2.9. A földi atmoszféra hatása

Az antenna által létrehozott teljesítménysűrűség két különböző fizikai hatás következtében csökken a hullám atmoszférában történő terjedése közben:

az antenna által a térbe kisugárzott hullám divergál

a terjedést biztosító közeg elnyeli vagy szétszórja a hullámokat, melynek eredete

-az atmoszférikus gázok molekuláris abszorpciója;

-az atmoszférában lévő folyadék vagy szilárd részecskék álta okozott abszorpció vagy szóródás (esőcseppek, hó, jég részecskék).

Ezek a hatások néhány GHz feletti frekvencián kezdenek jelentkezni és hatásuk nagyon gyorsan növekszik a növekvő frekvenciával. Az előzőeken túl az atmoszférában lebegő részecskék az atmoszférán keresztülhaladó hullám polarizációjának megváltozását is okozhatják.

2.9.1. A légköri abszorpció

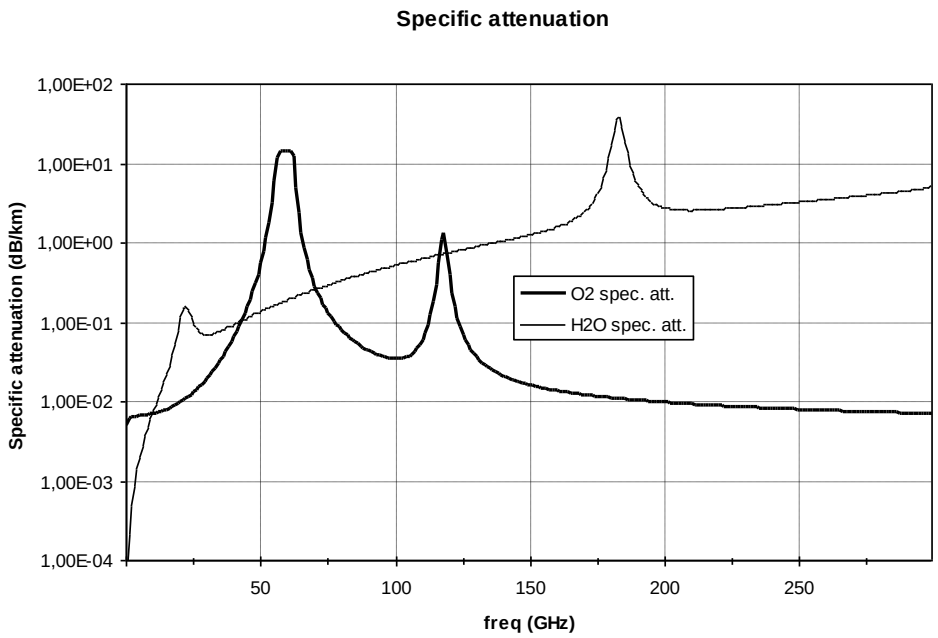
Mivel a nitrogénnek nincsen elnyelési sávja a rádiófrekvenciás tartományban, ezért a molekuláris abszorpciót főképpen az oxigén és vízgőz molekulák elnyelő hatása okozza.

A 350 GHz alatti frekvenciákon az *oxigénnek* egy izolált elnyelési frekvenciavonala van 118,74 GHz-en és nagyon sok egymáshoz közeli elnyelési vonala 50 és 70 GHz között. Az atmoszféra alsó részében ezek a vonalak folytonos sávvá szélesednek.

A 350 GHz alatti frekvenciatartományon a *vízgőznek* három elnyelési vonala van, 22.3 GHz, 183.3 GHz és 323,8 GHz-en. Magasabb frekvencián, a szubmilliméteres és infravörös sávban további intenzív elnyelési vonal jelentkezik.

A vízgőz alacsony koncentrációja mellett a vízgőz csillapítása a koncentrációjával arányosnak tekinthető.

A 2.18. ábrán a fajlagos csillapítást mutatjuk be. A vízgőz koncentráció egyenlő 7.5 g/m^3-rel, mely megfelel 1% vízgőz molekula és 99% száraz levegő molekula keverékének. Ezen érték egy átlagos, talajszint magasságában, 50% relatív páratartalmat jelent 16.5^{o}C levegő hőmérséklet mellett, vagy 75% relatív páratartalmat 10°C levegő hőmérséklet mellett.



2.18. ábra Az atmoszférikus gázok által okozott csillapítás

2.9.2. A csapadék csillapítása

Általában az *eső által okozott csillapítás* az elsődlegesen vizsgált jelenség. A gyakorlatban rendszerint az esőintenzitás R (csapadék milliméterben óránként) mérhető egyszerűen. A csendes szemerkélő eső megfelel R=0.25 mm/óra intenzitásnak, könnyű zápor megfelel 1 mm/óra , közepes eső 4 mm/óra , erős zápor 16 mm/óra, és felhőszakadás több cm/óra esőintenzitásnak. A cseppméret eloszlás az esőintenzitás függvénye, nagyobb esőcseppekkel a nagyobb esőintenzitásokkor. Marshal és Palmer a következő empirikus formulát állapította meg:

$$N(a) = N_0 e^{-\Lambda a} \qquad (2.63)$$

ahol $N_0 = 1.6 \times 10^4\ mm^{-1}/m^3$ és $\Lambda = 8.2R^{-0.21} mm^{-1}$, a a cseppek sugara mm-ben.

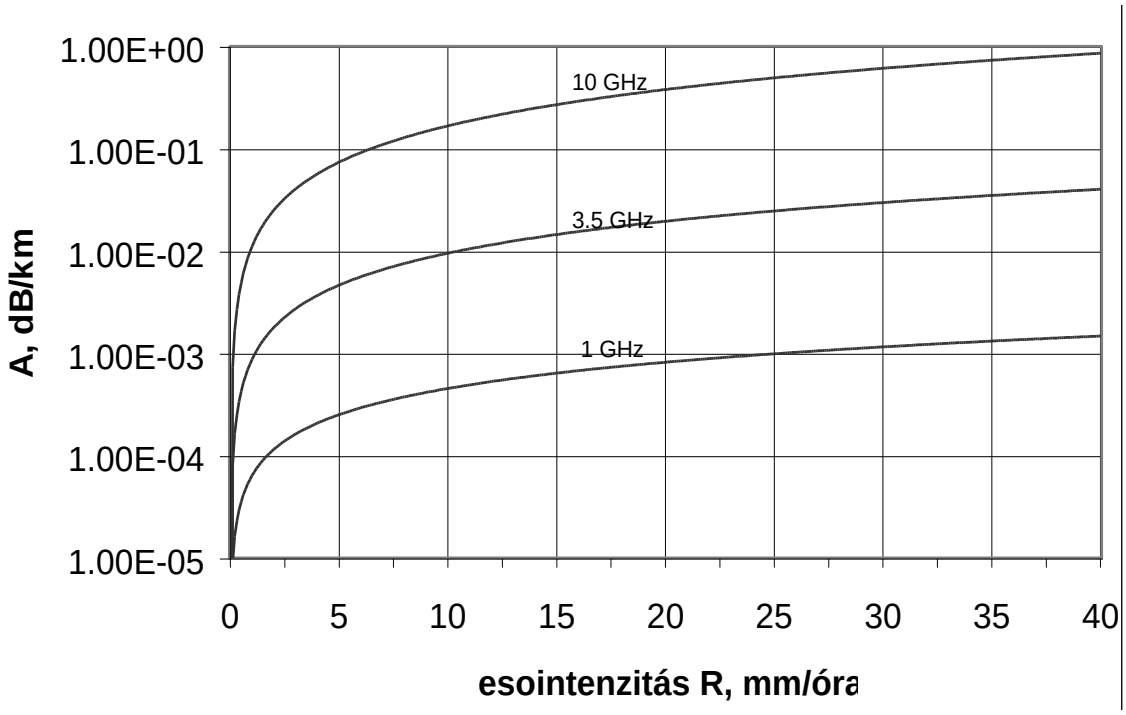
Ezt a modellt használják a legtöbb elméleti esőcsillapítás számításnál. A kifejezés jó egyezést mutat a Laws és Parsons által mért eloszlásokkal.

A rádióösszeköttetések méretezéséhez egyszerű csillapításképletek a kedveltek, melyek az esőintenzitás, frekvencia és hőmérséklet függvényében megadják a fajlagos csillapítást. Ilyen a mérésekkel jól egyező kifejezés a következő:

$$A = cR^b \quad [dB/km] \tag{2.64}$$

ahol c és b frekvenciától és az eső hőmérsékletétől függő konstansok. A hőmérséklettől való csillapításfüggés a víz dielektromos állandójának hőmérsékletfüggésével magyarázható.

Az (2.64) kifejezés felhasználásával az 2.19. ábrán néhány fajlagos csillapítás eredményt mutatunk be 1, 3.5 és 10 GHz-re az esőintenzitás függvényében.



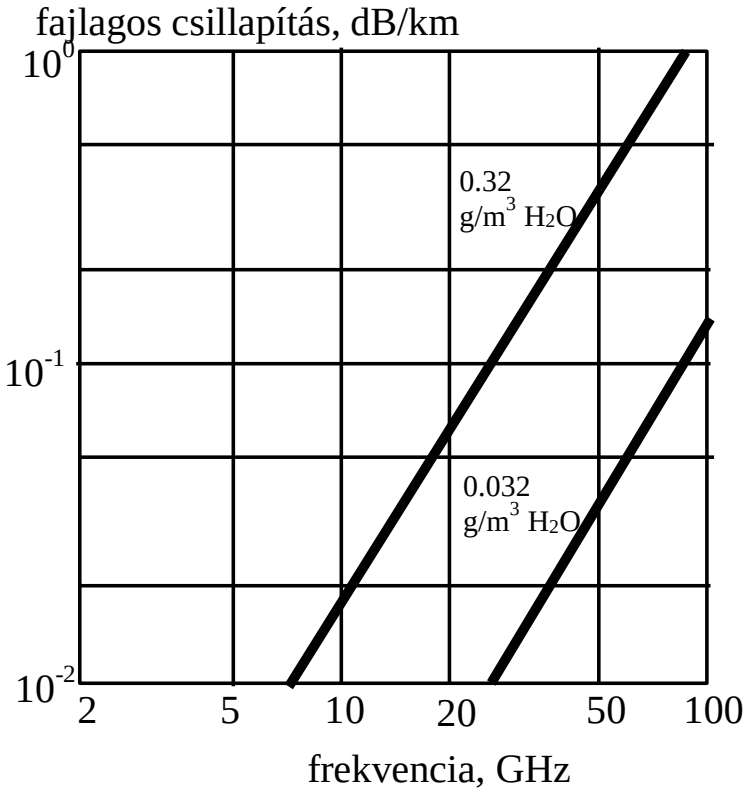
2.19. ábra Fajlagos esőcsillapítás 1, 3.5 és 10 GHz-en az esőintenzitás függvényében

Az eső további hatása a kettős polarizációval működő rádiórendszereknél jelentkezik, ez *a rádióhullámok depolarizációja*. A jelenség lényegében a névleges polarizációból az ortogonális polarizációba történő energia transzformáció.

A radarelmélet szerint az esőcseppek bisztatikus szórást is okoznak. Ez a hatás a térosztásos multiplex rendszereknél jelentkezik, ahol szomszédos csatornás interferenciát okozhat, ha az egyik nyalábból szórt jel a másik szektorban elhelyezkedő vevőantennára jut.

Mikrohullámú és milliméter hullámú sávban a *köd által okozott csillapítás* hasonló törvényszerűségekkel és egyenletekkel írható le, mint az eső által okozott csillapítás. A lényeges különbség az, hogy a köd jóval kisebb részecskékből tevődik össze, ezen részecskék mérettartománya 0.01 to 0.05 mm sugarat jelent. 300 GHz alatti frekvenciákon a köd által okozott csillapítás a vízgőztartalom függvényében lényegében lineárisnak tekinthető egy adott frekvencián. A vízgőz tartalom felső határa 1 g/m^3 körülire tehető, a legtöbb természetben előforduló köd vízgőztartalma ennél lényegesen kisebb. 0.032 g/m^3 vízgőztartalom megfelel a 600 m látótávolsággal jellemezhető ködnek, 0.32 g/m^3 vízgőztartalom pedig körülbelül 120 m látótávolságúnak.

A köd által okozott fajlagos csillapítást a frekvencia függvényében a 2.20. ábrán mutatjuk be az előző két vízgőztartalomra.



2.20. ábra A köd csillapítása a frekvencia függvényében két koncentrációra

300 GHz frekvencián a nagy sűrűségű köd csillapítása is legfeljebb 1 dB/km, emiatt a rádióösszeköttetések tervezésekor az esőcsillapítás kompenzálására beállított csillapítás

tartalék a köd csillapítást mindig ellensúlyozza.

A víz jéggé és hóvá történő kristályosodásakor a dielektromos állandó $\varepsilon = \varepsilon' - j\varepsilon''$ jelentősen megváltozik. Jégre ε' közelítőleg állandó, értéke 3.17, 0° és -30°C hőmérséklettartományban a centiméteres és milliméteres sávban. A képzetes része kicsi, frekvenciától közelítőleg független, közelítőleg 3.7×10^{-3}, 0°C-on és 5.2×10^{-4}, -30°C-on. A képzetes rész alacsony értéke a száraz jégkristályok alacsony csillapítását mutatja. Mivel azonban a hó és jégeső összetétele a meteorológiai tényezőktől erősen függő összetételű jégkristály és víz, ezért a csillapítás is erősen függeni fog a meteorológiai tényezőktől. Továbbá a hó és jégkristályok alakja is olyan változékony, hogy az egyes alakok által okozott csillapítás meghatározása nagyon nehéz.
A mikrohullámú frekvenciákon a száraz hó csillapítása legalább egy nagyságrenddel kisebb, mint az eső csillapítása azonos csapadék intenzitás esetére. A nedves hó csillapítása ezzel szemben összemérhető az eső csillapításával, a milliméteres hullámsávon azt meg is haladhatja. Egyes mérések szerint száraz hóra is 0.96 mm-en az esőénél nagyobb csillapítást kapunk azonos csapadék intenzitás esetén.

A légkör törésmutatója

Az előző fejezetekben feltételezett egyenes vonalú hullámterjedés csak speciális esetekben valósul meg, így például a műholdak közötti összeköttetéseknél. Minden más rádióösszeköttetésnél az elektromágneses hullámok az atmoszférán haladnak keresztül. A rádióhullámok refrakciója szempontjából az atmoszféra legalsó - a Földfelszínhez legközelebbi rétegének - a troposzférának van szerepe, mert a légköri gázoknak itt még akkora a koncentrációja, hogy a rádióhullámokat jelentősen eltérítsék az egyenes vonaltól.
Az egyenes vonalú terjedéstől való eltérést a troposzféra törésmutatójának változása okozza, amit közvetlenül a légkör molekuláris felépítése okoz.
A törésmutató értéke két fő tényező miatt tér el 1-től:

a légköri gázok molekuláit a beérkező elektromos tér polarizálja

kvantummechanikai molekuláris rezonancia

A második hatás keskeny frekvenciasávban, lényegében csak 22 ill. 60 GHz környékén jelentkezik.

Az első hatás gyakorlatilag frekvenciafüggetlen a milliméteres hullámok tartományáig.

A Föld felszínéhez közel a levegő törésmutatója $n \cong 1.0003$.

A számítások egyszerűsítésére vezessük be a törésmutató indezet, a következő összefüggéssel:

$$n=1+10^{-6}\,N$$

ahol N a levegő törésmutató indexe, mely lényegében azt fejezi ki, hogy a törésmutató mennyire tér el az 1-től.

$$n-1=10^{-6}\,N \qquad (2.65)$$

Gázok keverékére a törésmutató index általános formában kifejezhető.

$$n-1=\sum_i m_i\left(A_i+\frac{B_i}{T}\right)$$

ahol

m_i	az i-edik gáz sűrűsége
T	az abszolut hőmérséklet [K]
A_i és B_i	két konstans az i-edik gázra, melyek közül B_i csak az elektromos dipól momentummal rendelkező gázok molekuláira nem nulla. pl. vízgőzre

A Mariotte törvény értelmében m_i -t helyettesíthetjük e_i /T-vel, ahol e_i a gáz parciális nyomása.

Az előzőek értelmében a levegő törésmutatója általánosan

$$n-1 = m_{O_2} \cdot \left(A_{O_2}\right) + m_{N_2} \cdot \left(A_{N_2}\right) + m_{H_2O} \cdot \left(A_{H_2O} + \frac{B_{H_2O}}{T}\right) =$$
$$= \frac{e_{O_2}}{T} \cdot A_{O_2} + \frac{e_{H_2}}{T} \cdot A_{H_2} + \frac{e_{H_2O}}{T} \cdot \left(A_{H_2O} + \frac{B_{H_2O}}{T}\right) \tag{2.66}$$

A (2) képletben a konstansokat empirikusan meghatározva kapjuk az ITU-R ajánlásban is szereplő képletet a troposzféra törésmutató indexére. N kifejezése a meteorológiai tényezőkkel:

$$N = (1-n)10^6 = 77.6\frac{\cdot p}{T} + 3.73 \cdot 10^5 \frac{e}{T^2} \tag{2.67}$$

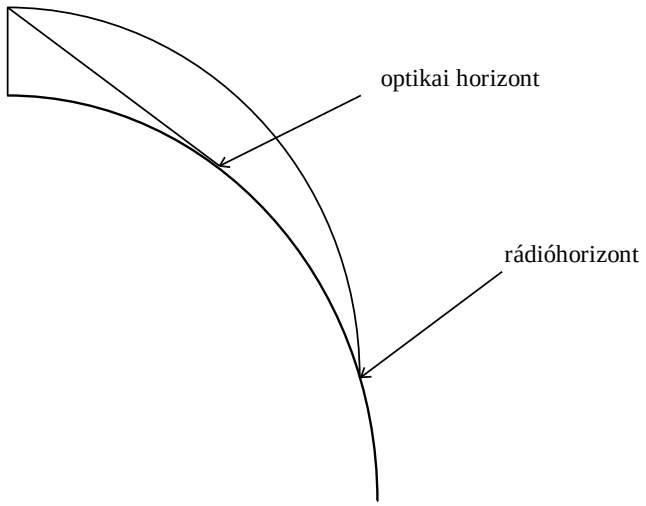
p légnyomás

T hőmérséklet

e a vízgőz parciális nyomása

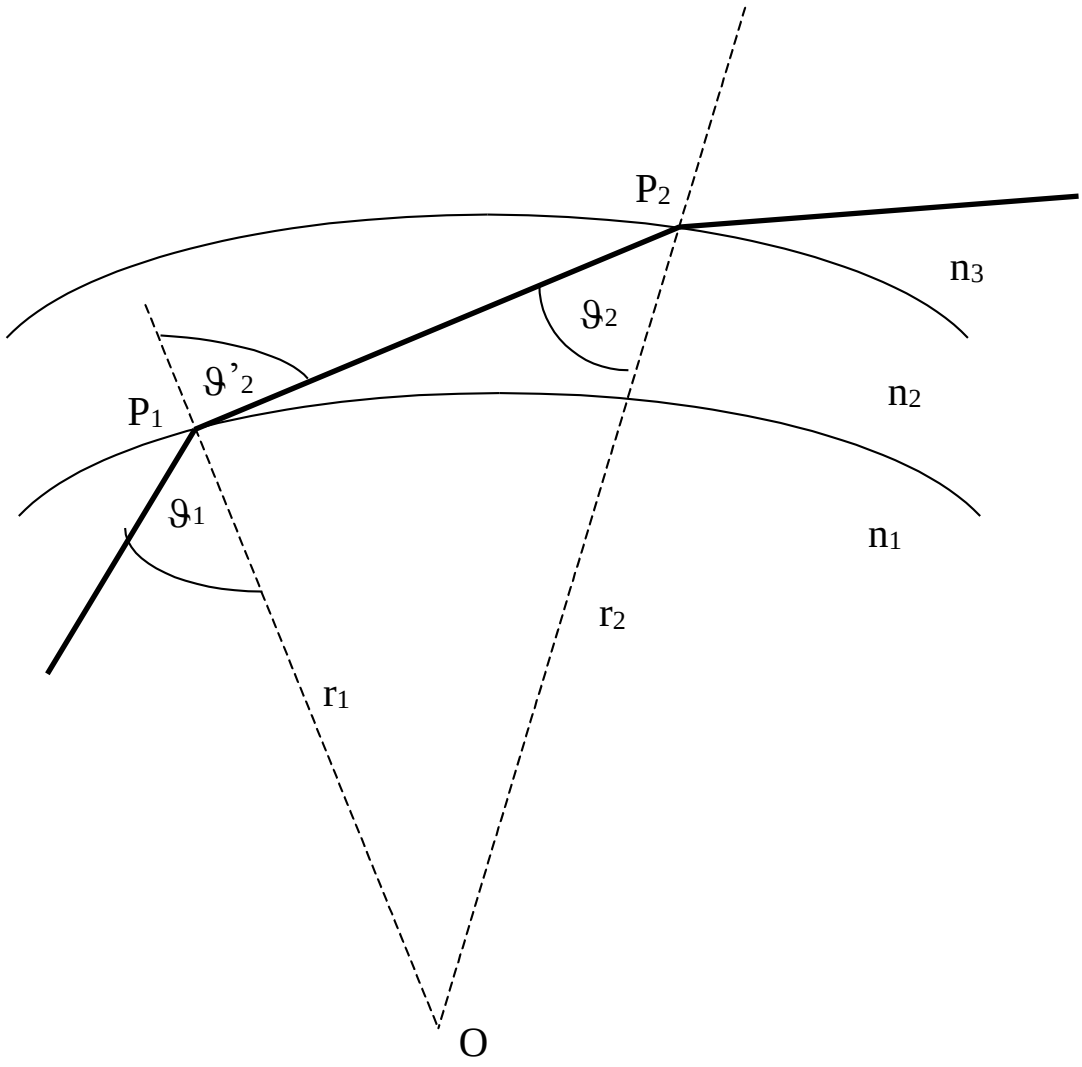
Ezen meteorológiai tényezők a magasság függvényében változnak

Standard atmoszférában n a magassággal csökken, emiatt a rádióhullámok a Föld felé hajlanak el.



2.21. ábra

N értéke a standard atmoszférában közelítőleg 300



2.22. ábra

Az OP_1P_2 háromszögre alkalmazva a szinusztételt, a következő egyenletet írhatjuk fel:

$$\frac{\sin \vartheta_2}{\sin \vartheta_2'} = \frac{r_1}{r_2} \tag{2.68}$$

A Fresnel féle törési törvényt alkalmazva:

$$n_1 \sin\vartheta_1 = n_2 \sin\vartheta_2{}' \tag{2.69}$$

A (2) képletet az (1)-be helyettesítve

$$n_1 r_1 \sin\vartheta_1 = n_2 r_2 \sin\vartheta_2 \tag{2.70}$$

Az előző - diszkretizált - esetet a folytonos esetre kiterjesztve kapjuk az alábbi azonosságot

$$n(r)\cdot r\cdot \sin\vartheta = konst. \tag{2.71}$$

A légkörbe történő beesési szög helyett írjuk át az összefüggést elevációs szögekre

$$n(r)\cdot r\cdot \cos\varphi = konst. \tag{2.72}$$

A továbbiakban alkalmazzuk az alábbi közelítéseket

$$n = 1 + N\cdot 10^{-6} \approx 1 \tag{2.73}$$

$$r = R_0 + h$$

ahol

R_0 a Föld sugara

h a hullám aktuális pozíciója a Földfelszín felett

Az előző közelítéseket felhasználva és a (2.72) összefüggésbe helyettesítve

$$\left(1 + N\cdot 10^{-6}\right)\cdot\left(R_0 + h\right)\cdot\left(1 - \frac{\varphi^2}{2}\right) = konst.$$

A földfelszín feletti összeköttetéseket vizsgálva $h << R_0$.

Az elevációs szög ezen összeköttetésekre kicsi, így

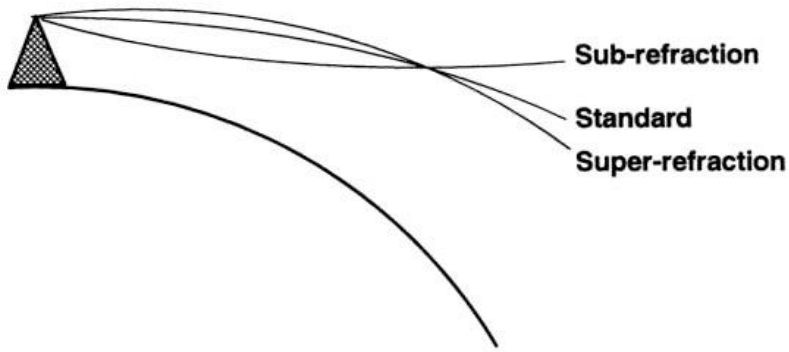
$$N\cdot 10^{-6} + \frac{h}{R_0} - \frac{\varphi^2}{2} = konst.$$

Differenciálva a kifejezést

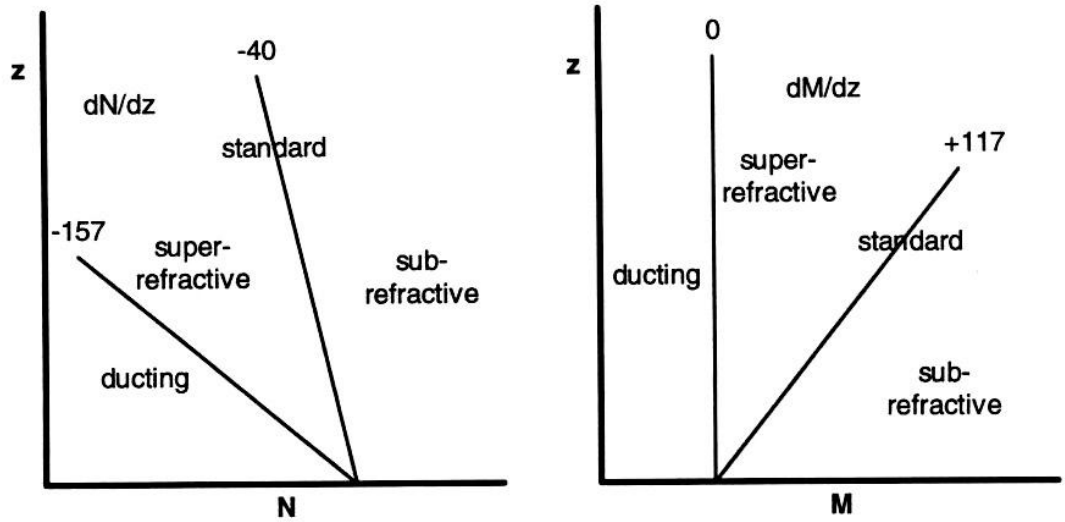
$$\left(\frac{dN}{dh}10^{-6}+\frac{1}{R_0}\right)-\varphi\frac{d\varphi}{dh}=\frac{1}{K\cdot R_0}-\varphi\frac{d\varphi}{dh}=0 \qquad (2.74)$$

Az egyenlet differenciálásával kapott (2.74) egyenletben bevezettük a K Földsugár tényezőt, ami lehetővé teszi a $K{\cdot}R_0$ módosított Földsugár alkalmazásával a hullámterjedési feladatok egyenes vonalú terjedési feladatokra visszavezetését.

$$K=\frac{1}{1+R_0\cdot 10^{-6}\cdot\frac{dN}{dh}}$$



Classification of refractive conditions



2.23. ábra A refrakció osztályozása

Duct:

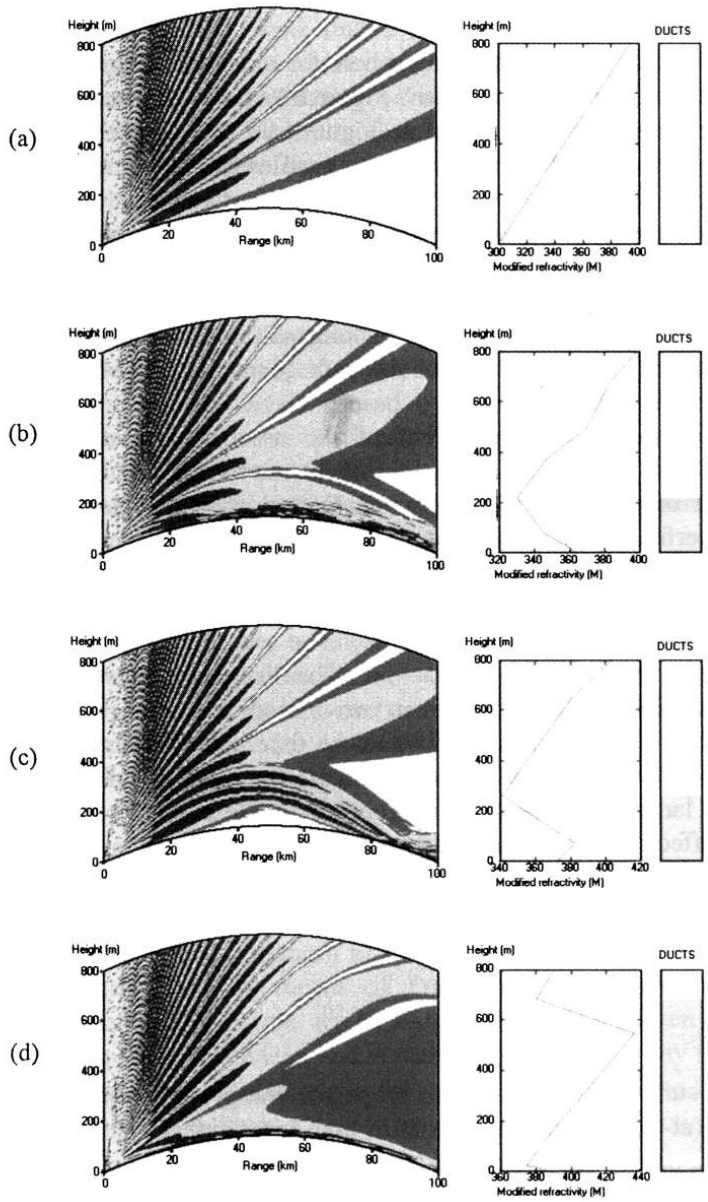


Figure 6.9 *Definition of duct types, and their effect on a 3 GHz transmitter at 20 m height*

The ducts are indicated by the vertical bars

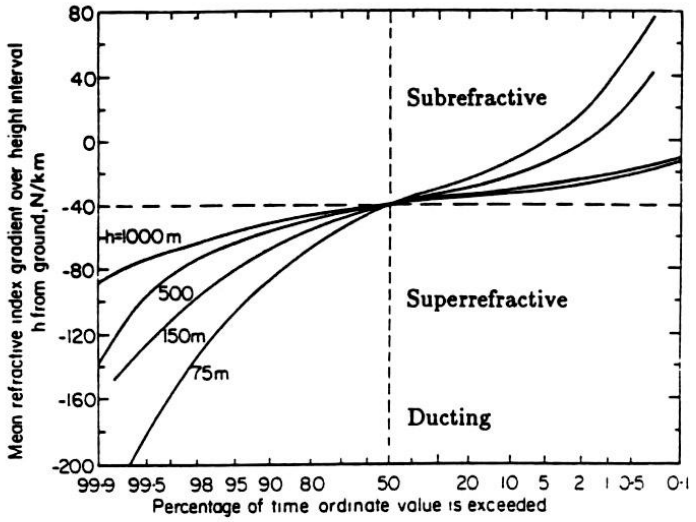
a Standard atmosphere

b Surface layer, surface duct

c Elevated layer, surface duct

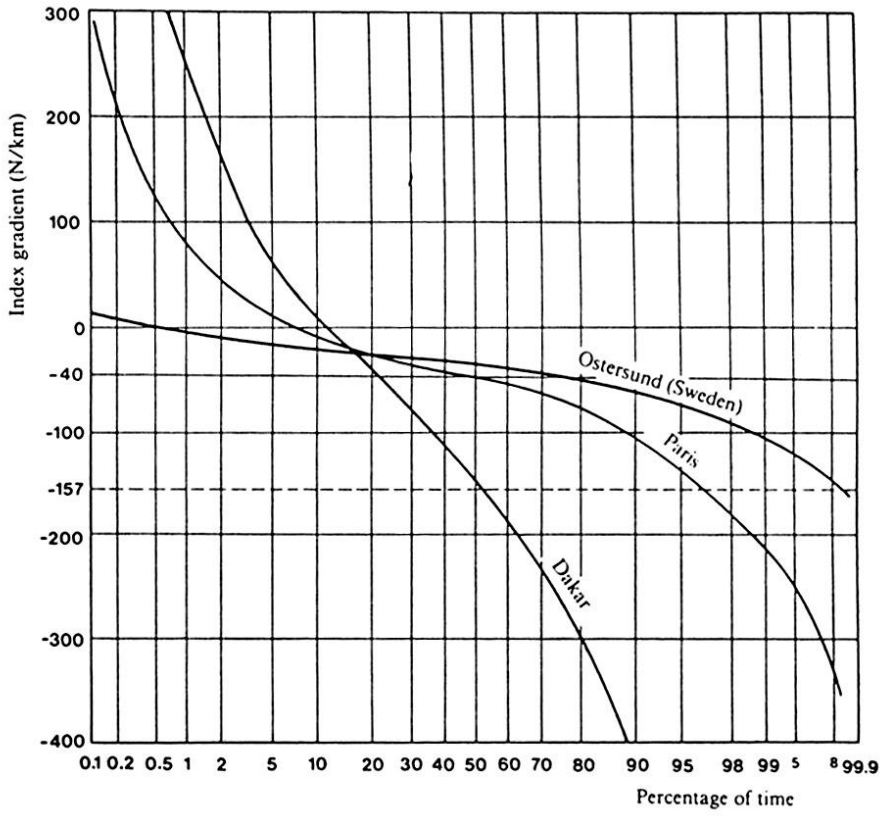
d Elevated layer, elevated duct

2.24. ábra



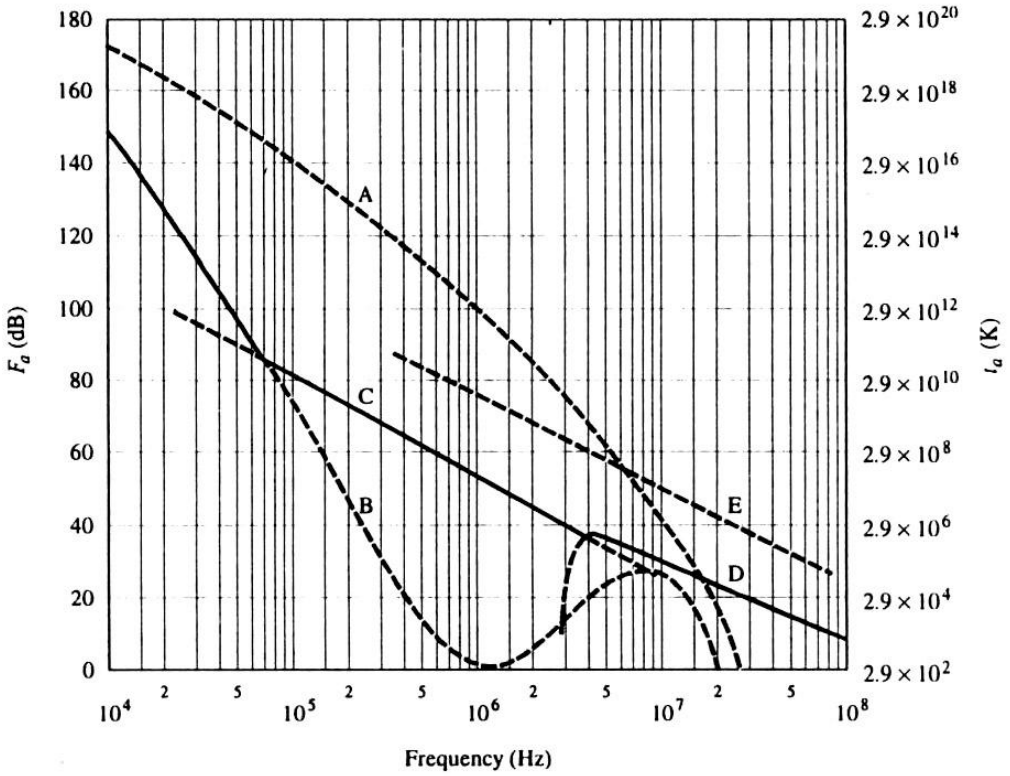
Distribution of mean refractive-index gradient in the UK with height interval above ground level

2.25. ábra A légköri törésmutató index gradiensének időbeli eloszlása



2.26. ábra A légköri törésmutató index gradiensének időbeli eloszlása

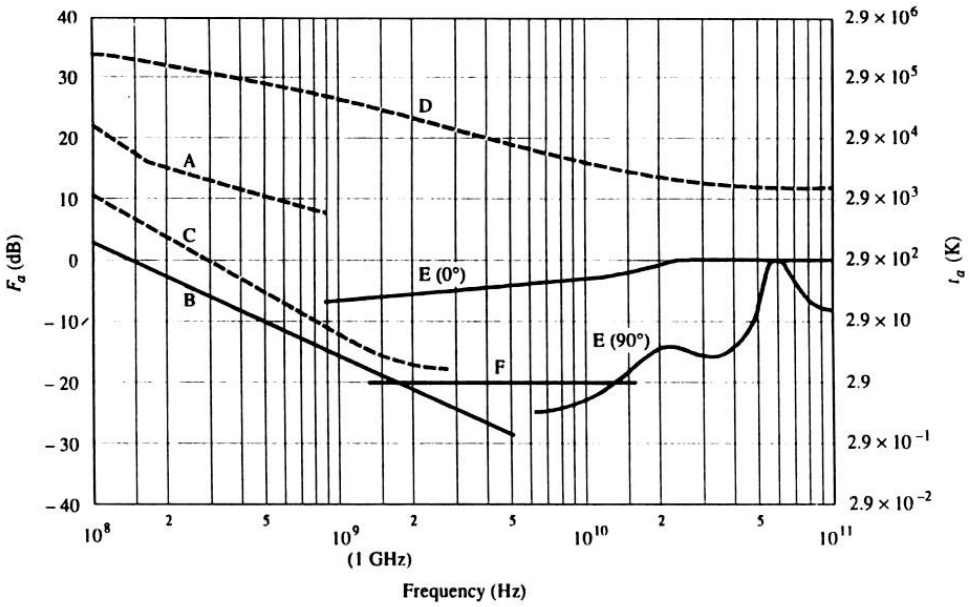
A földi atmoszféra zajjellemzői



Noise figure F_a against frequency: 10 kHz to 100 MHz

A: atmospheric noise, value exceeded 0.5% of time
B: atmospheric noise, value exceeded 99.5% of time
C: man-made noise, quiet receiving site
D: galactic noise
E: median business-area man-made noise
———— minimum noise level expected

2.27. ábra



Noise figure F_a against frequency: 100 MHz to 100 GHz

A: estimated median business-area man-made noise
B: galactic noise
C: galactic noise (toward galactic centre with infinitely narrow beamwidth)
D: quiet Sun (1/2° beamwidth directed at Sun)
E: sky noise due to oxygen and water vapour (very narrow-beam antenna); upper curve, 0° elevation angle; lower curve, 90° elevation angle
F: black body (cosmic background), 2.7 K
——— minimum noise level expected

2.28. ábra