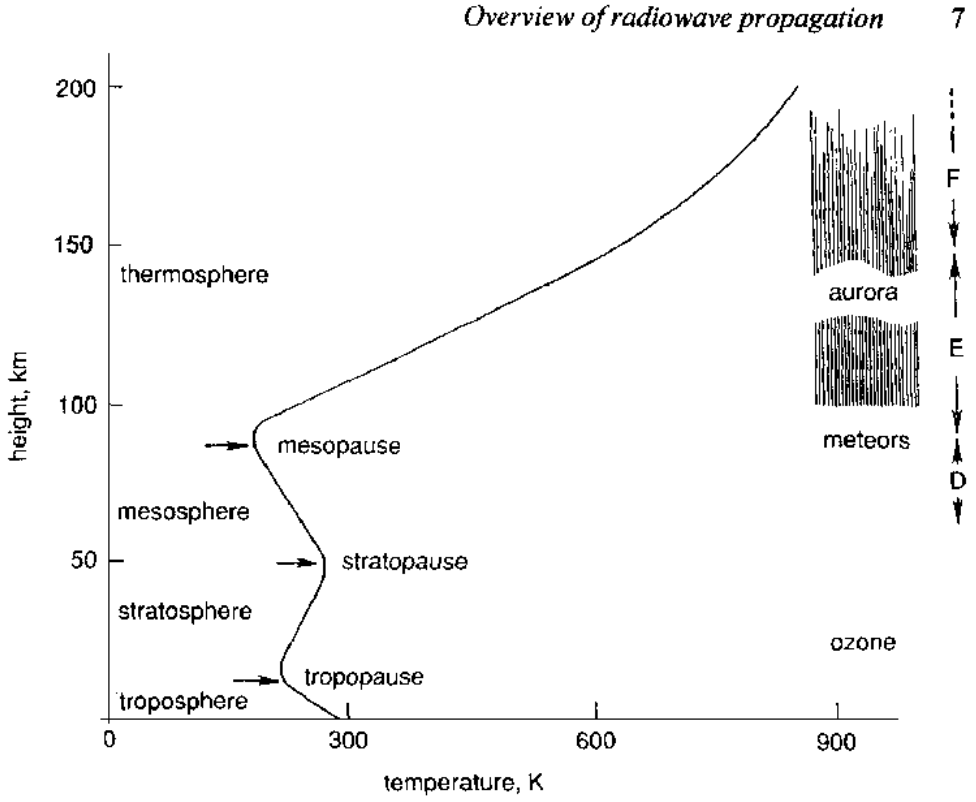
## 2. Hullámterjedés

### Hullámterjedési módok

A földi atmoszféra felépítése




A frekvenciasávok jellemzői

**1. ELF (3 kHz alatt) és VLF (3-30 kHz)**

ELF

Az atmoszféra hatása: az ionoszféra a tápvonal módusú terjedés felső határát képezi

A terep hatása: az föld felszíne a tápvonal módusú terjedés alsó határát képezi

Rendszerjellemzők: alacsony információs sebesség

Tipikus szolgálatok: rövid távolságú - víz alatti, búvárok között
nagy távolságú - tengeralattjárók közötti kommunikáció, föld alatti távérzékelés, bányák

Az ELF hullámok a föld és az ionoszféra között kialakuló gömb üregben terjednek és mélyen behatolnak a földbe és vízbe.

100 Hz-en a tengervíz specifikus csillapítása 0.3 dB/m (harmada a föld ionoszféra tápvonal csillapításának, mely 1 dB/m 1 kHz-en és több, mint 30 dB/m 1 MHz-en).

Az elérhető adatsebesség 1 bit/s körül van.

VLF

Az atmoszféra hatása: az ionoszféra D rétege képezi a terjedés felső határát

A terep hatása: az föld felszíne a terjedés alsó határát képezi

Rendszerjellemzők: még a 100 m-es méretű antennatornyok is csak a hullámhossz töredéke méretűek, nehéz irányított ill. jó hatásfokú adóantennákat készíteni, alacsony adatsebesség.

Tipikus szolgálatok: világméretű távíróösszeköttetés a hajókkal, nagy távolságú állandóhelyű összeköttetések, navigációs célok (Omega), viharjelző szolgálatok, idő standardok,

**2. LF (30-300 kHz) és MF (300-3000 kHz)**
LF
Az atmoszféra hatása: 100 kHz-ig még továbbra is csak felületi hullámok, efölött megjelennek a térhullámok is.
A terep hatása: a felületi hullámok követik a föld görbületét,
Rendszerjellemzők: még a 100 m-es méretű antennatornyok is csak a hullámhossz töredéke méretűek, nehéz irányított ill. jó hatásfokú adóantennákat készíteni,
Tipikus szolgálatok: nagy távolságú összeköttetés hajókkal, nagy távolságú állandóhelyű összeköttetések, műsorszórás, rádiónavigáció,

MF
Az atmoszféra hatása: az térhullámok a felületi hullámok mellett elkülönülve jelentkeznek, a felületi hullámok kisebb távolságon, alacsonyabb frekvencián, a térhullámok nagyobb távolságon, magasabb frekvencián,
A terep hatása: reflexió
Rendszerjellemzők: 1 MHz-en a félhullámhosszúságú antennatorony 150 m, több elemű, irányított antennák, L, T elemek, ill. ferritantennák vevőantennaként,
Tipikus szolgálatok: műsorszórás, rádiónavigáció, néhány földi, tengeri ill. légi mozgó szolgálat, néhány állandóhelyű szolgálat,

**3. HF (3-30 MHz)**
Az atmoszféra hatása: az térhullámok csak az ugrástávolság után jelentkeznek, a felületi hullámok kisebb távolságon, főleg tenger felett
A terep hatása: reflexió (szórás)
Rendszerjellemzők: log-periódikus antennák (horizontális vagy vertikális), vertikális ostorantenna, horizontális dipólrendszer,
Tipikus szolgálatok: állandóhelyű pont-pont összeköttetések, földi (az ugrástávolságnál nagyobb távolságra), tengeri, légi mozgó szolgálat, nagy távolságú műsorszórás,

**4. VHF (30-300 MHz) UHF (300-3000 MHz)**
VHF
Az atmoszféra hatása: refrakció és reflexió a törésmutató index irregularitásokon, szporadikus E reflexió, ionoszférikus szórás, Faraday forgatás, ionoszférikus szcintilláció a föld-műhold rádiósszakaszon,
A terep hatása: reflexió nagyobb hegyekről, diffrakció a völgyekbe, felületi reflexió többutas terjedést okoz látóhatáron belüli összeköttetéseknél,
Rendszerjellemzők: több elemes Yagi antennák, hélixek,
Tipikus szolgálatok: hang és kép műsorszórás; földi, légi és tengeri mozgó szolgálatok, mobil telefonok és vezeték nélküli telefonok, rádiónavigációs nyalábok

UHF
Az atmoszféra hatása: refrakció, reflexió alacsonyabb frekvencián, duct magasabb frekvencián
törésmutató index fluktuáció miatt horizonton túli szórás f>500 MHz
A terep hatása: hegyek, épületek által okozott árnyékolás
Rendszerjellemzők: Yagi antennák, nagy sávszélesség, paraboloid reflektor antennák nagyobb frekvencián
Tipikus szolgálatok: TV műsorszórás,
légi navigáció, leszállító rendszer,
radar, mobil szolgálatok, cellás rádiótelefon rendszerek
Troposzférikus szórással 300-600 km elérhető,

Az SHF (centiméteres hullámok, 3-30 GHz) tartományában az előző sávokhoz képest a csapadék már számításba veendő, változó csillapítást okoz. Nagy nyereségű, forgásparaboloid és tölcsérantennákat alkalmaznak. A tipikus rendszerek a fix telepítésű földi pont-pont, pont-multipont, műholdas mobil hírközlési alkalmazások és rádiólokáció.

Az EHF (30-300 GHz, milliméteres hullámok) és (300-3000 GHz, szubmilliméteres hullámok) sávokban a csapadék csillapítása mellett az atmoszférikus gázok csillapítása is jelentős. Nagynyereségű antennaként az

EHF sávon paraboloid reflektor, a szubmilliméteres sávon lencseantennákat alkalmaznak. A sávokban megvalósítható rendszerek kis távolságú látóhatáron belüli összeköttetések és távérzékelés.

**A hullámterjedés fizikai mechanizmusai**

Az adó- és vevőantenna között az elektromágneses hullám többféle fizikai mechanizmus utján terjed, ezeket hullámterjedési módoknak nevezzük. A továbbiakban az alábbi hullámterjedési módokat vizsgáljuk meg részletesen.

Közvetlen hullám, vagy direkt hullám

Földről reflektált hullám

Felületi hullám

Diffrakciós terjedés

Troposzférikus szórás

Ionoszférikus hullám, vagy térhullám

A látóhatáron belüli terjedésnél a közvetlen- és földről reflektált hullám mindig együtt van jelen. Az URH és mikrohullámú sávban ilyenkor a többi hullámterjedési mód hatását rendszerint el lehet hanyagolni.
Ahhoz, hogy eldöntsük egy-egy összeköttetésnél mely mód a domináns először a fizikai képeket vázoljuk fel.

**2.1. Közvetlen hullám**

Kialakulásának feltétele, hogy az adó- és vevőantenna között a terjedés akadálytalanul, szabad térben jöjjön létre. Akadálytalannak tekintjük a terjedést, ha a hullámfrontnak az a része terjedakadálytalanul, amely az energia nagyobb részét (98-99%-át) szállítja. (Fresnel zónák)
A $G_A$ nyereségű adóantennába $P_A$ teljesítményt betáplálva az antenna által a szabad térben előállított teljesítménysűrűség az antennától r távolságban

$$S_o = \frac{P_A G_A}{4\pi r^2} \tag{2.1}$$

Mivel az antenna távolterében a hullám síkhullámnak tekinthető, ezért az elektromos és mágneses térerősség vektorai itt egymásra és a terjedés irányára merőlegesek és fázisban vannak. Ekkor a teljesítménysűrűség a következőképpen írható fel

$$S = \frac{\left|\mathbf{E}_{csúcs}\right|^2}{240\pi} \tag{2.2}$$

A (2.1) és (2.2) képletekből az elektromos térerősség amplitudója

$$E_{csúcs} = \frac{\sqrt{60 P_A G_A}}{r} \tag{2.3}$$

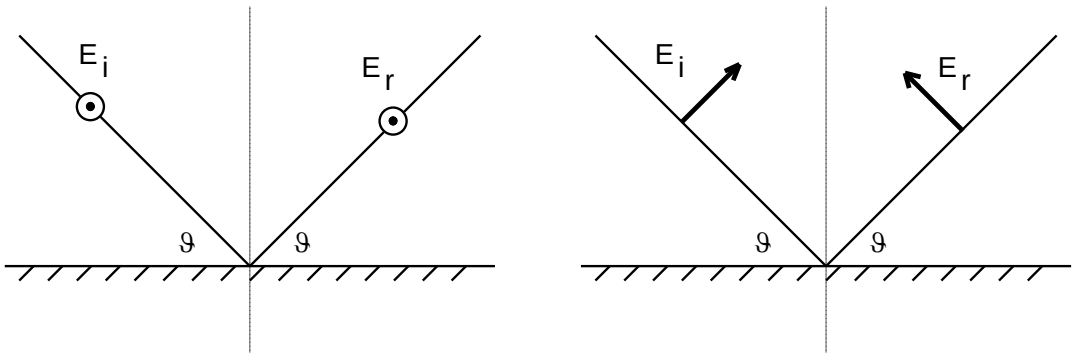
A szabadtéri csillapítás

$$a_o = 20\lg\left(\frac{4\pi\, r}{\lambda}\right) - \left(G_A^{dB} + G_V^{dB}\right) \tag{2.4}$$

Mint a (2.3) és (2.4) képletekből látszik, az elektromos térerősség amplitudója az adóantennától mért távolsággal fordítottan, a szakaszcsillapítás pedig a távolság négyzetével egyenesen arányos.

### 2.2. Földről reflektált hullám

A földről reflektált hullám amplitudóját, fázisát és polarizációját a föld anyaga és felületének egyenetlensége határozza meg. Ha a föld felszíne sík és tökéletesen síma, akkor spekuláris reflexió alakul ki. Ha a beeső hullám síkhullám, akkor a visszavert hullám is az lesz és az energia egyetlen diszkrét irányba terjed. Ez az ideális eset elméletileg jól leírható, ha a veszteségmentes dielektrikumra vonatkozó Snell-Descartes törvényt a komplex ε és komplex μ bevezetésével veszteséges dielektrikumokra általánosítjuk.
Egyetlen felületről történő reflexió esetén a spekuláris és diffúz reflexió együtt jelenik meg. A diffúz reflexió a reflektált hullámfront síktól való eltérésével van összefüggésben, és az energiának a tér minden irányába történő szóródását jelenti.
A továbbiakban a talajreflexiós tényezőt vizsgáljuk meg az alábbi két polarizációra. (2.1. ábra)




**2.1. ábra** Horizontális polarizáció Vertikális polarizáció

A földreflexiós tényezőt mint a reflektált és beeső hullám elektromos térerőssége amplitudóaránya.

$$\Gamma = \frac{E_r}{E_i} \tag{2.5}$$

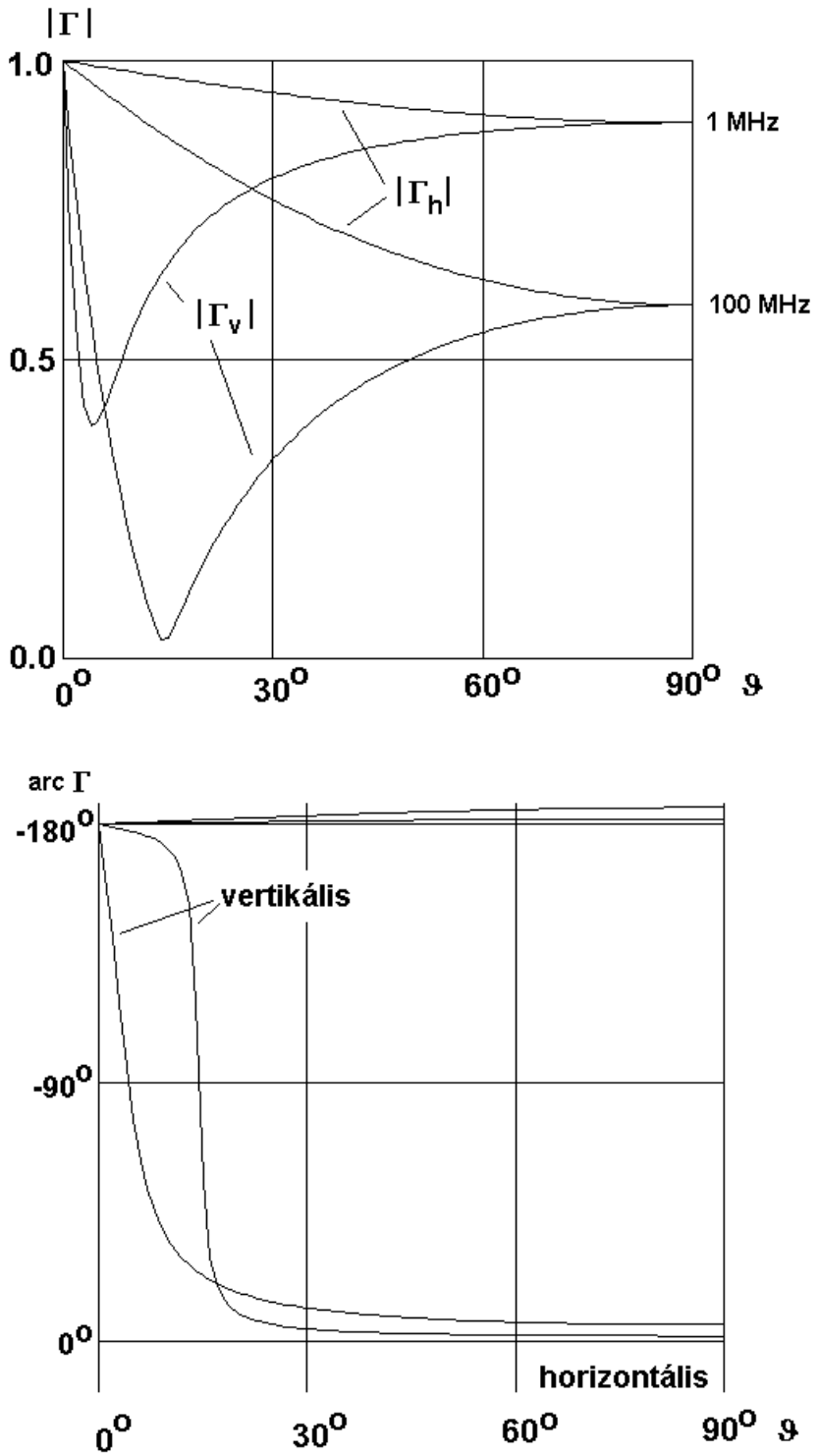
A talajreflexiós tényező horizontális polarizációra

$$\Gamma_h = \frac{\sin\vartheta - \sqrt{\varepsilon^* - \cos^2\vartheta}}{\sin\vartheta + \sqrt{\varepsilon^* - \cos^2\vartheta}} \tag{2.6}$$

A talajreflexiós tényező vertikális polarizációra

$$\Gamma_v = \frac{\varepsilon^* \sin\vartheta - \sqrt{\varepsilon^* - \cos^2\vartheta}}{\varepsilon^* \sin\vartheta + \sqrt{\varepsilon^* - \cos^2\vartheta}} \tag{2.7}$$

Ábrázoljuk a talajreflexió abszolut értékét és fázisát két frekvenciára




**2.2. ábra** A földreflexiós tényező abszolút értéke és fázisa

$\vartheta_B$ beesési szögnél vertikális polarizációnál a $|\Gamma|$ minimumot ér el.
Ha σ=0, akkor

$$tg\vartheta_B = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r}} \tag{2.8}$$

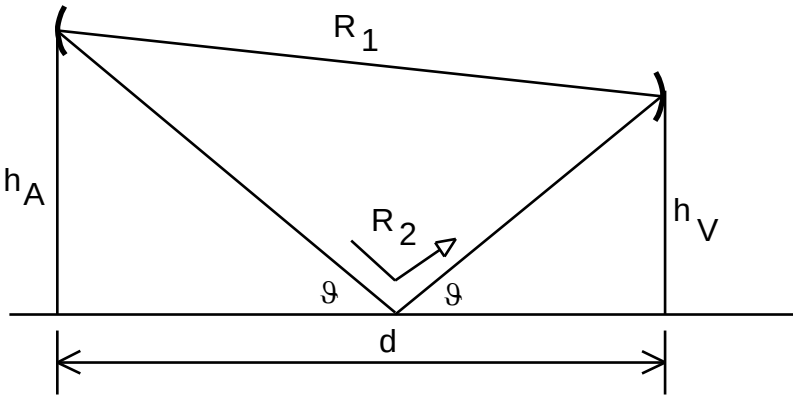
Ennél a szögnél $\Gamma_v = 0$ és $\vartheta_B$ a Brewster szög.
Ha $\sigma \neq 0$ akkor

$$tg\vartheta_B \cong \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_r}} \tag{2.9}$$

és $\vartheta_B$ a pszeudo Brewster szög.

**2.3. Kétutas hullámterjedés sík föld fölött**

Az adóantennát és a vevőantennát a sík földtől $h_A$ és $h_V$ magasságban elhelyezve az elektromágneses hullámok a két antenna között a 2.3. ábra alapján közvetlen és a földfelszínről reflektált úton jutnak el. A vételi térerősség a két komplex amplitudó összege a vevőantenna helyén.




**2.3. ábra** Kétutas terjedés

Mivel a gyakorlatban előforduló összeköttetéseknél $\vartheta \leq 5^o$, ezért a 2.2. ábrák alapján a földreflexiós tényező értéke bármely polarizáció mellett, tetszőleges üzemi frekvencián jó közelítéssel -1 értékűnek tekinthető, így a továbbiakban

$$\Gamma_f = -1 \tag{2.10}$$

A vételi térerősség a közvetlen és földről reflektált hullám térerősségösszegeként írható fel

$$E_V = E_d + E_r \cong E_o + E_o\,\Gamma_f\, e^{-j\beta\Delta R} \tag{2.11}$$

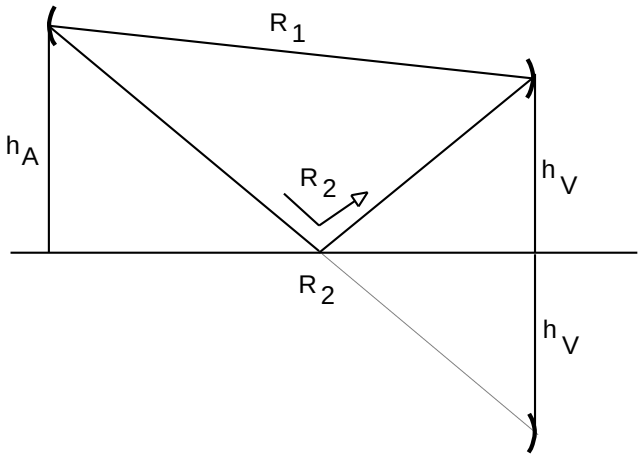
ahol

$\Delta R = R_2 - R_1$ a közvetlen és reflektált hullám úthosszának különbsége

Az úthosszak a tükrözési tétel értelmében a 2.4. ábra alapján

$$R_1 = \sqrt{d^2 + \left(h_A - h_V\right)^2} \tag{2.12}$$

$$R_2 = \sqrt{d^2 + \left(h_A + h_V\right)^2} \tag{2.13}$$




**2.4. ábra** Közvetlen és reflektált utak

A (2.12 és (2.13) képleteket az

$$\sqrt{1+x} \cong 1+\frac{1}{2}x \quad ; \quad x \langle\langle 1 \tag{2.14}$$

sorfejtés első két tagjának felhasználásával az alábbi alakban írhatjuk fel.

$$R_1 = d\sqrt{1+\left(\frac{h_A - h_V}{d}\right)^2} \cong d\left[1+\frac{1}{2}\left(\frac{h_A - h_V}{d}\right)^2\right] \tag{2.15}$$

$$R_2 = d\sqrt{1+\left(\frac{h_A + h_V}{d}\right)^2} \cong d\left[1+\frac{1}{2}\left(\frac{h_A + h_V}{d}\right)^2\right] \tag{2.16}$$

Innen az úthosszkülönbség

$$\Delta R = R_2 - R_1 \cong \frac{2h_A h_V}{d} \tag{2.17}$$

A (2.10), (2.17) képleteket a (2.11)-ba helyettesítve a vételi térerősség

$$E_V \cong E_o\left(1-e^{-j\beta\Delta R}\right) \cong E_o\left(1-e^{-j\beta\, 2\, h_A\, h_V/d}\right) \tag{2.18}$$

$$E_V = E_o\, e^{-j\beta\, h_A\, h_V/d}\; 2j\, \sin\left(\beta\, \frac{h_A\, h_V}{d}\right) \tag{2.19}$$

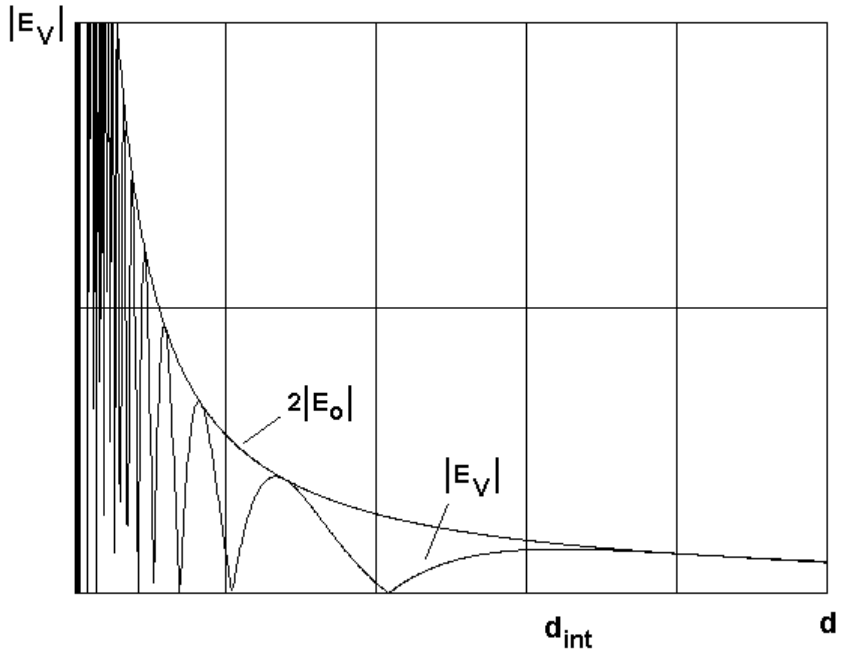
Mivel a térerősség abszolut értékét mérjük és a felhasználás szempontjából ez a fontos, ezért a fázistényezőket a továbbiakban nem vesszük figyelembe.

$$\left|E_V\right| = 2\, E_o \left|\sin\left(\frac{2\pi}{\lambda}\frac{h_A\, h_V}{d}\right)\right| \tag{2.20}$$

Vizsgáljuk meg a továbbiakban a térerősség változását mozgó és állandóhelyű összeköttetésekre.

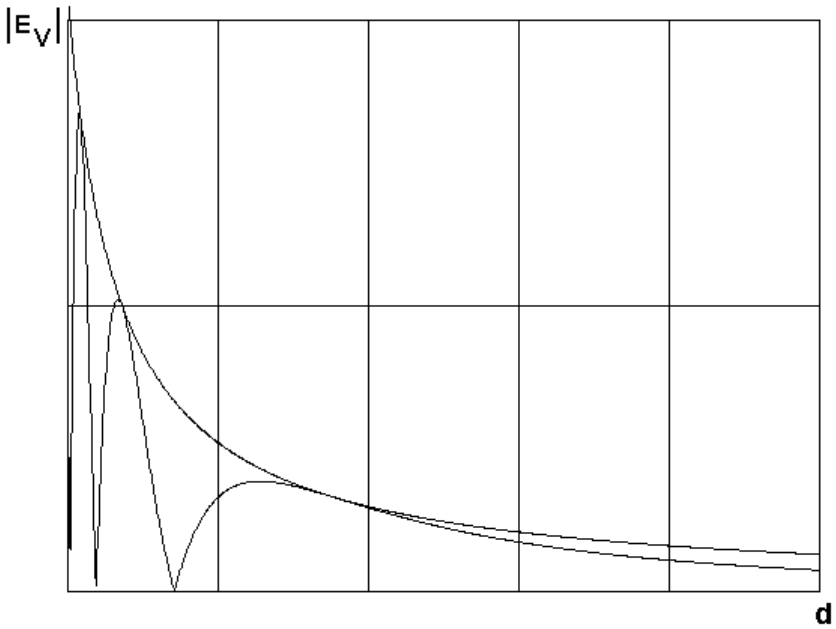
*2.3.1. Mozgó rádióösszeköttetés térerőssége*

Az $|E_V|$ térerősséget ábrázoljuk a *d* szakasztávolság függvényében.




**2.5. ábra** Kétutas rádióösszeköttetés térerőssége

A rádiósszakasznak az állandóhelyű antenna és $d_{int}$ távolság közötti részét interferencia zónának nevezzük, ahol mint az a 2.5. ábrán jól látható, a térerősség minimum és maximumhelyei váltva követik egymást. Az interferencia zónán kívül a térerősség $1/d^2$-tel arányos, szemben a szabadtéri rádióösszeköttetés 1/*d*-vel arányos térerősségével.
Ennek láthatóvá tételére nagyítsuk ki a 2.5. ábra jobb oldali tartományát. (2.6. ábra)




**2.6. ábra** Kétutas rádióösszeköttetés térerőssége

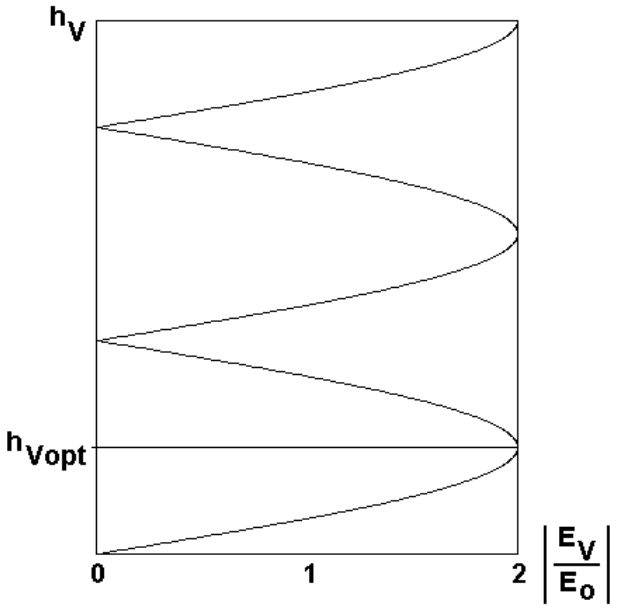
Az interferencia zóna határának kiszámításához vizsgáljuk meg a (2.20) kifejezés szinusz függvényének argumentumát. Az interferencia zóna határát az adja, ahol az argumentum π/2-vel egyenlő.

$$\frac{2\pi}{\lambda}\frac{h_A\, h_V}{d_{\text{int}}} = \frac{\pi}{2} \tag{2.21}$$

$$d_{\text{int}} = \frac{4h_A\, h_V}{\lambda} \tag{2.22}$$

*2.3.2. Állandóhelyű rádióösszeköttetés*

Állandóhelyű rádióösszeköttetéseknél a cél az optimális vevőantenna magasság meghatározása.




**2.7. ábra** Állandóhelyű rádióösszeköttetés térerőssége

Az optimális vevőantenna magasságot ugyancsak a (2.22) összefüggésből kapjuk, innen

$$h_{Vopt} = \frac{\lambda\, d}{4h_A} \tag{2.23}$$

*2.3.3. Kétutas terjedés szakaszcsillapítása*

A szakaszcsillapítás levezetéséhez induljunk ki a szakaszcsillapítás definíciójából

$$a_{sz} = 10\lg\frac{P_A}{P_V} \tag{2.24}$$

A $P_V$ hatásos teljesítményt, mely a vevőantennából maximálisan kivehető, a vételi térerősségből írjuk fel.

$$\left|E_V\right| = 2E_o \sin\left(\beta\,\frac{h_A\, h_V}{d}\right) \quad \rightarrow \quad P_V = 4P_o \sin^2\left(\beta\,\frac{h_A\, h_V}{d}\right) \tag{2.25}$$

ahol

$P_o$ a hatásos teljesítményt, mely a vevőantennából maximálisan kivehető szabadtéri terjedés mellett

A (2.25) összefüggést a (2.24)-ba helyettesítve és felhasználva, hogy

$$a_o = 10\lg \frac{P_A}{P_o} \tag{2.26}$$

a kétutas hullámterjedés szakaszcsillapítását a szabadtéri csillapítással tudjuk kifejezni.

$$a_{sz} = a_o - 20\lg\left[2\sin\left(\beta\ \frac{h_A\ h_V}{d}\right)\right] \tag{2.27}$$

Az interferencia zónán kívül a szinuszfüggvény argumentumával helyettesíthető és a szabadtéri csillapítás (2.9) képletét felhasználva

$$a_{sz} = 20\lg\left(\frac{4\pi\ d}{\lambda}\right) - \left(G_A + G_V\right) - 20\lg\left(2\beta\ \frac{h_A\ h_V}{d}\right)$$

$$a_{sz} = 20\lg\left(\frac{d^2}{h_A\ h_V}\right) - \left(G_A + G_V\right) \tag{2.28}$$

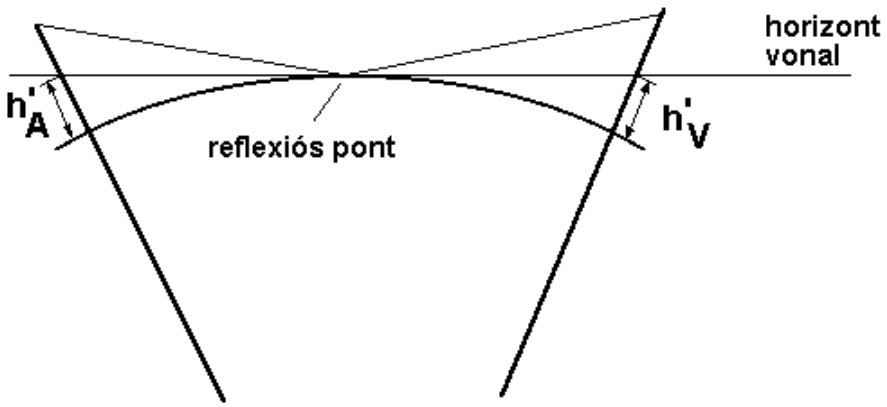
Mint a (2.28) képletből látszik, a kétutas terjedés szakaszcsillapítása az interferencia zónán kívül független az üzemi frekvenciától és a távolság negyedik hatványával arányos.

## 2.4. A föld görbültségének figyelembe vétele

Ebben a fejezetben megmutatjuk, hogy a föld görbültsége két módon befolyásolja a kétutas terjedést. Egyrészt a görbült földfelület felett elhelyezkedő adó-, és vevőantenna sík földfelszínre átszámított látszólagos antennamagassága kisebb a tényleges magasságnál. Másrészt a görbült fölfelületen történő talajreflexió reflexiós tényezője kisebb a sík felületen történő reflexióval összehasonlítva.

### *2.4.1. Látszólagos antennamagasságok*

Ahhoz, hogy megkapjuk az adó,- és vevőantenna sík földhöz képesti látszólagos antennamagasságát fektessünk egy a földfelszínt érintő síkot a reflexiós ponton keresztül.




**2.8. ábra** Horizontvonal és látszólagos antennamagasságok

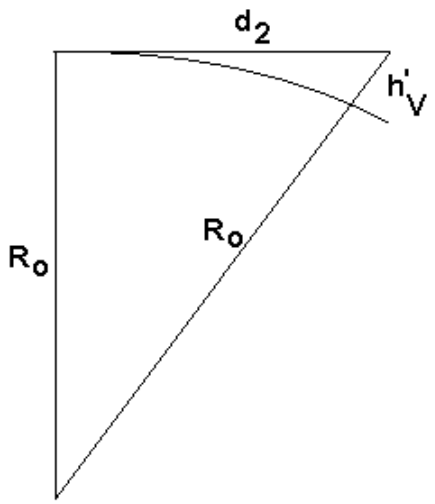
A továbbiakban tehát a figyelembe vett magasságok kisebbek, mint a telepítési magasságok és a továbbiakban a sík föld feletti terjedéssel számolhatunk.

$$h_A = h_{At} - h'_A \tag{2.29}$$

$$h_V = h_{Vt} - h'_V \tag{2.30}$$

ahol a *t* index a telepítési magasságot jelenti.

A következő ábra alapján írjuk fel a látszólagos magasság és a horizont távolságának kapcsolatát.




**2.9. ábra** A látszólagos magasság és a horizont távolságának kapcsolata

A 2.9. ábrán látható derékszögű háromszögből a Pithagoras tétellel az alábbi egyenletet írhatjuk fel.

$$R_o + d_2^2 = \left(R_o + h'_V\right)^2 \tag{2.31}$$

ahol

$R_o$ a Föld sugara ( 6370 km )

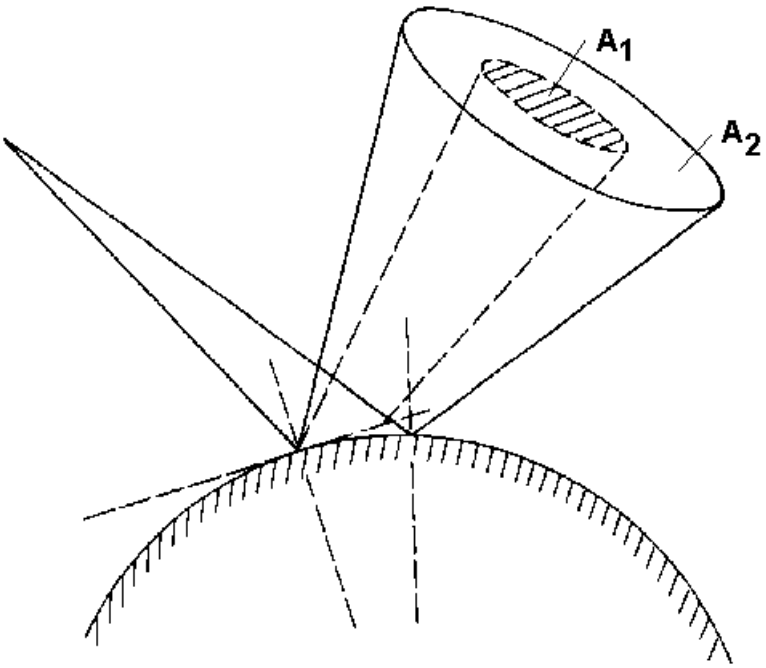
A (2.31) egyenlet jobb oldalán a négyzetre emelést elvégezve és feltételezve, hogy $h'_V \langle\langle R_o$ a látszólagos magasság és a horizont távolságának kapcsolata.

$$d_2 \cong \sqrt{2R_o\, h'_V} \tag{2.32}$$

$$d_2^{km} \cong 3.56\sqrt{h'^{\,m}_V} \tag{2.33}$$

*2.4.2. Divergencia*

A rádióhullámok a gyakorlatban a sík föld helyett valójában egy görbült felületen reflektálódnak, aminek az a következménye, hogy a divergencia miatt nagyobb felületen oszlik el a teljesítmény. A jelenséget a 2.10. ábrán szemléltetjük, ahol látszik, hogy a sík földön történő reflexió esetén $A_1$ , a görbült földön történő reflexió esetén ugyanaz a teljesítmény $A_2$ felületen oszlik el.




**2.10. ábra** Divergencia

A divergencia tényezőt az alábbi összefüggéssel, a teljesítménysűrűség arányainak négyzetgyökeként írjuk fel.

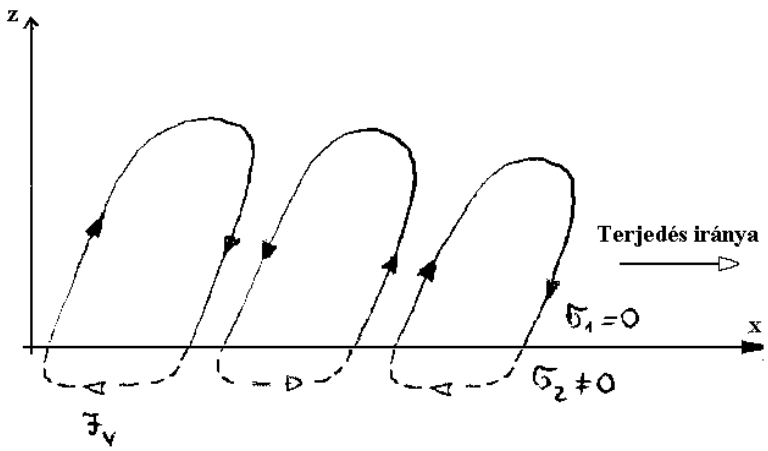
$$D = \sqrt{\frac{A_1}{A_2}} \qquad D \leq 1.0 \tag{2.34}$$

A módosított földreflexiós tényező értékét pedig a következőképpen kapjuk.

$$\Gamma'_f = D\,\Gamma_f \tag{2.35}$$

**2.5. Felületi hullám**

A felületi hullám a jól vezető Föld és a levegő határfelülete mentén alakul ki és elektromos erővonalai a 2.11. ábrán látható alakúak.




**2.11. ábra** Felületi hullám terjedése

A levegőben folyó eltolási és a talajban folyó vezetési áram zárt hurkot alkot. Az elektromos erővonalak a talaj véges vezetőképessége miatt a haladás irányába megdőlnek.
A komplex dielektromos állandót vezessük be az I. Maxwell egyenlet (2.36) alapján.

$$\mathrm{rot}\,\mathbf{H} = \mathbf{E}\left(\sigma + j\omega\,\varepsilon_o\,\varepsilon_r\right) \qquad (2.36)$$

$$\mathrm{rot}\,\mathbf{H} = j\omega\,\varepsilon_o\,\varepsilon^*\,\mathbf{E} \qquad (2.37)$$

ahol

$\varepsilon^*$ a komplex dielektromos állandó

$$\varepsilon^* = \varepsilon_r + \frac{\sigma}{j\omega\varepsilon_o} = \varepsilon_r - j\,60\lambda\,\sigma = \varepsilon_r - j\,X$$

Ha $\varepsilon_r \rangle\rangle X$, akkor a közeg inkább szigetelő, ha pedig $\varepsilon_r \langle\langle X$ akkor inkább vezető. Az, hogy egy közeg melyik csoportba tartozik, a hullámhossztól is függ.
Néhány közegre és frekvenciára az I. Táblázat mutatja be a vezetőképességet és dielektromos állandót.

I. Táblázat

| Talaj | $\varepsilon_r$ | σ ; mS/m | f ; MHz |
|---|---|---|---|
| Tengervíz | 80 | 4000 | 900 |
| Édesvíz | 80 | 5 | 1.1 |
| Mocsaras, erdős síkvidék | 30 | 20 | 12 |
| Gazdag termőtalaj, alacsony domdok | 15 | 10 | 12 |
| Legelő, közepes dombokon, erdő | 15 | 5 | 6 |
| Sziklás hegyvidék | 7 | 1 | 2.6 |
| Hegyvidék 1000 m-ig | 5 | 1 | 3.6 |
| Sivatag | 3 | 0.1 | 0.6 |
| Városok lakónegyedei | 4 | 2 | 9 |
| Városok ipari negyedei | 3 | 0.1 | 0.6 |

Az I. Táblázatban f az a frekvencia, ahol $\varepsilon_r = X$.

Mint az I. Táblázatból látható, mintegy 0.5-1 MHz alatt a talajok inkább vezetőként, 10-20 MHz felett pedig inkább szigetelőként viselkednek, kivéve a tengervizet, mely a mikrohullámú sáv aljáig viszonylag jó vezető. Felületi hullámokat jó hatásfokkal csak olyan vertikális adóantennával lehet gerjeszteni, melynek egyik pólusa a talajhoz kapcsolódó ellensúlyrendszerre van kötve.
Sommerfeld 1909-ben a Fizikai szemlében publikálta a vertikális felületi hullámok csillapítási tényezőjét.

$$E = E_0 \cdot A(p) \qquad (2.38)$$

ahol

*A(p)* a vertikális felületi hullámok csillapítási tényezője
*$E_0$* a szabadtéri térerősség

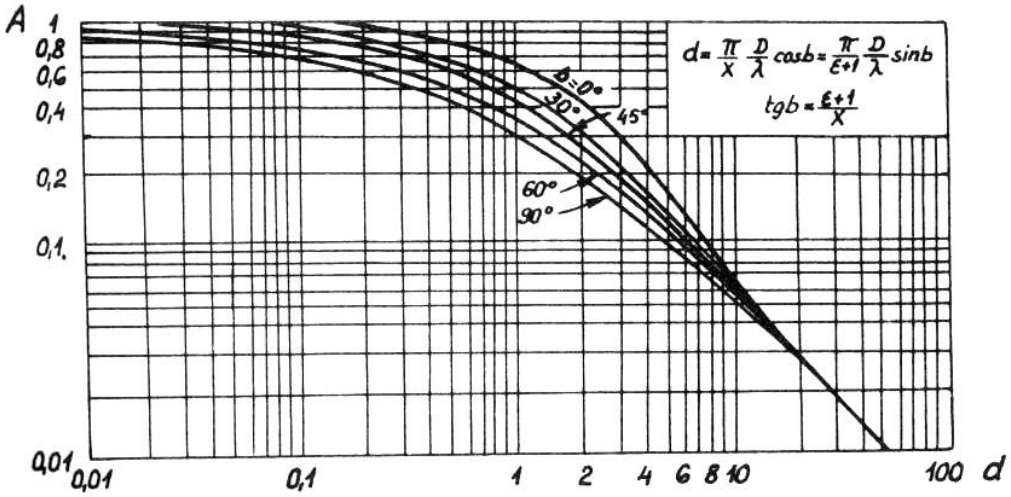
$$A(p) = \frac{2 + 0.3 \cdot p}{2 + p + 0.6 \cdot p} - \sqrt{\frac{p}{2}} \cdot e^{-0.6 \cdot p} \sin b \qquad (2.39)$$

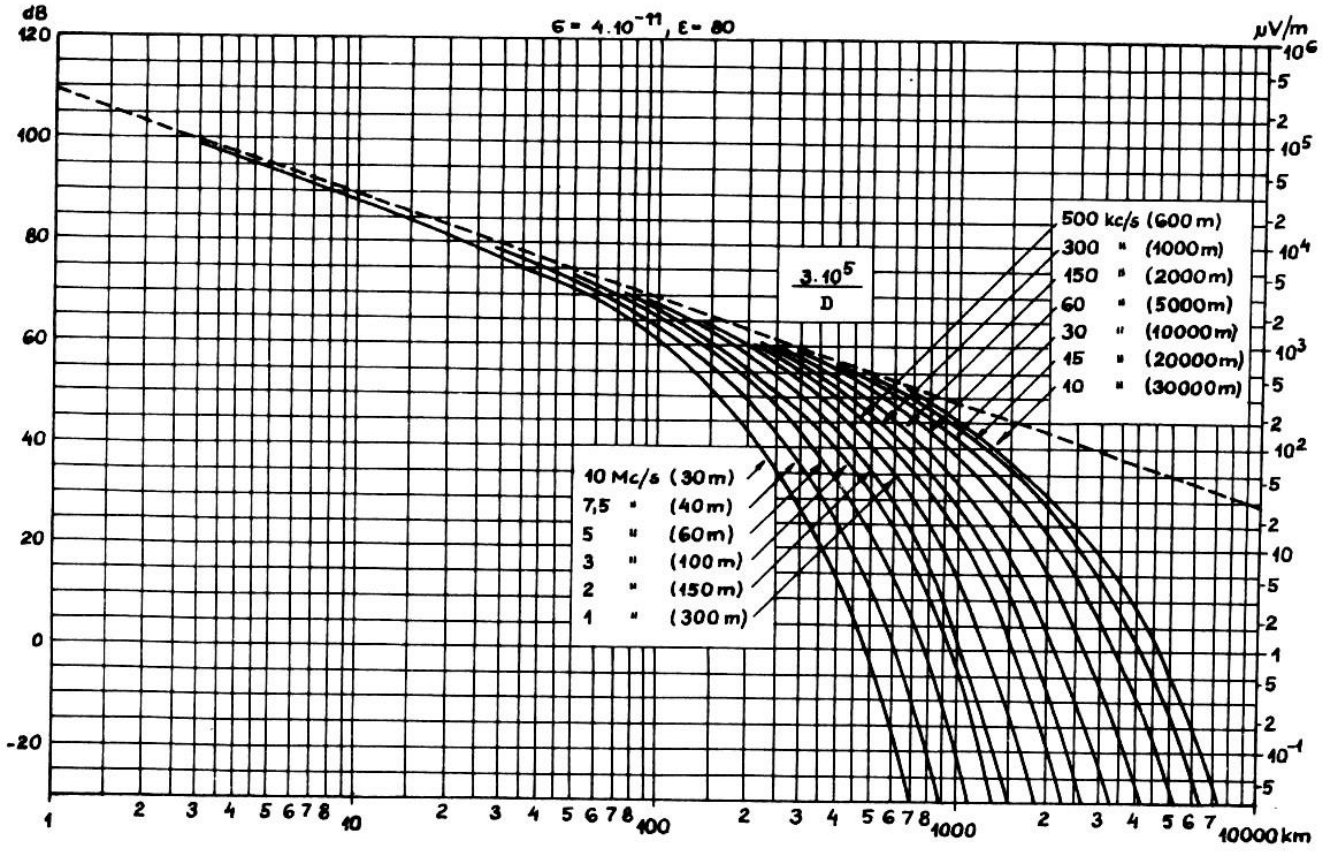
$$p = \frac{\pi \cdot d}{\lambda \cdot x} \cos b$$

$$b = \mathrm{arctg}\,\frac{\varepsilon_r - 1}{x}$$

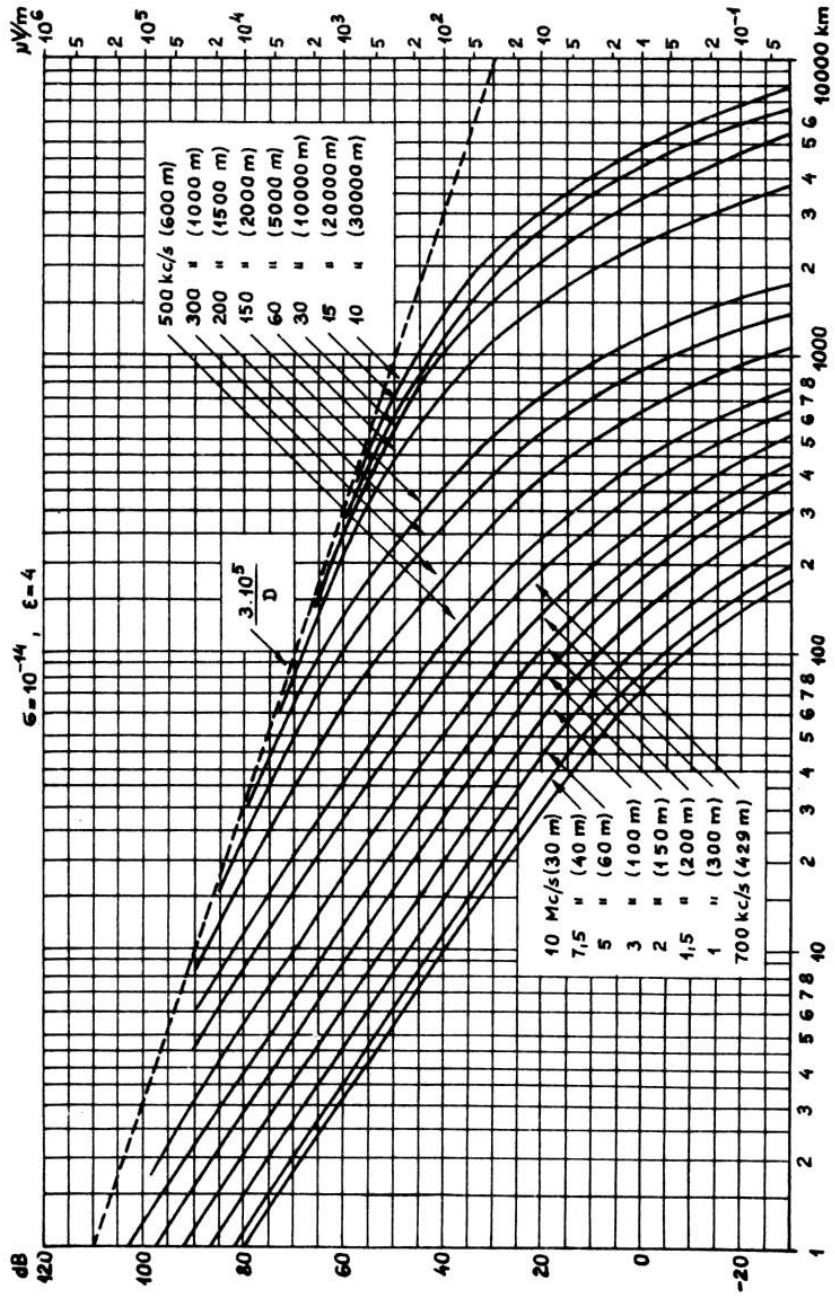
$$x = \frac{\sigma}{\omega \cdot \varepsilon_0} = 60 \cdot \sigma \cdot \lambda$$

Az előzőekben bemutatott sík földre vonatkozó modell $d|km = 80/\sqrt[3]{f|MHz|}$ határig használható, effölött Sommerfeld korrekciós tényezőt vezetett be.






Felületi hullámu térerősség a távolság függvényében 1 kW kisugárzott teljesitményre és $l < \lambda/4$ antennára




2.6. ábra

Felületi hullámu térerősség a távolság függvényében 1 kW kisugárzott teljesitményre és 1 λ/4 antennára

## 2.6. Troposzférikus szórás

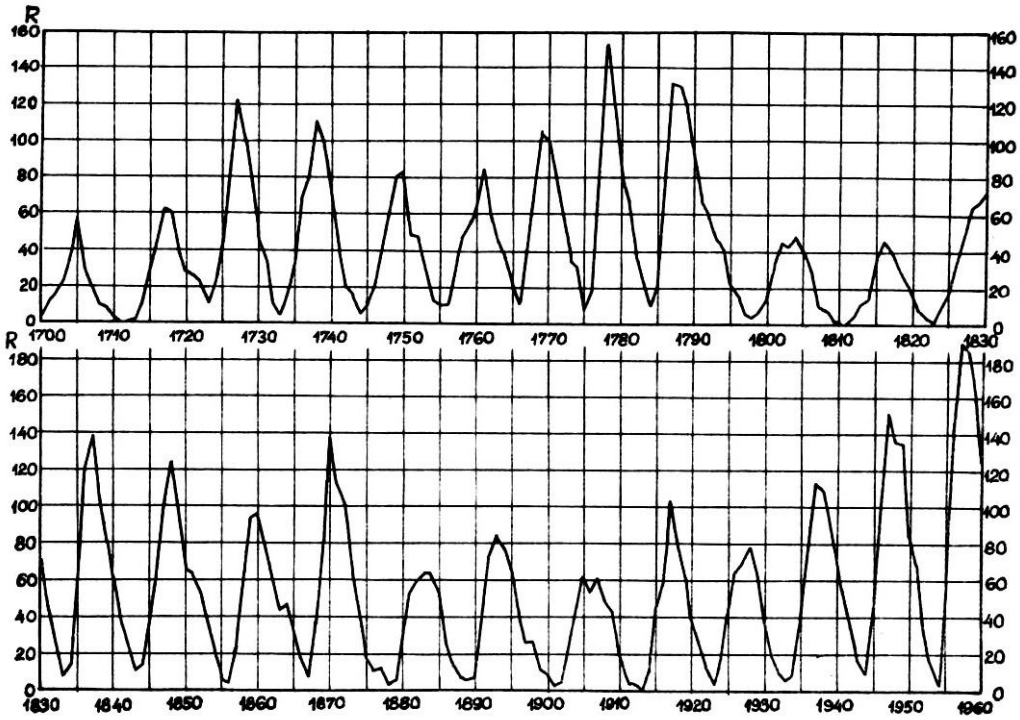
A horizonton túli távközlési összeköttetés egyik formája a troposzférikus szórással megvalósított összeköttetések. A jelenség akkor jön létre, ha az adó-, és vevőantenna nyalábja a közös szóró keresztmetszeten lapolódik át, mely a föld felszínétől 3-8 km magasságban helyezkedik el. A szóródás a törésmutató index véletlen változásából vagy fluktuációjából származik. Ezen változások oly csekély mértékűek, hogy az összeköttetés megvalósításához jelentős adóteljesítményre van szükség.

A troposzférikus szórással megvalósított összeköttetések a 200 MHz-10 GHz-es frekvenciatartományban üzemelnek. Alacsonyabb frekvenciájú működést a szükséges nagy nyereségű antennák jelentős mérete miatt a gyakorlatban nem alkalmaznak, nagyobb frekvenciákon pedig a szakaszcsillapítás válik túl naggyá.
A troposzférikus szórással megvalósított összeköttéseknél fellépő fading miatt általában diversity technikát alkalmaznak a vételnél.
A troposzférikus szórású összeköttetések tipikus szakasztávolsága több száz kilóméter, rendszerint nem nagyobb, mint 700 km. Az 1950-60-as években jelentős érdeklődés mutatkozott a troposzférikus szórású összeköttetések iránt, de a műholdas összeköttetések fejlődésével jelenleg kisebb igény mutatkozik irántuk.
Példa:
Egy troposzférikus szórású összeköttetés tipikus adatai:

$P_A$= 1 kW
$G_A$=$G_V$= $10^5$ (50 dB) (adó-, ill. vevőantenna nyeresége)
d = 400 km (szakasztávolság)
$\lambda$ = 0.1 m (3 GHz)
$C_n$ = $10^{-8}$ $m^{-1/3}$ (struktura állandó)
k = 4/3 (Földsugártényező)
$R_0$ = 6370 km (a Föld sugara)

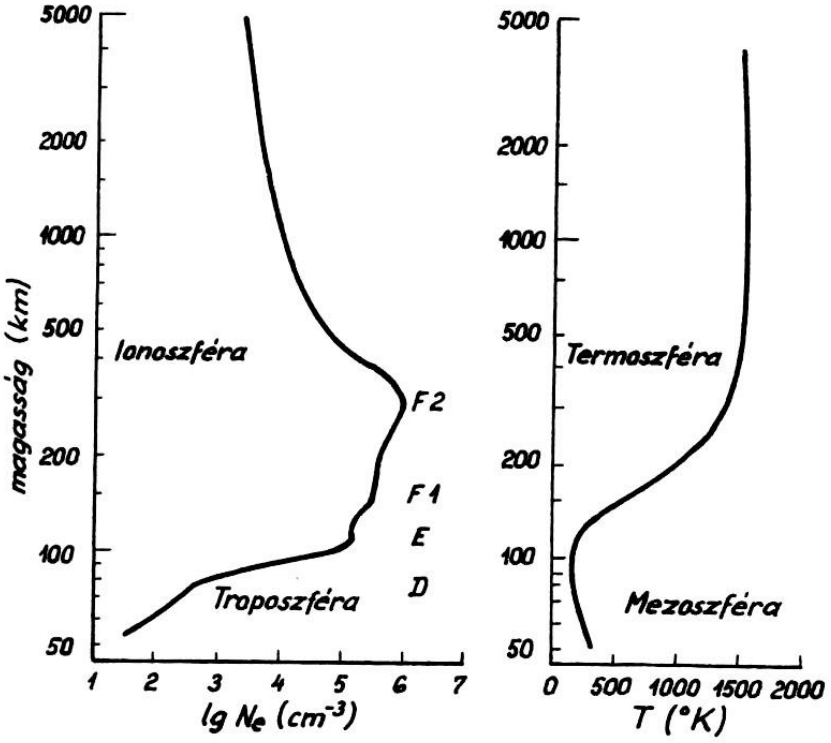
## 2.7. Ionoszférikus terjedés

Az ionoszféra a légkör 40-500 km-es rétege, amelyben a gázok részben ionizált állapotban vannak. Az ionizáció fő forrása a Nap ibolyán túli és részecskesugárzása (elektron, proton), ezenkívül meteor becsapódás.

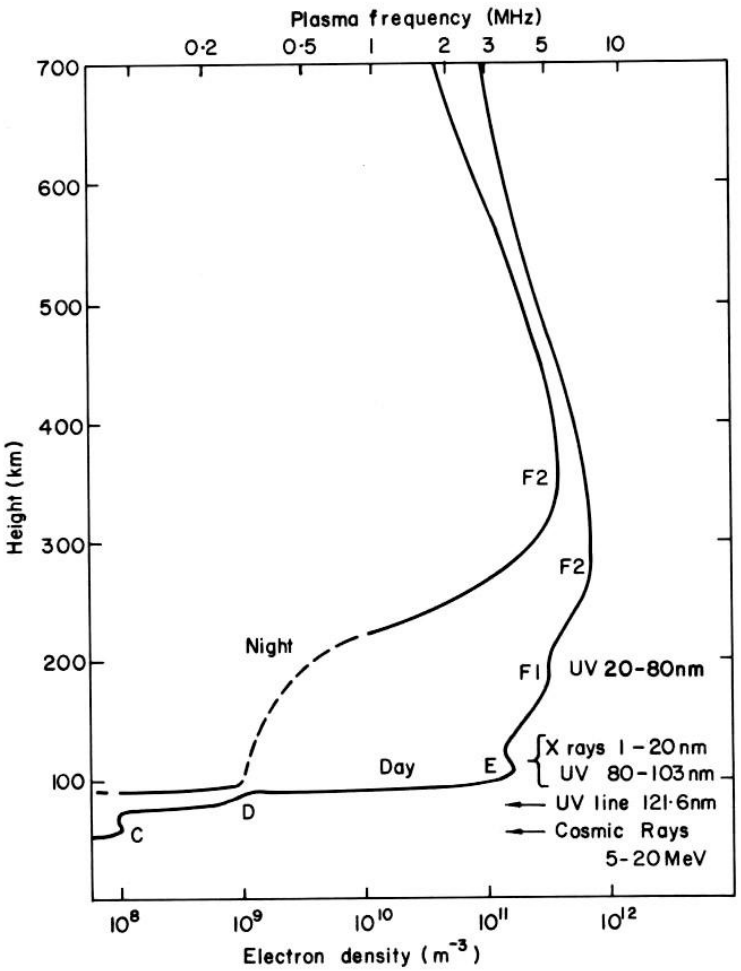



A napfoltszámok alakulása

Az ionoszférikus terjedési jelenségek leírására Kennely és Heaviside 1902-ben fiktív rétegeket tételezett fel. Az azóta elvégzett vizsgálatok kimutatták, hogy a Föld felszínétől felfelé haladva helyi ionizációs maximumok vannak.




**2.12. ábra** Az ionoszféra felépítése




Az ionoszférikus rétegek éjjel és nappal

*2.7.1. A rétegek leírása*

*A D réteg*

A Földhöz legközelebbi, legkevésbé ionizált réteg, melynek magassága 70-100 km. Csak nappal létezik és jelentős csillapítást okoz a rajta történő áthaladáskor. Ezen tulajdonsága következtében nappal gyakorlatilag nem lehetséges a középhullámú távolsági vétel. A csillapítás maximuma 1 MHz-nél van.

*Az E réteg*

Az E réteg magassága 100-150 km, stabil réteg, melynek magassága nem változik számottevően sem a földrajzi helyzet, sem napszak, sem az évszak függvényében. Az E réteg kritikus frekvenciája nullától (hajnal előtt) maximumig (kevéssel dél után) növekszik, majd újra nulláig csökken.

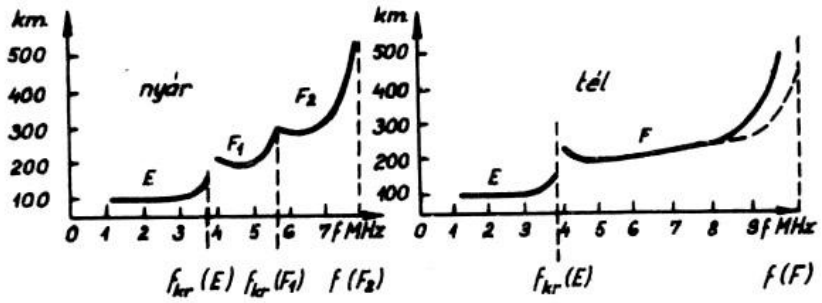
*Az $F_1$ réteg*

Az $F_1$ réteg magassága 200-300 km.

*Az $F_2$ réteg*

Az $F_2$ réteg magassága 300-600 km, és ez a réteg, mely a nagytávolságú rövidhullámú összeköttetések fő közvetítő rétege.

*2.7.2. Ionoszféra mérések*




**2.13. ábra** Ionoszféra mérések (ionogram)

Az m tömegű, -e töltésű elektron v sebességgel mozog egy E elektromos téren keresztül.

$$m \cdot \frac{d\mathbf{v}}{dt} = -e \cdot \mathbf{E} \tag{2.40}$$

Szinuszos térre:

$$j\omega m\mathbf{v} = -e \cdot \mathbf{E} \tag{2.41}$$

Térfogategységenként N elektront feltételezve, az áramsűrűség:

$$\mathbf{J} = -eN\mathbf{v} = \frac{Ne^2}{j\omega m}\mathbf{E} \tag{2.42}$$

A Maxwell egyenleteket felhasználva:

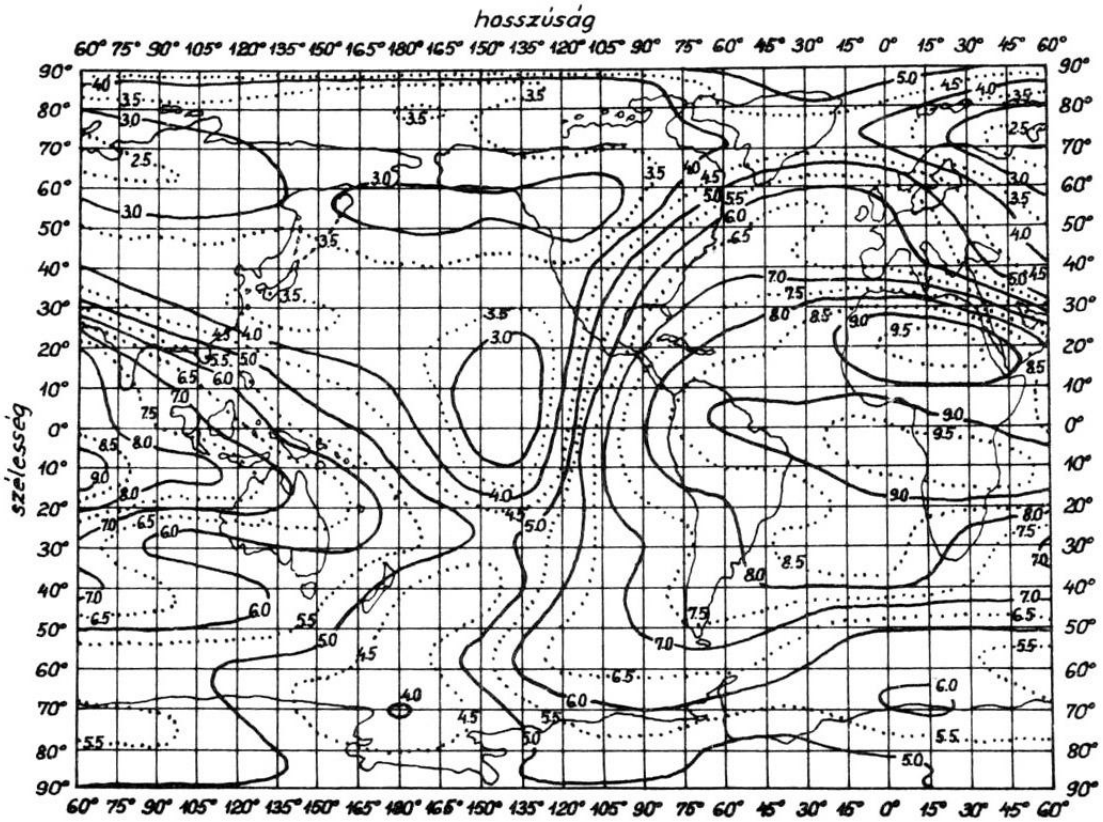
$$\text{rot}\,\mathbf{H} = j\omega\varepsilon_0\mathbf{E} + \mathbf{J} = j\omega\varepsilon_0\left(1 - \frac{Ne^2}{\omega^2 m\varepsilon_0}\right)\mathbf{E} \tag{2.43}$$

Így az ionizált gáz dielektromos állandója:

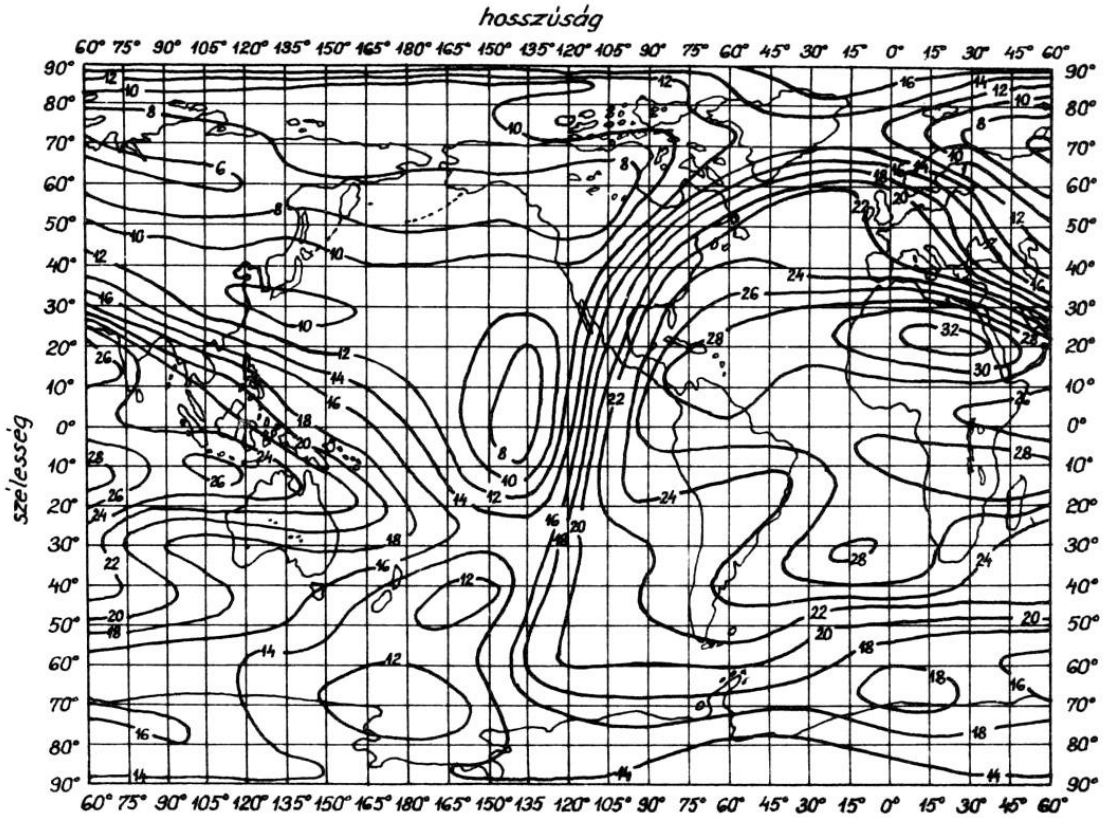
$$\varepsilon^* = 1 - \frac{Ne^2}{\omega^2 m\varepsilon_0} = 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2} \tag{2.44}$$

ahol

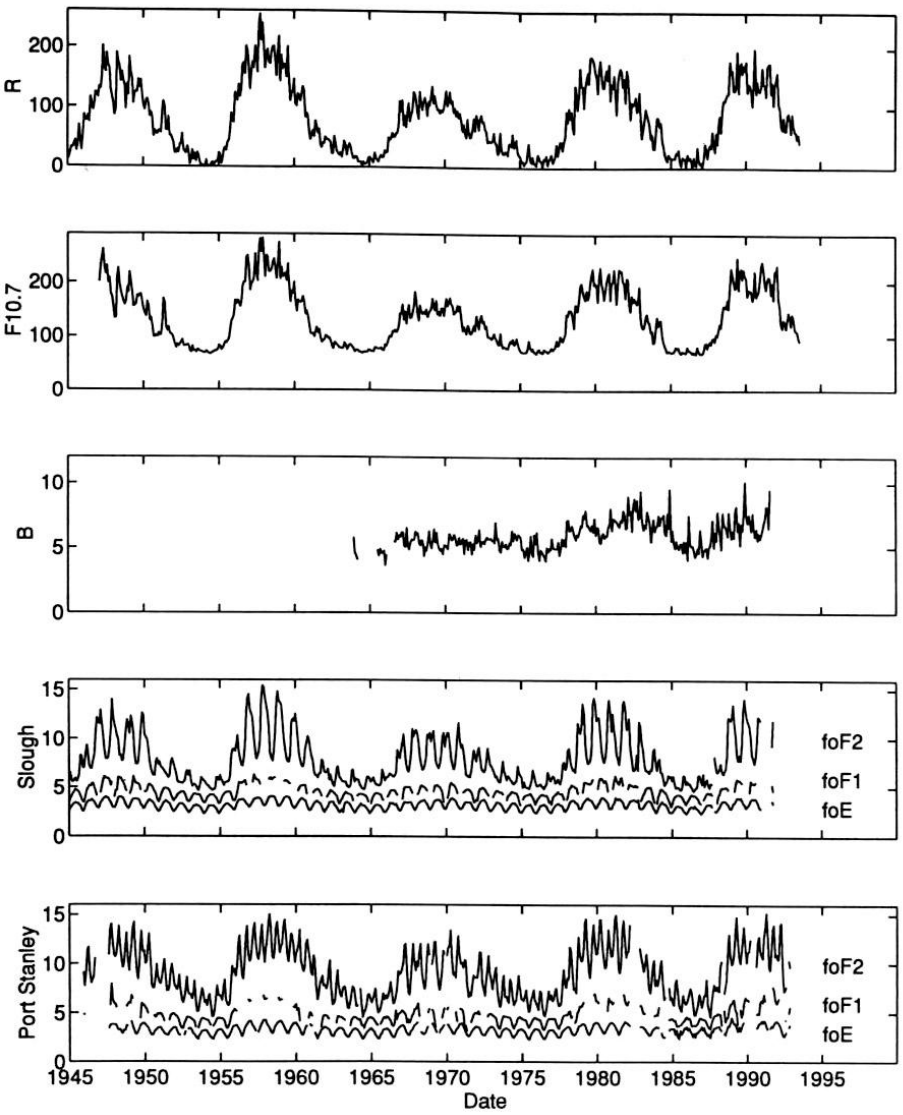
$\omega_p$ a plazma frekvencia $\omega_p = \sqrt{Ne^2 / m\varepsilon_0}$




Az $F_2$ réteg MUF értéke




Az $F_2$ réteg 4000 km-es összeköttetésre használható $MUF_{4000km}$ értéke




A napfoltszám és kritikus frekvenciák összefüggése

## 2.8. Terepakadályok hatása

A hullámokat a szabad terjedésben a sík talajon kívül talajegyenetlenség ill. benyúló tereptárgyak is akadályozhatják.
A talaj egyenetlenségét a sík felületre kapott talajreflexiós tényező módosításával, az akadályok hatását késél (2.14. ábra), parabolikus henger vagy dielektromos ék modellel vesszük figyelembe.

**Diffrakció**

### *2.8.1. A Fresnel zóna*

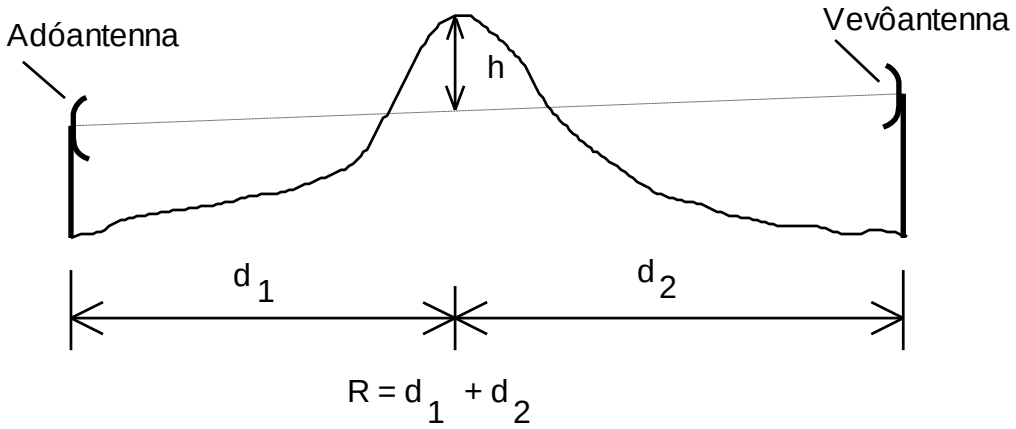
Ha a terjedő hullámra az első Fresnel zóna szabad, akkor a teljesítmény 95-98%-a eljut a vevőantennához.

Az M-dik Fresnel zóna sugara:

$$r_m = \sqrt{\frac{M\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \qquad (2.45)$$

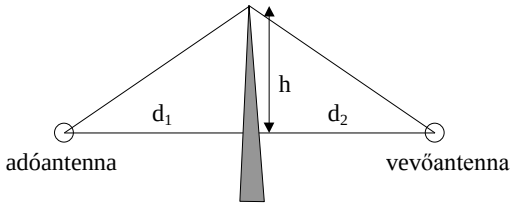
Az 1. Fresnel zóna sugara:

$$r_1 = \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad \rightarrow \quad \nu = \sqrt{2}\frac{h}{r_1} = h\sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}} \tag{2.46}$$

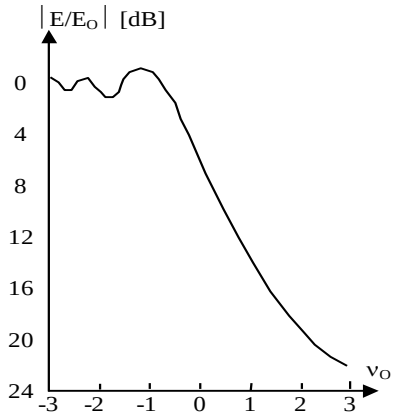



2.14. ábra Diffrakciós csúcs

A Huygens elv értelmében a terjedő hullám frontja új hullámforrásként viselkedik és így az elektromágneses hullámok ezen új forrásokból származó hullámok szuperpozíciójaként állítható elő.




2.15. ábra Diffrakciós geometria




2.16. ábra Diffrakciós többletcsillapítás a késél relatív benyúlásának függvényében

Fresnel geometriai diffrakcióelmélete értelmében a 2.15. ábrán látható geometriára a vételi térerősség a következő Fresnel integrállal írható fel.

$$\frac{E}{E_o} = \frac{1}{1-j}\int_{\nu_o}^{\infty} \exp(-j\frac{\pi}{2}\nu^2)d\nu \tag{2.47}$$

ahol az 1. Fresnel zóna sugara $r_1$ és az akadály relatív benyúlása $\nu_o$:

$$r_1 = \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} \quad \rightarrow \quad \nu_o = \sqrt{2}\frac{h}{r_1} = h\sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}} \tag{2.48}$$

A késélként modellezett diffrakciós csúcs által okozott többletcsillapítás (szabadtéri térerősséghez képest) a késél $\nu_0$ relatív magasságának függvényében a 2.16. ábrán látható. A $\nu_0$ paraméter a késélnek a Fresnel

ellipszisekbe való relatív benyúlását adja meg, mely pozitív, ha a késél a látóvonal fölé nyúlik, negatív, ha a késél a látóvonal alatt helyezkedik el.

A diffrakciós többletcsillapításkiszámításának lépései ezután:

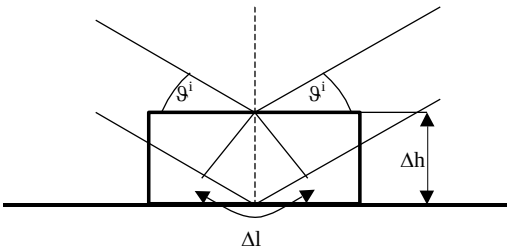
Az 1. ábrának megfelelően a terepmetszetből a szakasztávolságot és a diffrakciós csúcs benyúlásának mértékét kell leolvasni.

A késélként modellezett diffrakciós csúcs által okozott többletcsillapítás (szabadteri térerősséghez képest) a késél $\nu_0$ relatív magasságának függvényében a (2.47) képlettel, a (2.49) közelítő kifejezéssel, vagy a 2.16. ábrából határozható meg.

$$20\lg\left[E(\nu)/E_o\right]=\begin{cases} 20\lg(0.5-0.62\nu) & -0.8<\nu<0 \\ 20\lg\left[0.5\exp(-0.95\nu)\right] & 0<\nu<1 \\ 20\lg\left[0.4-\left\{0.1184-(0.38-0.1\nu)^2\right\}^{1/2}\right] & 1<\nu<2.4 \\ 20\lg\left[0.225/\nu\right] & \nu>2.4 \end{cases} \tag{2.49}$$

**Szóródás**

A szóródást lényegében egyenetlen felületen történő rendezetlen reflexiók együtteseként kezelhetjük. A vizsgálataink föleg a felületi egyenetlenség jellemzésével foglalkoznak és a Rayleigh kritériumot alkalmazzuk a felület síma ill. egyenetlen voltának eldöntésére. Ha a felület egyes pontjaiból reflexióval származó hullámösszetevők közötti maximális fáziseltérés $\pi/2$-nél kisebb, akkor a felület síknak tekinthető, ellenkező esetben egyenetlen. A fáziseltérésből az úthosszkülönbségekre $\lambda/4$ adódik.




2.17. ábra Talajegyenetlenség modellje

A talajegyenetlenségből következő hullámösszetevők úthosszkülönbsége a 2.17. ábrából $\Delta l = 2\cdot\Delta h\cdot\sin\vartheta^i$ , így a Rayleigh kritériumból következő maximális megengedett talajegyenetlenség $\Delta h = \dfrac{\lambda}{8\sin\vartheta^i}$.

Egyenetlen felületekre a felület magassági eloszlását Gauss eloszlásként modellezik, a szórási veszteség $\rho_s$ megadható

$$\rho_s = \exp\left[-8\left(\frac{\pi\sigma_s\sin\vartheta^i}{\lambda}\right)^2\right] \tag{2.50}$$

ahol $\sigma_s$ a felület magasságának szórása. Így az egyenetlen felületről történő szórás reflexiós tényezője

$$\Gamma_{egyenetlen} = \rho_s\cdot\Gamma_{sík} \tag{2.51}$$