

3.16. Hullámterjedés

3.16.1. A Föld légköre és rétegei

Az elektromágneses hullámok terjedésében nagy szerepet játszik a Föld légköre.

A légkör alsó, kb. 11 km. magasságig terjedő szakasza a *troposzféra*. Az időjárási jelenségek jellemzően ebben a rétegben zajlódhatnak le.

A 11...80 km. magasságban található réteg a *sztratoszféra*.

A 80 km. magasság feletti réteg neve **ionoszféra**, melynek a rádióhullámok terjedésében nagy szerepe van. Nevét onnan kapta, hogy az itt található gázokat a Nap sugárzása erősen ionizálja: a semleges gázmolekulák atomjaiból elektronokat taszít ki, így pozitív töltésű ionokat és szabad elektronokat hoz létre. E szabad elektronok egy semleges molekulával negatív iont alkotnak, vagy egy pozitív ionnal találkozva rekombinálnak. A töltött részecskék nagy koncentrációjának következtében az ionoszféra egyes rétegei elektromosan vezetővé válnak, és (egy frekvenciatartományban) az elektromágneses hullámokat képesek visszaverni, reflektálni.

Az ionoszférát magát is több, különböző tulajdonságú rétegre osztják fel:

- az ionoszféra legalsó rétege a **D réteg**, mely 40...80 km. magasságban nap közben alakul ki, majd az éjszaka folyamán eltűnik. Ez a réteg inkább elnyeli, csillapítja az elektromágneses hullámokat.
- 100...160 km. magasságban található az **E réteg**, amely napfelkelte előtt keletkezik, és részben éjszaka is fennmarad. Az E rétegben inkább alacsonyabb frekvenciákon már létrejön visszaverődés, egyes esetekben pedig rövid ideig igen magas frekvenciákat is reflektál (sporadikus E-terjedés).
- 180...400 km. magasságban alakul ki az **F réteg**, amely nappal az alsó F₁ és felső F₂ rétegre hasad. Éjjel az alsó réteg teljesen rekombinálódik. A rövidhullámú jelek visszaverése szempontjából főleg az F rétegnek van jelentősége.

Napfoltok, naptevékenység

Az ionoszféra állapotát - és így a rádióhullámok terjedését, visszaverődéseit, csillapítását - erősen befolyásolja a Nap aktivitása, leginkább a napfoltok (a Nap 6000-7000 °C felületi hőmérsékletéhez képest több száz, esetleg ezer °C-al kisebb hőmérsékletű, nagy kiterjedésű területek) képződése. A napfoltok számának növekedésekor a Nap az átlagosnál nagyobb mértékben bocsát ki különféle hullámhosszúságú sugárzásokat, melyek növelik az ionoszféra ionkoncentrációját és így hullámvisszaverő képességét, ezzel javítva a rövidhullámú összeköttetések lehetőségeit.

A napfoltok száma a tapasztalatok szerint 7...17 év közötti ciklusokban változik. A napfoltok nem egyenletesen oszlanak meg a Nap felületén, ezért gyakran tapasztalható, hogy a Nap saját tengelye körüli, kb. 27,5 napos forgási ciklusa szerint változnak a terjedési viszonyok.

A naptevékenységet folyamatosan mérik, és jellegét különböző mérőszámokkal jellemzik:

- I vagy **SFI** (Solar Flux Index) a napfluxus, 2800 MHz-en ($\lambda = 10,7$ cm) rádióvevővel mérik. SFI értéke 60 és 300 közé esik, a rövidhullámú rádióösszeköttetések szempontjából a magasabb érték a kedvező.
- **K** a Föld mágneses terének aktivitását jelző, logaritmikus jellegű mérőszám, melyet 3 óránkénti mérések eredményeként határoznak meg. Értéke 0 és 9 között lehet. A magasabb érték ($K > 4$), illetve K növekedése erős változásokra utal, ami a rádióösszeköttetések szempontjából kedvezőtlen (pl. nő az ionoszféra rétegeinek csillapítása, csökken a MUF (ld. alább)).
- **A** az utolsó 24 óra (8 db.) K mérései eredményeinek linearizált átlagából képzett mérőszám, értéke 0...400 közé esik (K és A összefüggése:

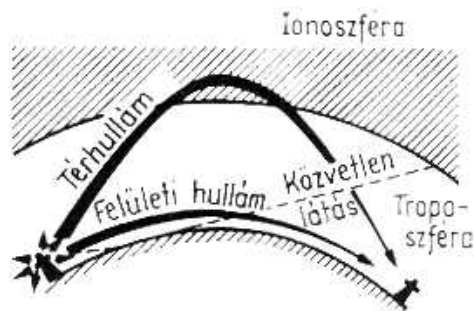
K	0	1	2	3	4	5	6	7	8	9
A	0	3	7	15	27	48	80	140	240	400

- **R** a relatív napfoltszám: a napfoltok számát, méretét, stb. összegző mérőszám. Napfolt minimum idején 0, maximumkor 200 feletti érték is lehet.

Számítógépes programokkal a fenti mérőszámok alapján meghatározhatók adott frekvenciákon az összeköttetések lehetőségei.

3.16.2. Felületi és térhullámok, kritikus frekvencia, MUF, LUF

A föld felszínén felállított adóantennától a vevőantennáig az elektromágneses hullámok három úton juthatnak el: az optikaihoz hasonló *közvetlen terjedés*, a troposzférán át a földfelszín mentén terjedő *felületi hullámok*, valamint az ionoszférán visszaverődő *térhullámok* útján. (1. ábra)



1. ábra

Az ultrarövid hullámok általában *közvetlen terjedéssel* jutnak az adótól a vevőantennáig. Az áthidalható távolságot az antennák magassága, és a köztük lévő tereptárgyak csillapítása befolyásolja.

A *felületi hullámok* a Föld görbületét követve, fokozatosan csillapodva terjednek. Az alacsonyabb frekvenciájú (közép és különösen a hosszú hullámú) adókkal nagy távolság hidalható át (az adó hatótávolsága főként teljesítményétől függ). A magasabb frekvenciájú hullámok azonban jobban csillapodnak, ezért csak kisebb távolságra terjednek (rövidhullámon, amatőr adóval a 80 m-es sávban kb. 100 km, a 10 m-es sávban már csak kb. 15 km. távolság hidalható át felületi hullámokkal).

A *térhullámok* teszik lehetővé a rövidhullámok nagy távolságú terjedését. Az ionoszférába érkező elektromágneses hullámok terjedési iránya megtörik és - ha a feltételek ehhez megfelelőek – a hullámok a Föld felé visszaverődnek.

A visszaverődéshez szükséges, hogy a visszaverő rétegnek elég nagy legyen az ionkoncentrációja. A tapasztalat szerint

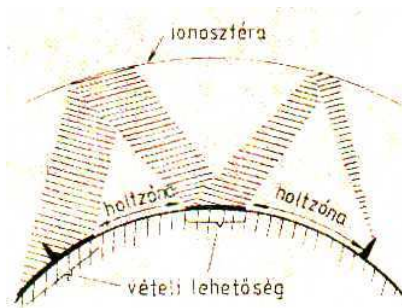
- minél nagyobb az üzemi frekvencia, annál nagyobb ionkoncentráció szükséges a visszaverődéshez,
- minél „laposabban” lépnek be az elektromágneses hullámok az ionoszférába, annál könnyebben verődnek vissza (ezért alkalmasak a DX munkára a lapos kisugárzási szögű antennák).

Az ionoszféra állapotától függő, ún. **kritikus frekvencia** (f_{kr}) felett az ionoszférát merőlegesen elérő hullámok már nem verődnek vissza. Szokásos értéke nyáron 4...9 MHz, télen 3...14 MHz.

Ha a hullámok nem merőlegesen érkeznek az ionoszférába, az a maximális frekvencia, amelynél a visszaverődés még létrejön (**MUF = Maximal Usable Frequency**) az ionoszféra állapotától és a kisugárzási szögtől függően változik. Kis sugárzási szögnél a MUF nagyobb, akár a kritikus frekvencia ötszörösét is elérheti. (Kb. 5 m-nél rövidebb hullámokkal már a leglaposabb kilövési szögnél sem jön létre visszaverődés, az elektromágneses hullámok elhagyják a Föld légkörét. Ez teszi lehetővé, hogy ultrarövidhullámok útján pl. az űrhajókkal rádiókapcsolatot tartsanak fenn.)

A legalacsonyabb használható frekvencia (**LUF = Lowest Usable Frequency**) az alacsony frekvenciás hullámokat elnyelő D réteg állapotától függ.

A 2. ábra mutatja, hogy a kisugárzás helye és a visszaverődött hullámok vételi helye között *holt zóna* alakul ki, ahol az adóállomás jelei nem vehetőek. A reflexió többszörös is lehet: a földre visszaérkezett hullámok ismét reflektálódnak, majd az ionoszférán verődnek vissza, stb., így a jelek viszonylag kis adóteljesítmény mellett is megkerülhetik a Földet. Ez teszi lehetővé, hogy az amatőr állomások térhullámok segítségével a Földön minden távolságot áthidaljanak.



2. ábra

Az ionoszféra magasságának és ionizációs állapotának változása miatt a visszaverődés, és így a holt zóna helye is folyamatosan változik, emiatt a vett jel erőssége is ingadozik. Ezt a jelenséget nevezik *fading*-nak (elhalkulás). A vevőkészülék AGC áramkörének egyik feladata a fading ellensúlyozása.

Az adóantennától a távoli vevőantennáig az elektromágneses hullámok két úton is eljuthatnak: a két állomás közötti rövidebb útvonalon (ezt nevezik SP = Short Path, rövid utas terjedésnek), vagy a Földet megkerülve (ez az LP = Long Path, hosszú utas terjedés). Utóbbi irányt akkor érdemes használni, amikor a kedvezőbb ionoszférikus viszonyok miatt a nagyobb távolság dacára is jobb átvitelt lehet megvalósítani.

3.16.3. Hullámterjedés a rövidhullámú amatőrsávokon

160 m-es amatőrsáv (1,81-2,0 MHz)

A sávon főleg télen és éjszaka létesíthetők nagyobb távolságú összeköttetések. Nappal 80 km. körüli távolság hidalható át. Éjszaka a D réteg megszűntével nem nyeli el a hullámokat, ekkor több száz vagy ezer km-es (ritkán interkontinentális) összeköttetések is elképzelhetők.

80 m-es amatőrsáv (3,5-3,8 MHz)

A D réteg elnyelő hatása miatt nappal az áthidalható távolság csekély, néhány száz km. (Télen nagyobb az áthidalható távolság, mint nyáron.) Napnyugta után a D réteg megszűnik, így nem csillapít, ezért éjszaka a hatótávolság nő, és az F rétegről reflektált térhullámok útján interkontinentális összeköttetések is létesíthetők. Ilyenkor a holt zóna kb. 1000 km. A napfoltok száma a 80 méteres terjedésre alig van hatással. A légköri zavarok e sávban - különösen éjjel - nagy intenzitással jelentkezhetnek.

40 m-es amatőrsáv (7,0-7,1 MHz)

A D réteg a 7 MHz-es jeleket is csillapítja, ezért nappal az áthidalható távolság kb. 1000 km. A holt zóna 100 km körüli. Éjszaka (a D réteg megszűntével) az áthidalható távolság megnő, interkontinentális összeköttetések is létesíthetők. Ilyenkor a holt zóna kb. 1000 km. A sávzaj ebben az amatőrsávban is jelentős.

30 m-es amatőrsáv (10,1-10,15 MHz)

A 30 m-es sáv tulajdonságai átmenetet képeznek a 40m-es és a 20 m-es sávok között. Kedvező terjedési körülmények között mind nappal, mind éjjel nagy távolságú összeköttetések létesíthetők. A sáv csak 50 kHz széles, ezért csak kis sáv szélességű üzemmódokat (CW, RTTY, stb.) használhatunk.

20 m-es amatőrsáv (14,0-14,35 MHz)

Ez a sáv általában éjjel-nappal alkalmas nagy távolságú összeköttetések létesítésére (az éjszakai terjedés csak napfoltminimumkor szűnik meg). A Föld napfényes részén a D réteg időnként erősen csillapítja a hullámokat, ekkor érdemes lehet a sötét oldalon „LP” (hosszú utas) összeköttetés létesítésével próbálkozni. (Természetesen ehhez megfelelő nyereségű, irányított antenna szükséges.) A holt zóna nappal 1000 km (napfoltmaximumkor 400 km) körül van, nyáron néha teljesen eltűnik. Éjszaka a holt zóna kiterjed, a 4000 km-et is elérheti.

17 m-es amatőrsáv (18,068-18,168 MHz)

A sáv tulajdonságai középuton vannak a 20 és a 15 méteres sávokhoz viszonyítva. Kedvező hullámterjedés esetén éjjel-nappal lehetővé teszi a DX összeköttetések létesítését. Így (csupán 100 kHz-es szélessége ellenére) tehermentesítheti a 20m-es amatőrsávot.

15 m-es amatőrsáv (21,0-21,45 MHz)

A terjedési viszonyokat a napfolttevékenység erősen befolyásolja. Napfoltmaximum idején egész nap, viszonylag kis teljesítménnyel is alkalmas nagy távolságú összeköttetések létesítésére. Napfoltminimumkor a sáv inkább a nyári hónapokban, és csak nappal használható; éjszaka a DX összeköttetések valószínűsége nagyon csekély.

Légköri zavarok e sávon alig jelentkeznek.

12m-es amatőrsáv (24,89-24,99 MHz)

Tulajdonságai a 10m-es sávhoz hasonlóak, bár előfordul, hogy 12 m-en akkor is van terjedés, amikor a 10 m-es sáv már nem használható. A terjedési viszonyokra a napfolttevékenység nagy hatással van.

10 m-es amatőrsáv (28,0-29,7 MHz)

Az ultrarövidhullámú tartomány határán elhelyezkedő amatőrsávon a terjedés a napfolttevékenység függvénye. A D réteg elnyelő hatása ezen a frekvencián gyakorlatilag elhanyagolható. Napfoltmaximum idején a nappali órákban kis teljesítménnyel is alkalmas nagy távolságú összeköttetések lebonyolítására, ha a hullámok a Föld napsütötte felén haladnak. A holt zóna kb. 4000 km. Napfoltminimum idején DX összeköttetésekre a sáv alkalmatlan, legfeljebb az E rétegről szórványosan fellépő visszaverődés tesz lehetővé közepes távolságú összeköttetést.

3.16.4. Hullámterjedés a klasszikus URH amatőrsávon

2 m-es amatőrsáv (144,0-146,0 MHz)

Az ultrarövid hullámokon (kivételes esetektől eltekintve) az ionoszférán nem jön létre visszaverődés. Az összeköttetések elsősorban *közvetlen terjedéssel*, az optikai látóhatáron belül jöhetnek létre. Az ilyen összeköttetések igen kis teljesítménnyel, az ionoszféra állapotától és az időjárási viszonyoktól szinte függetlenül létrehozhatók.

A 2 m-es sávban (a levegőnek a magassággal csökkenő törésmutatója következményeként) az áthidalható távolság az optikai látóhatárt kb. 15%-al meghaladja.

E sávban (a fentiek alapján számítható) áthidalható távolság az adó- és vevőantenna magasságától függ:

$$d = 4,13 \cdot (\sqrt{h_1} + \sqrt{h_2})$$

ahol

d az áthidalható távolság (km)

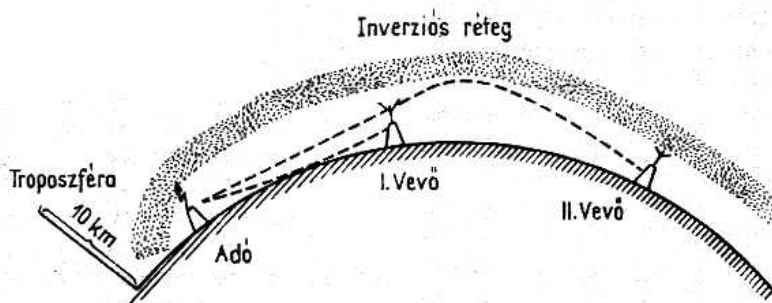
h_1 az adóantenna telepítési magassága (m)

h_2 a vevőantenna telepítési magassága (m)

Nagytávolságú terjedés

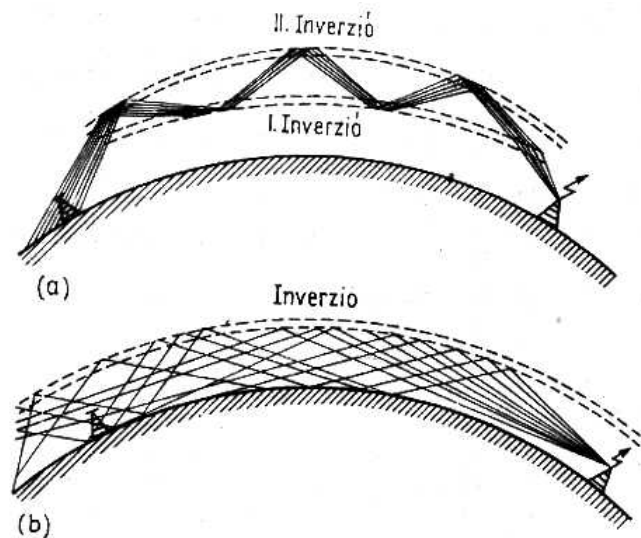
a) Troposzférikus terjedés

A troposzféra hőmérséklete általában a magassággal csökken, de időnként hirtelen hőmérsékletugrások (*inverziók*) is előfordulnak, amelyek a légsűrűség változásával, az pedig a közeg törésmutatójának változásával járnak. Az ultrarövid hullámok a fényhez hasonlóan az inverziórétegbe érve megtörnek, és a Föld felé visszaverődnek (3. ábra).



3. ábra

Előfordulhat, hogy különböző magasságokban több inverziós réteg képződik, és az ultrarövidhullámok e két réteg között addig verődnek oda-vissza, amíg az alsó réteg elvékonyodása helyén a Föld felé ki nem lépnek (troposzférikus hullámvezetési átvitel, ducting, ld. 4.a ábra) Ilyen esetben az adás és a lehetséges vétel helye között nagy holt zóna alakul ki.



4. ábra

A Föld felszíne és egy nagy kiterjedésű inverziós réteg között létrejöhet a 4. b. ábrán bemutatott reflexió is, amikor nincs holt zóna a lehetséges vételi helyek között.

b) *Meteor nyomvonalas összeköttetés*

Egyes meteor áramlatok periódikusan keresztezik a Föld pályáját, és a légkörbe érve elégnek, előtte azonban az atmoszférában ionizált csatornát hoznak létre. A kis nyomású légkörben ez a csatorna rövid idő alatt eloszlik, rövid ideig azonban az ultrarövid hullámok számára visszaverő felületként működhet. Az ilyen összeköttetés néhány másodpercig (sűrű meteorzápor esetén legfeljebb 1-2 percig) tartható fenn.

c) *Visszaverődés az északi fényről (Aurora-összeköttetés)*

A Nap időnként elektromos töltésű részecskefelhőt lövell ki magából, amely nagy sebességgel közeledik a Földhöz, és azt 24-36 óra alatt éri el. A Föld mágneses erőtere ezeket a részecskéket a sarkok felé irányítja, ahol a magasabb légkörbe érve ionizálják azt (és „sarki fény” megjelenését okozzák). Az északi fény megjelenésének körzetében létrejövő ionizációs gócok alkalmasak az ultrarövidhullámok visszaverésére. A diffúz reflexió következtében a jelek erősen torzulnak, ezért csak távíró összeköttetés hozható létre.

d) *Szórt (sporadikus) E-visszaverődés*

Az ionoszféra E rétegében időnként nagy ionizációjú inhomogenitások lépnek fel. E szórt gócokról a 30...100 MHz közötti frekvenciájú elektromágneses hullámok visszaverődhetnek. A hullámok 100-150 km. magasságban reflektálódnak, így az adótól 900...2000 km. távolságban érnek vissza a földfelszínre.

e) *Visszaverődés a Holdról*

Az ionoszférát elhagyó rádióhullámok a Hold felszínéről is visszaverődnek, ennek felhasználásával (megfelelő adóteljesítménnyel, és nagynyereségű, irányított antennával) amatőr rádióösszeköttetés is létesíthető. A Föld-Hold-Föld útvonalat a rádióhullámok közel 5 s alatt képesek megtenni.

3.16.5. További, engedélyezett URH sávok

50,0-52,0 MHz
 432,0-438,0 MHz
 1240-1300 MHz
 2300-2450 MHz
 5650-5850 MHz
 10,00-10,5 GHz
 24,00-24,25 GHz
 47,00-47,2 GHz
 75,5-81,5 GHz
 122,25-123 GHz
 134-141 GHz
 241-250 GHz

3.16.6. Sávzaj

Mint a 3.12.6. pontban említésre került, a vevőantennán akkor is indukálódik (a vizsgált frekvenciasávától függő) feszültség, ha a sávban nem működik adóállomás. Ennek oka az, hogy nem csak adóállomás kelt elektromágneses hullámokat: ilyen hullámok érkezik a kozmoszból (galaktikus zajok), elektromágneses hullámokat keltenek a földi elektromos kisülések (villámlás), valamint a villamos fogyasztók (szikrázó forgó gépek, gépjárművek gyújtása, stb.). Ez a sávzaj.

Az antennán keletkező zajteljesítmény a 3.12.6. pontban ismertetett képlet szerint,

$$P_{ZA} = 4 k T_A B$$

módon határozható meg, ahol

P_{ZA}	az antennából kivehető zajteljesítmény
k	a Boltzmann-állandó
T_A	az antenna (ekvivalens) zajhőmérséklete
B	a zajsáv szélesség

azaz az antennában kivehető zajteljesítményt mint termikus zajt tekintjük, és az antenna T_A ekvivalens zajhőmérsékletével jellemezzük.

3.16.7. Szakaszcsillapítás, jel/zaj viszony, legkisebb adóteljesítmény

Szakaszcsillapítás

A rádiócsatorna az a közeg, amely a rádió adóantenna és vevőantenna között terjedő rádióhullámok fontosabb tulajdonságait meghatározza.

A szakaszcsillapítás, a rádiócsatorna csillapítása, definíciója a következő:

$$a_{sz} = 10 \lg \frac{P_{be}}{P_{ki}} \quad [dB]$$

ahol

P_{be}	az adóantennába betáplált teljesítmény
P_{ki}	a vevőantennából kivehető maximális hatásos teljesítmény

így a vevőantennából kivehető teljesítmény dBW-ban felírva:

$$10 \lg P_{ki} = 10 \lg P_{be} - a_{sz}$$

Jel/zaj viszony

Az összeköttetés jel-zaj (S/N, S = signal, N = noise) viszonya a vevőantennából kivehető hatásos teljesítmény (P_v), és a vevő bemenetére számított zajteljesítmény (P_{zbe}) viszonya:

$$\frac{S}{N} = 10 \lg \frac{P_v}{P_{zbe}} \quad [dB]$$

Legkisebb adóteljesítmény

Az adott jel/zaj viszony mellett üzembiztos rádióösszeköttetés létesítéséhez szükséges legkisebb adóteljesítményt a következő paraméterek határozzák meg:

- a vevő bemenetére a megfelelő vételhez biztosítandó legkisebb jelszint,
- a rádiócsatorna szakaszcsillapítása (amely magába foglalja az adó- és vevőantenna sugárzási tulajdonságait, nyereségét is)
- a tápvonalak csillapítása,
- a csatorna zaja a vételi sávban (sávzaj).