnan vissza, de bennünket pont ezek az esetek érdekelnek. A reflexiók többnyire az E-rétegben történnek és a következő okai lehetnek:

- rendellenességek az ionoszférában (pl. a napflerek hatására kialakuló ionoszférikus viharok ill. kisebb egyenletlenségek a nap-sugárzás miatt),
- sarki fény (szintén naptevékenység-függő),
- meteorbecsapódás (mint tudjuk, a meteorok kb. 80–100 km magasságban fékeződnek le, és veszítik el energiájukat — ez az E-rétegbe esik),
- E-sporadikus ionizáció.



2. ábra. A meteorjelek napi és éves eloszlása rádiómérések alapján.

Az iménti áttekintésből láthatjuk, hogy miért épp az ultrarövid hullámok alkalmasak rádiós meteormegfigyelésre: normális körülmények között ezek hatótávolsága kicsi (kb. 100 km), ha mégis messzebbre terjednek, akkor nagy a valószínűsége, hogy ezt meteorvisszaverődés okozta.

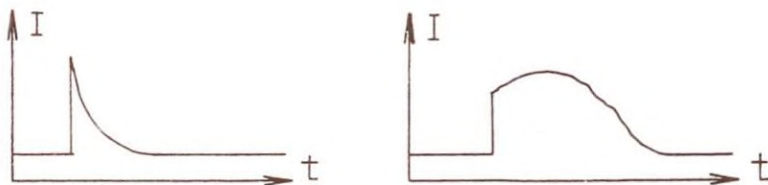
A meteorvisszhangok kialakulása, tulajdonságai

A legelső megfigyelések arról, hogy a meteorok képesek a felsőlégréteget ionizálni, 1943-ból származnak. Amerikában próbáltak távoli URH-adásokat venni, és felfigyeltek rá, hogy rövid — másodperces — időtartamokra ez sikerült, még 2200 km-es távolságból is. Ezeknek a "rádióbeütéseknek" a gyakorisága jó egyezést mutatott a meteorok számának napszakonkénti változásával, a reggel 6 óra körüli maximummal ill. az esti minimummal. A későbbi megfigyelések a meteorrajokkal való korrelációt is kimutatták (2. ábra).

Ezután az 50-es és 60-as években alaposan tanulmányozták a témát, és elég sok adat gyűlt össze. A munka célja elsősorban a távközlési alkalmazás volt. Valóban létrejöttek olyan rendszerek, ahol ezeket a rövid ideig tartó meteorbeütéseket használják nagy távolságú URH-átvitel céljára — szakaszos üzemben. A meteorvisszhangok jelentős része a sporadikus meteorokról szár-

mazik, hiszen ezek száma sokkal nagyobb, mint a rajtagoké. Így az összegyűlt adatok nagyrésze a sporadikusokra vonatkozik, bár sokmindent alkalmazható a rajmeteorokra is. A megfigyelések és az elmélet szerint a sporadikus meteorok sűrűsége fordított arányban áll tömegükkel, vagyis kb. tízszer annyi 1 grammos van, mint 10 grammos, ez az arány a kisebb méretekre is fennáll. A rajmeteorok tömegeloszlása is hasonló a sporadikusokéhoz, azzal az eltéréssel, hogy a nagyobb tömegűek aránya magasabb. Megfigyelésük szempontjából ez kedvező.

Az atmoszférába belépő meteor lefékeződik, és energiáját átadja a légkör részecskéinek, ionizálva azokat. A meteor nyom mentén így egy elektromosan vezető térrész alakul ki, amely eleinte csaknem vonalszerű — egy fémhuzalhoz hasonlítható —, ez képes a megfelelő szögben érkező rádióhullámok visszaverésére. Miután a meteor elhaladt, megszűnik az ionizáló hatás, és a részecskék hőmozgása valamint a rekombináció (az atomok újraegyesülése) folytán a nyom szélesedik, az elektronsűrűség pedig csökken. Ez a csökkenés exponenciális, ugyanígy cseng le a visszavert rádiójel erőssége is. A meteorvisszhangokat időbeli lefolyásuk szerint két csoportba, kis és nagy sűrűségű meteornyomokról történő reflexiókra oszthatjuk. Az előbbi esetben a pályamenti elektronsűrűség kicsi, és a jelenség úgy fogható fel, mintha a rádióhullám különálló elektronokról verődne vissza. A vett jel hirtelen éri el a maximumát, majd exponenciálisan csökken — viszonylag gyorsan. Ha a meteor elég nagy, akkor az ionizáció által létrejött elektronsűrűség olyan mérvű, hogy a meteorpálya egy fémhengernek fogható fel, ilyenkor az elektronok egymás közötti kölcsönhatását is figyelembe kell vennünk. Ebben az esetben a visszavert jel a kezdeti felfutás után nem kezd azonnal csökkenni, alakja bonyolultabb, a visszhang hosszabb ideig — néhány másodpercig — tart (3. ábra).



3. ábra. A visszavert jel erősségének változása kis- és nagysűrűségű meteornyomról.

A két csoport közt a számszerű határ a kb. 10^{14} elektron/méter sűrűségnél húzódik. Mivel a rajtagok között a nagyobb tömegűek aránya magasabb, ezért ezek gyakrabban hoznak létre nagy sűrűségű nyomokat. Az erről visszavert viszonylag erős jelek könnyebben megfigyelhetők amatőr berendezésekkel. A nagyobb részét apró sporadikus meteorok okozta gyengébb reflexiókat viszont a híradástechnikai rendszerek használják, mert ezek csaknem folyamatosan keletkeznek.

A visszavert jelek amplitúdóeloszlására a következő megfontolások tehetőek. Kis sűrűségű esetben a maximális amplitúdó az elektronsűrűséggel, vagyis a tömeggel arányos. Miután az időegység alatt megfigyelhető meteorok száma és tömege közt fordított arányosság áll fenn, az A csúcsamplitúdónál erősebb visszhangok N száma időegységenként: $N \sim A^{-1}$. Nagy sűrűségű nyomokra₄ az amplitúdó az elektronsűrűség negyedik gyökétől függ, ebből: $N \sim A^4$. Ezekből az összefüggésekből megállapítható, hogy ha a vevőkészülék érzékenysége egy bizonyos értéknél rosszabb, akkor az észlelhető meteorok száma rohamosan csökken. A valóságosan észlelhető meteorok száma még rengeteg tényezőtől függ, de ezeket nem érdemes részletezni, mert az amatőr rá-

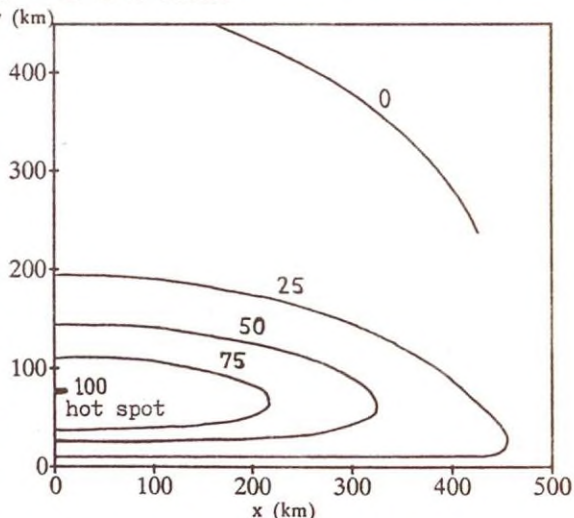
diós meteorozás során véletlenül kiválasztott rádióadók jeleit fogjuk, így számos paraméter előre nem ismert. Néhány fontos gyakorlati szempontról azonban még szó lesz.

Érdeemes röviden megemlíteni a megfigyelhető meteornyomok geometriai eloszlásának kérdését. Ha egy rögzített adó- és vevőpontot vizsgálunk a Föld felszínén, a vevőoldalon észlelhető meteorok száma csak néhány százaléka az adott területre becsapódó összes — mérete miatt elvileg még észlelhető — meteoroknak. A visszaverődéshez ugyanis teljesülnie kell bizonyos geometriai feltételeknek.

Egy érdekes geometriai következmény: azt gondolhatnánk, hogy rögzített helyű adó és vevő esetén a legtöbb rádióvisszhang a két pontot összekötő gömbi főkörív felezőpontja körüli meteorokról érkezik. A valóságban azonban egy ilyen reflexióhoz vízszintes meteorpálya szükséges, ami igen ritka. A legtöbb visszhangot okozó meteornyom ténylegesen nem a főkör mentén — vagyis a vevőtől nézve az adó irányában —, hanem attól oldalra eső térrészben van. Sporadikus, tehát a térben viszonylag egyenletesen szétosztott radiánsú meteorokra mutat egy visszhang-gyakorisági eloszlást a 4. ábra a térbeli helyzet függvényében. Minden egyes rajra meg lehetne elvileg szerkeszteni egy ilyen görbét, mivel a radiánsok iránya más és más. Ebből következik, hogy az egyes rajok rádiós megfigyelhetősége nemcsak az aktivitástól és a részecskék tömegétől, hanem a radiáns helyzetétől is függ. Továbbá a mi esetünkben nemcsak egy, hanem több adó jelét vehetjük, amelyek azonos frekvenciával sugároznak. Azt a térrészt, ahonnan a legnagyobb valószínűséggel kapható meteorvisszhang, a szakirodalomban "forró pontnak" nevezik (hot spot) — l. a 4. ábrát.

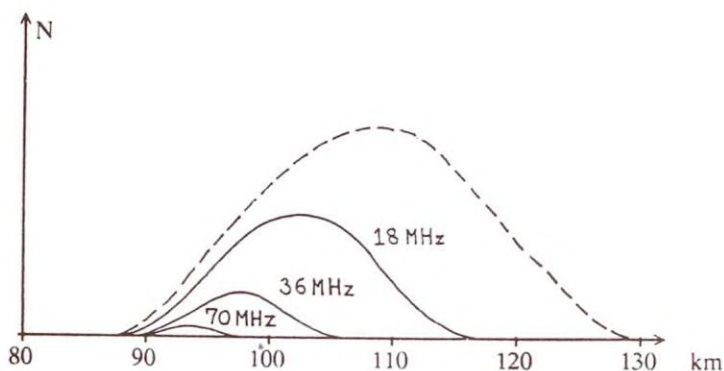
Nemcsak az észlelhető meteor-^v (km) nyomok vízszintes eloszlására, de a magasságtól való függésükre is végeztek méréseket az 50-es, 60-as években. Ezek azt mutatják, hogy a megfigyelhető nyomok átlagos magassága és száma a használt frekvencia növelésével csökken. Az 5. ábra görbéi a várható meteorvisszhangok számát mutatják néhány frekvenciára. Megállapítható, hogy a nagyobb frekvenciákon csupán egyre kisebb magasságokig lehet "ellátani" — átlagosan egyre alacsonyabb meteorok észlelhetők. Az amatőr megfigyelések számára számításba jövő 70—100 MHz-es sávban ez az átlagos magasság 90—100 km között van.

A térbeli meteorstatisztikák után vessünk egy pillantást a meteorok időbeli eloszlására! Ha eltekintünk a rajoktól, és csak a sporadikus meteorokat tekintjük, láthatjuk, hogy az aktivitás az év folyamán korántsem egyenletes: februárban a legkisebb, és júliusban van maximuma.



4. ábra. A meteorvisszhangok relatív gyakorisága a hely függvényében sporadikus meteorok esetében. A vízszintes tengely az adót és a vevőt összekötő gömbi főkör, a függőleges az ettől mért távolság. Az origó az összekötő félkörív felezőpontja, a teljes függvény mindkét tengelyre szimmetrikus

Ez 4—5-szöröse is lehet a minimumbelinek. Ha hosszú időszak megfigyeléssorozatából akarunk rajaktivitást számolni, akkor számításba kell vennünk ezt a sporadikusok által okozott "háttérzajt" is, amihez a rajtagok száma hozzáadódik. Egy rádiós mérések alapján készített éves meteoraktivitás-görbét mutat a 2. ábra. A függőleges tengelyen azon meteoroknak egy nap alatt mért száma látható, amelyek $2,75 \times 10^{14}$ elektron/m sűrűségű nyomot hoztak létre — ez kb. 3,5 vizuális magnitúdóval egyenértékű. A sporadikusok átlagszintje mellett a nagyobb rajok is fel vannak tüntetve. Ismét hangsúlyozni kell azonban, hogy a rajtag/sporadikus arány a vevőkészülék érzékenységtől is függ, mert a rajtagok közt viszonylag több a nagyobb tömegű, így könnyebben detektálható meteor, mint a sporadikusoknál.



5. ábra. A meteorvisszhangok magasság szerinti eloszlása különböző frekvenciákon mérve. A szaggatott vonal a meteorpályák becsült valószínű eloszlását jelzi.

A teljesség kedvéért meg kell még említeni, hogy az ionoszférában nem csak a meteor nyomok okozhatják a rádióhullámok szóródását ill. visszaverődését, hanem a főként napsugárzás hatására kialakuló egyenletlenségek ill. az ún. E-sporadikus ionizáció. Ennél a jelenségnél az ionoszféra E-rétegének bizonyos tartományai hosszabb időre (néhány óra) spontán ionizálódnak, így visszaverővé válnak. A jelenség oka még nem teljesen ismert, valószínűleg közrejátszanak benne olyan folyamatok, mint a naptevékenység, a villámlás és a mikrometeoritok. Ilyenkor bizonyos rádióadások tartósan jó vételi lehetőségei miatt ez a jelenség megkülönböztethető egy meteor nyomról való reflexiótól. Hosszú idejű megfigyelések szerint a légköri ionizációnak napal kb. a felét, éjszaka csaknem az egészét okozzák a meteorok.

SPÁNYI PÉTER

(Az 1988. június 4-i pécsi MMTÉH-találkozón elhangzott előadás anyaga.)

A felhasznált ábrák és adatok forrásai:

Kenneth Davies: Ionospheric Radio Propagation
(National Bureau of Standards — 1965)

P.A. Mathews: Radio Wave Propagations VHF and above
(Chapman and Hall — 1965)

Communication by Meteor-Burst Propagation (CCIR Report — 1986)