

Űrkommunikáció Space Communication 2023/13.

Dr. János Bitó

bito.janos@vik.bme.hu

Dept. of Broadband Infocommunications and Electromagnetic Theory

A rádiócsatorna 2/1

A rádiócsatorna alapvetően az a közeg, amely az adó- és a vevőantenna között terjedő rádióhullámok tulajdonságait (amplitudó, fázis, polarizáció) meghatározza.

a_0 - szabadtéri csillapítás

a_{sz} – szakaszcsillapítás

a_s - rendszer csillapítás

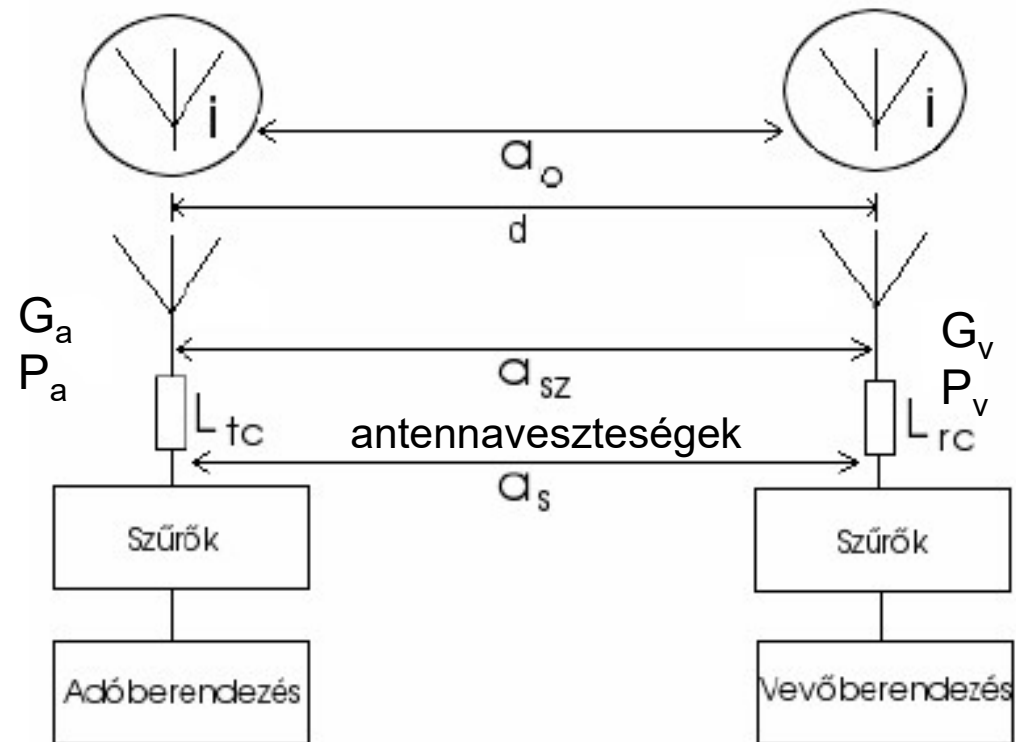
P_a - az adóantennába betáplált teljesítmény

P_v - a vevőantennából kivehető maximális hatásos teljesítmény

G_a -az adó antenna nyeresége

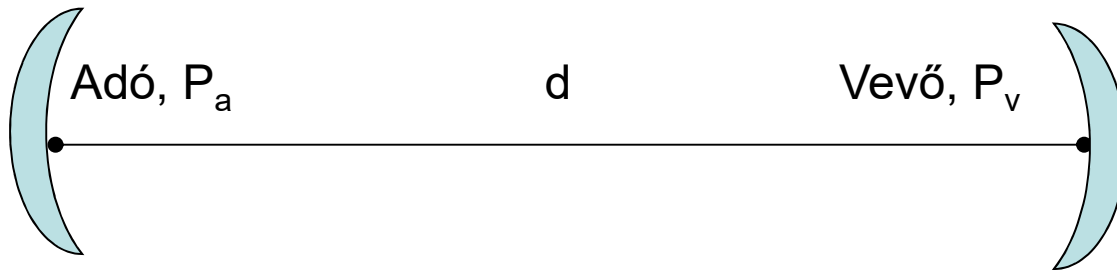
G_v - a vevő antenna nyeresége

d - az antennák közötti távolság



Az antenna 2/1

- A tápvonal és a szabad tér között elhelyezett transzformátor, a hozzávezetett energiát sugárzott elektromágneses hullámmá, a vevőantenna a beeső elektromágneses hullámot vezetett hullámmá alakítja át.
- Izotróp antenna: minden irányban azonosan sugároz
- Az adóantenna által kisugárzott teljesítmény nagysága, valamint a vevőantenna érzékenysége irányfüggő. Az antennának ezt a tulajdonságát az iránykarakterisztikájával fejezzük ki. (térbeli szűrő)



Csillapítás veszteségmentes közegben (űrben):

$$a_0 = \frac{P_a}{P_v}$$

Az izotróp antenna által d távol előálló teljesítménysűrűség:

$$S_0 = \frac{P_a}{4\pi d^2}$$

Vett teljesítmény
(izotróp antenna):

$$P_v = S_0 A_{eff}$$

A_{eff} :

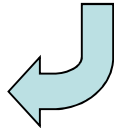
az antenna hatásos felülete

Az antenna 2/2

Az antenna nyeresége: $G^{[dB]} = 10 \lg \frac{S_{\max}}{S_0}$ S_{\max} : a főirányba sugárzott teljesítménysűrűség

Vett teljesítmény (irányított antenna): $P_v = S_0 A_{\text{eff}} G_a$

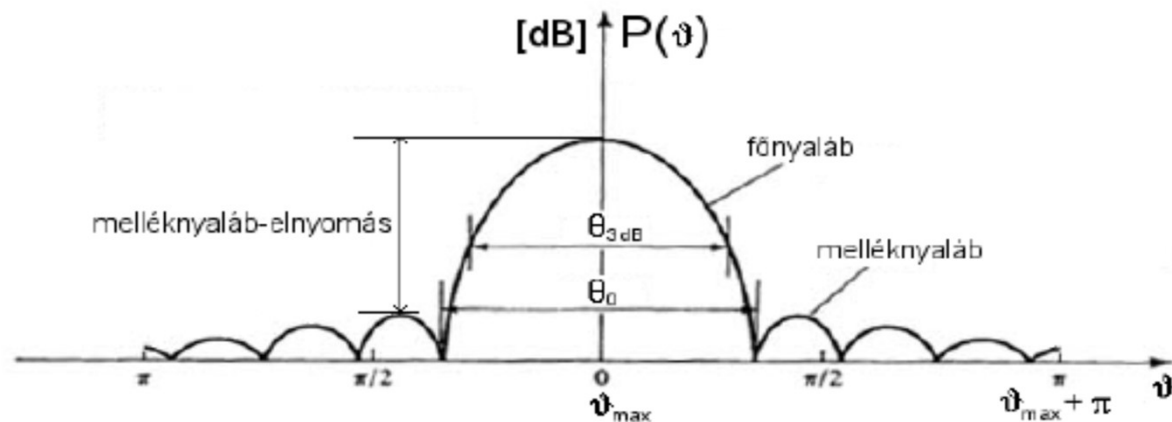
Csillapítás: $a_0 = \frac{P_a}{P_v} = \frac{P_a}{\frac{P_a A_{\text{effv}}}{4\pi d^2} G_a} = \frac{4\pi d^2}{A_{\text{effv}} G_a} = \frac{4\pi d^2}{A_{\text{effa}} G_v}$

Hatásos felület/nyereség: $\frac{A_{\text{effa}}}{G_a} = \frac{A_{\text{effv}}}{G_v} = \frac{\lambda^2}{4\pi}$ 

Hatásfok: $\eta = \frac{A_{\text{eff}}}{A} = \frac{A_{\text{eff}}}{r^2 \pi}$

Teljesítmény iránykarakterisztika:

$$P(\vartheta, \varphi) = \frac{S(r, \vartheta, \varphi)}{S_{\max}(r)}$$



A rádiócsatorna 2/2

- a rádióhullámok az adóantennától a vevőantennáig csillapítást szenvednek
- a szakaszcsillapítás jelentős részét a szabadtéri csillapítás határozza meg

Szakaszcsillapítás:

$$a_{sz}^{dB} = 10 \lg \frac{P_a}{P_v}$$

A szabadtéri csillapítás nagysága
izotróp antennákat feltételezve:

$$a_0 = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2$$

d : szakaszhossz λ : hullámhossz

Szakaszcsillapítás:

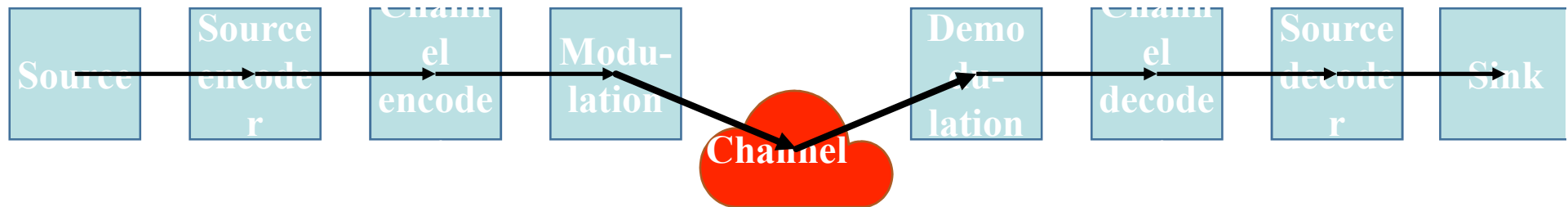
$$a_{sz} = \frac{P_{be}}{P_{ki}} = \left(\frac{4\pi d}{\lambda} \right)^2 \frac{1}{G_a G_v}$$

decibelben:

$$a_{sz} = 20 \lg \frac{4\pi d}{\lambda} - G_a^{dB} - G_v^{dB}$$

$$a_{sz}^{dB} = 32.44 + 20 \lg f^{MHz} + 20 \lg d^{km} - G_A^{dB} - G_v^{dB}$$

System model



Properties of wireless transport medium (channel)



Time-variance:

- motion
- properties of transport medium:
 - ionosphere, meteorological effects etc.

Linear:

- time delay
- amplitude attenuation

Fading: a szakaszcsillapítás időbeli változása

Fading: a rádiócsatorna csillapításának időbeni változása

$$a_{sz} = 20 \lg \frac{4\pi d}{\lambda} - G_a^{dB} - G_v^{dB}$$

$$a_{sz} = a_0 A(t, f) \quad \begin{array}{l} \text{Időtől és frekvenciától függő} \\ \text{fading folyamat} \end{array}$$

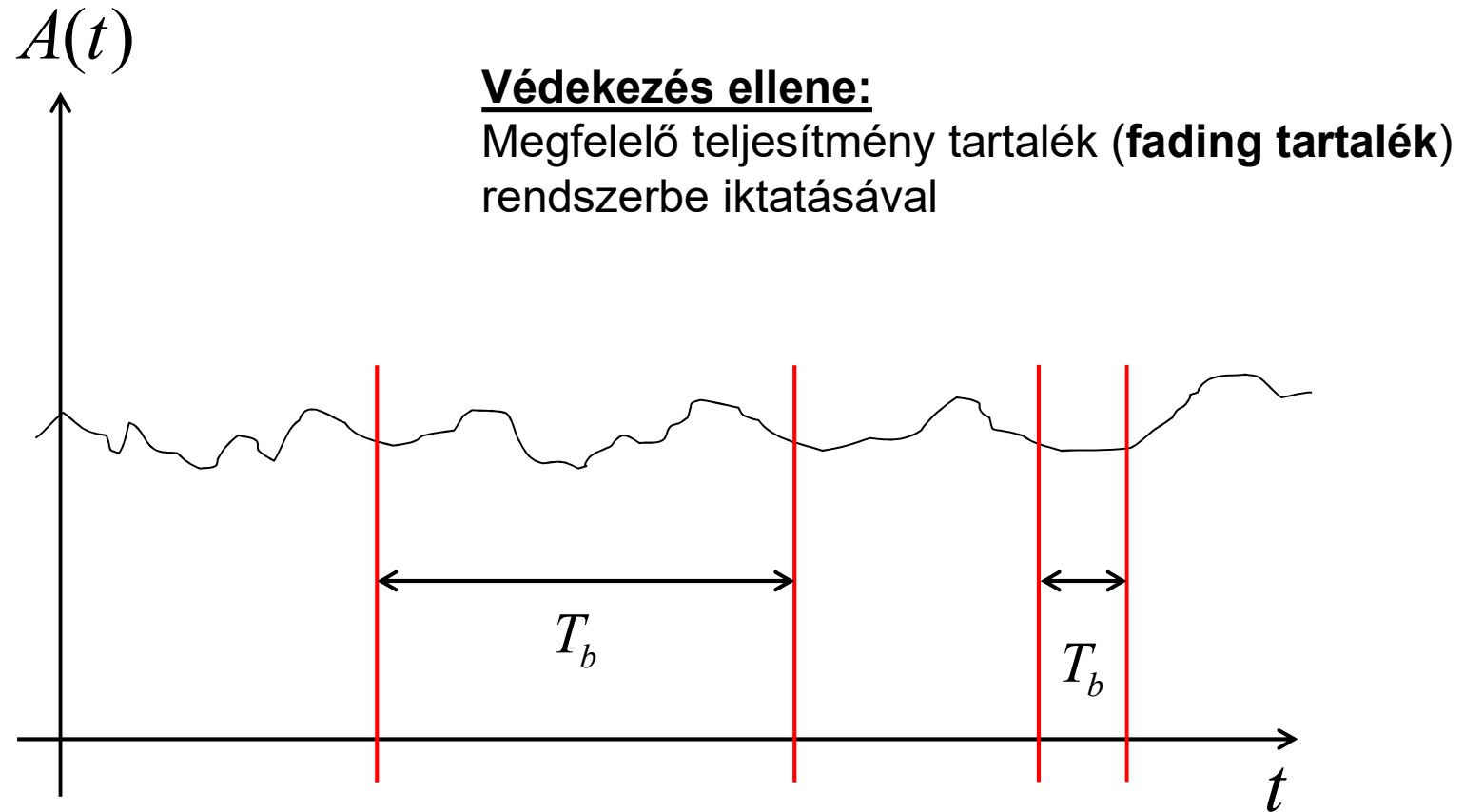
A fading, mint sztochasztikus folyamat osztályozása:

- Időben gyors / lassú (bitidőhöz viszonyítva)
- Frekvenciában szelektív / frekvencia független (sávszélességhez viszonyítva)

Tipikus Fading sztochasztikus folyamatok

- Többutas terjedés
 - WSSUS csatorna modell
 - Szcintilláció
 - Ionoszférikus
 - Atmoszférikus
 - Légköri gázok csillapító hatása
 - oxigén molekula
 - Vízgőz, etc...
 - Meteorológiai hatások (Klímaváltozás hatása)
 - Eső
 - Havas eső
 - Köd
 - Légköri turbulenciák, etc...
-
- Vegetáció hatása

Időben gyors és lassú fading

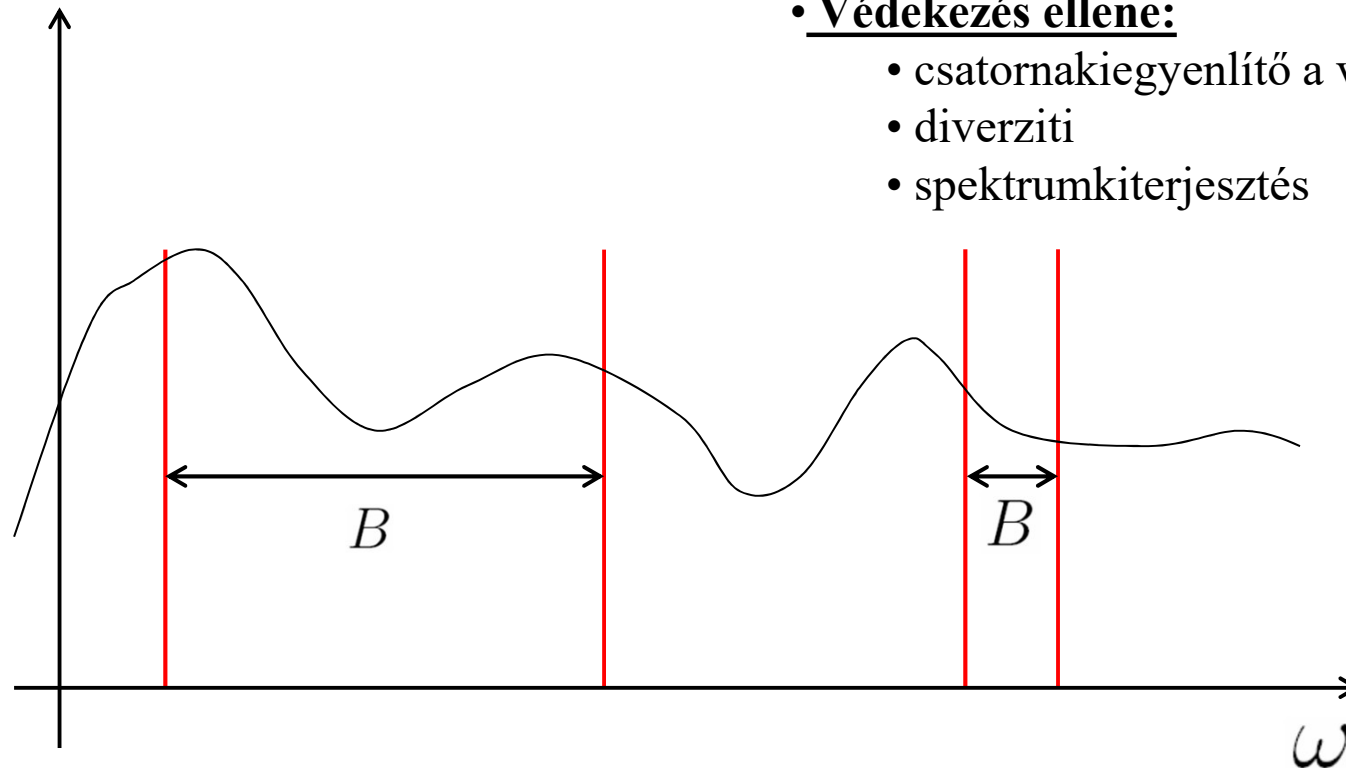


Időben gyors fading
 T_b : bitidő
(Mobil rádiócsatorna)

Időben lassú fading
 T_b : bitidő
(fix rádiócsatorna)

Frekvenciában szelektív és frekvenciában nem szelektív fading

$$A(\omega) = \mathcal{F}\{A(t)\}$$



Frekvenciában szelektív fading
 B : alkalmazott sávszélesség

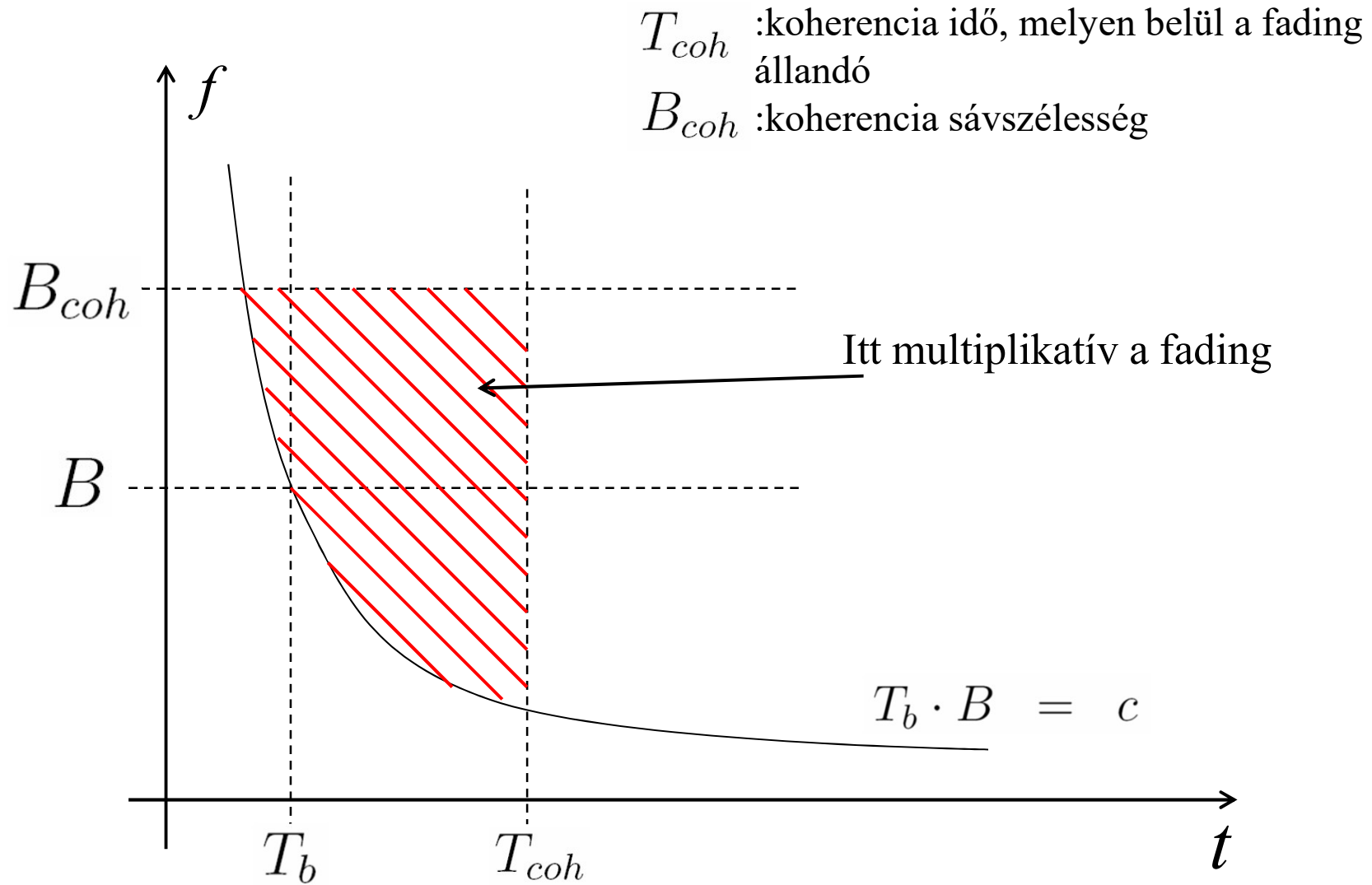
Frekvenciában nem szelektív fading
 B : felhasznált sávszélesség

- A frekvenciafüggetlen fading nemlineáris torzítást és ISI-t okoz

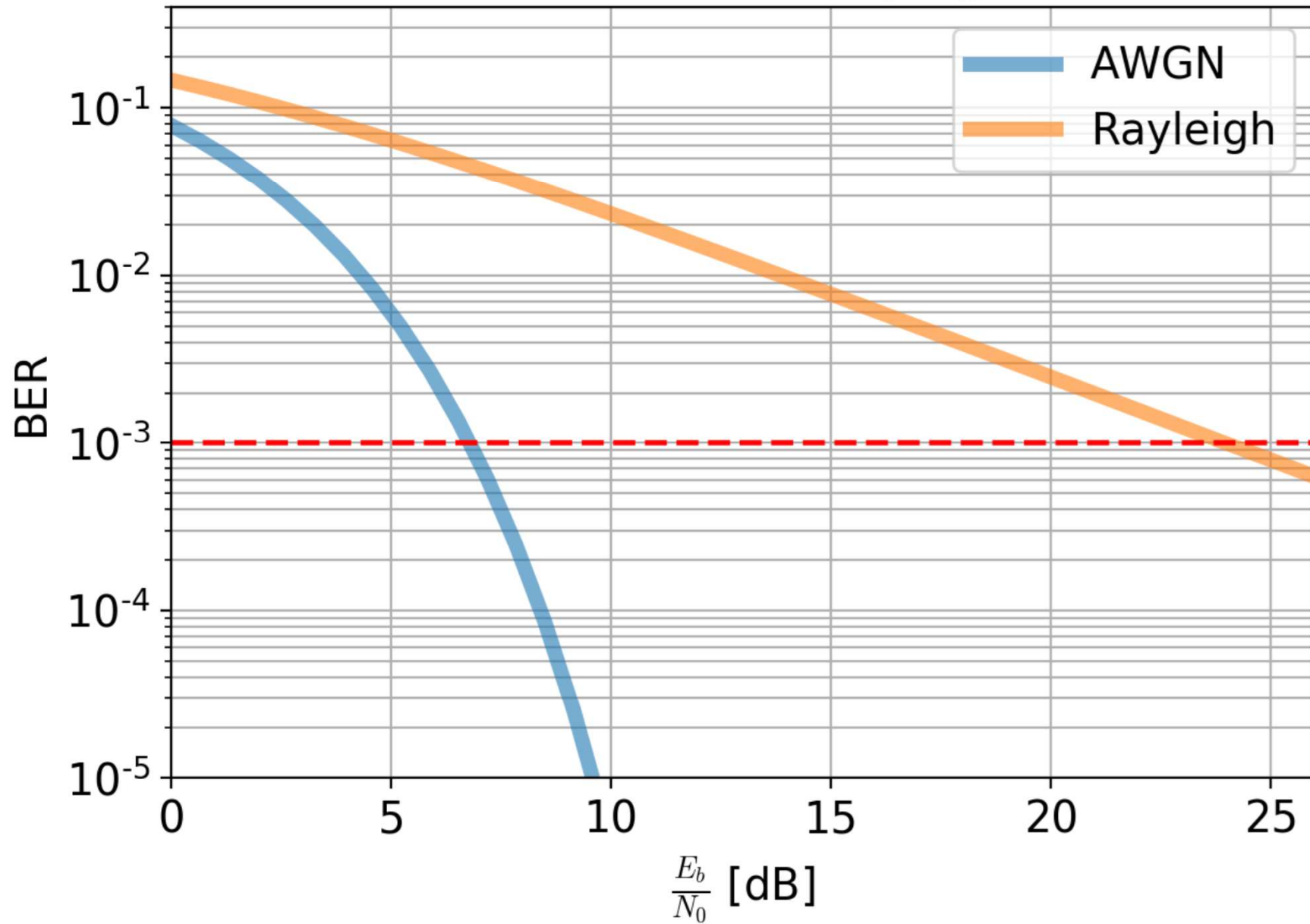
- **Védekezés ellene:**

- csatornakiegyenlítő a vevőbe
- diverziti
- spektrumkiterjesztés

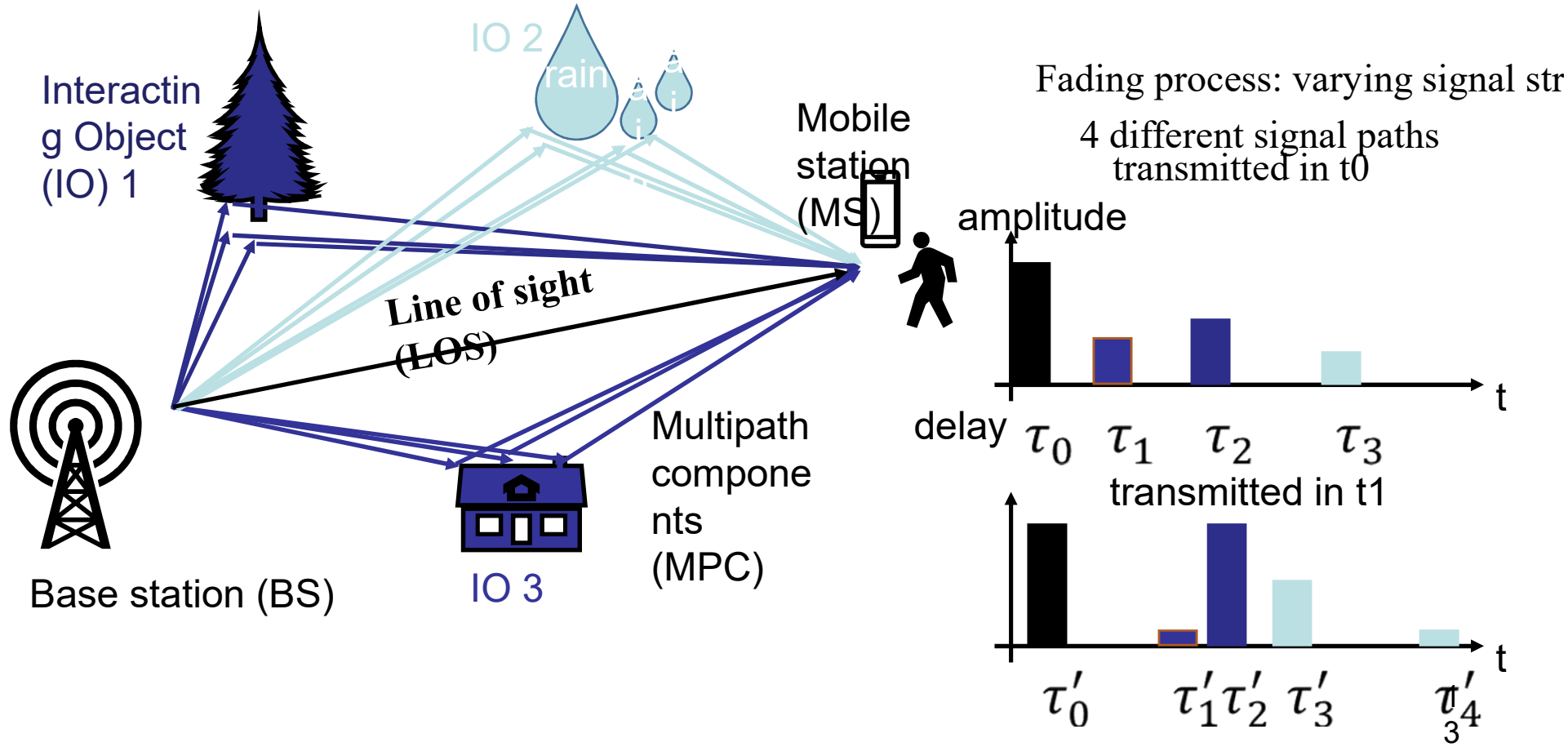
- Megvalósítható rendszer a Nyquist feltétel miatt: $T_b \cdot B = c$ egyenletű hiperbola felett



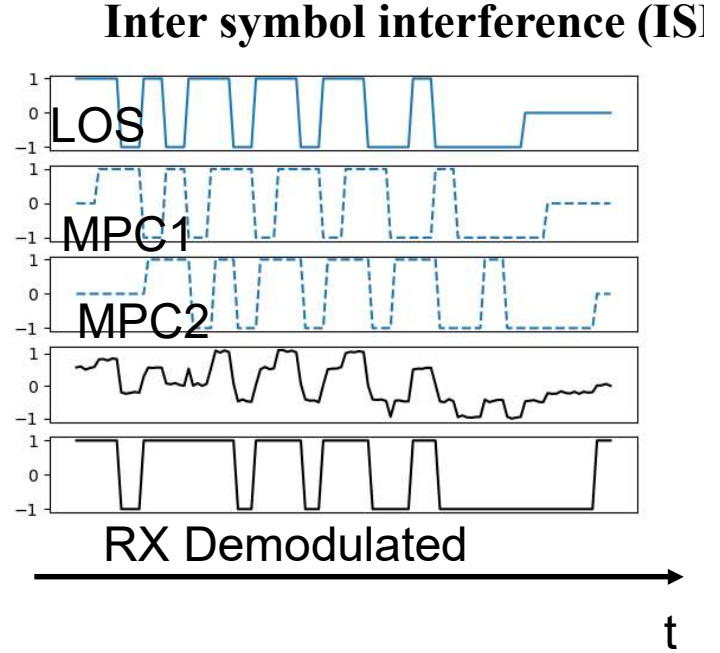
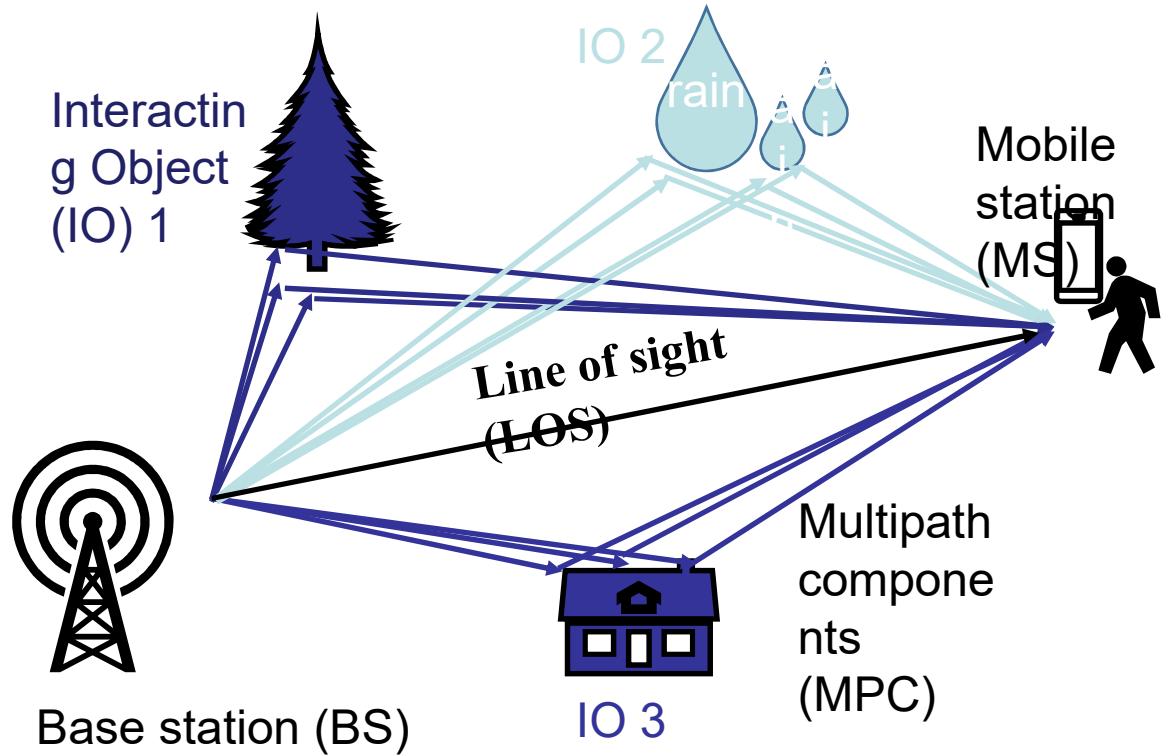
BPSK AWGN vs. Rayleigh



Fading

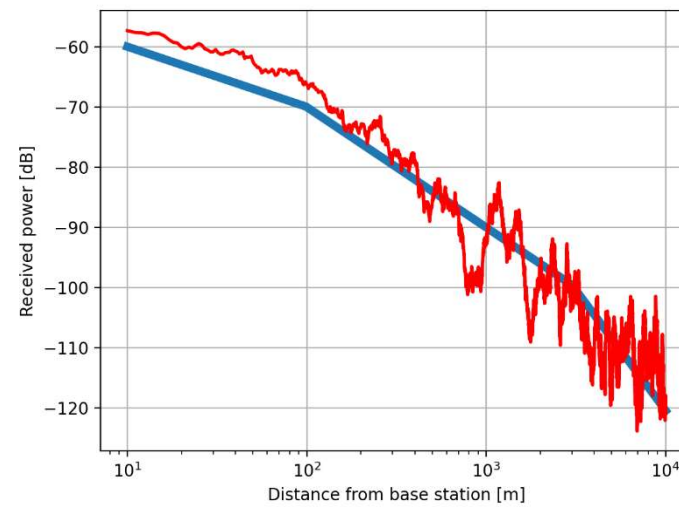
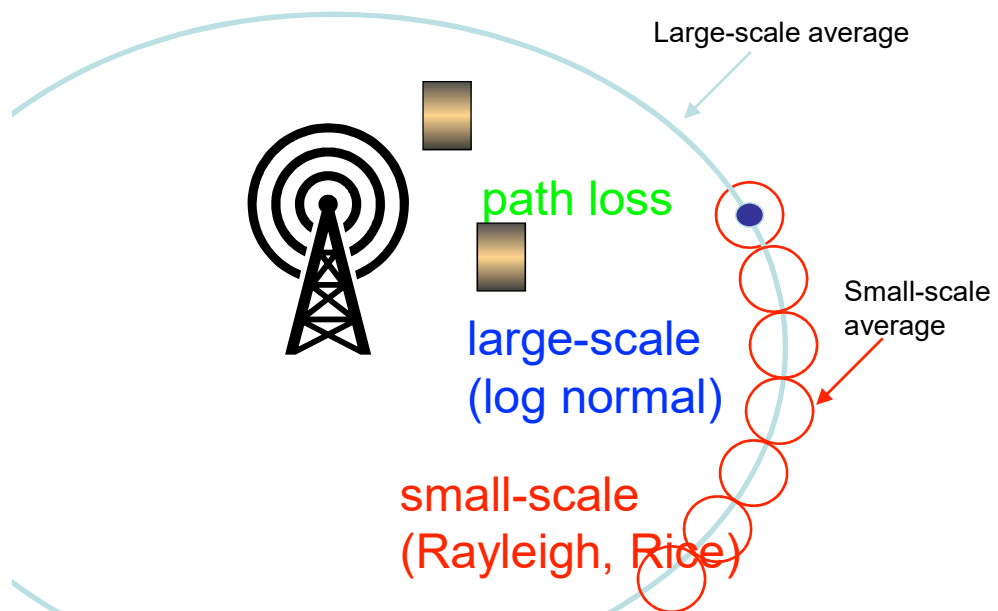


Fading

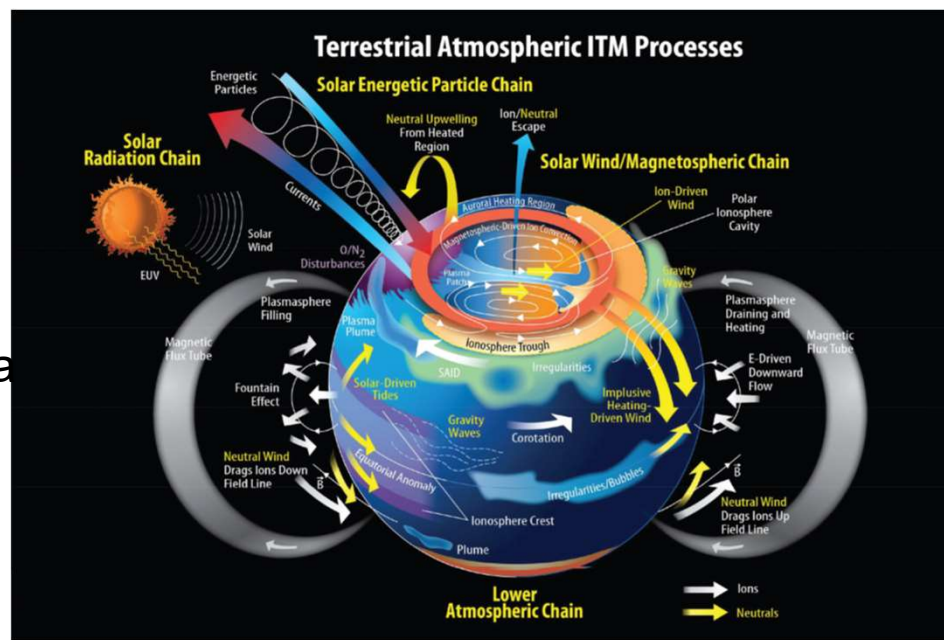


Fading

- Large/small-scale fading

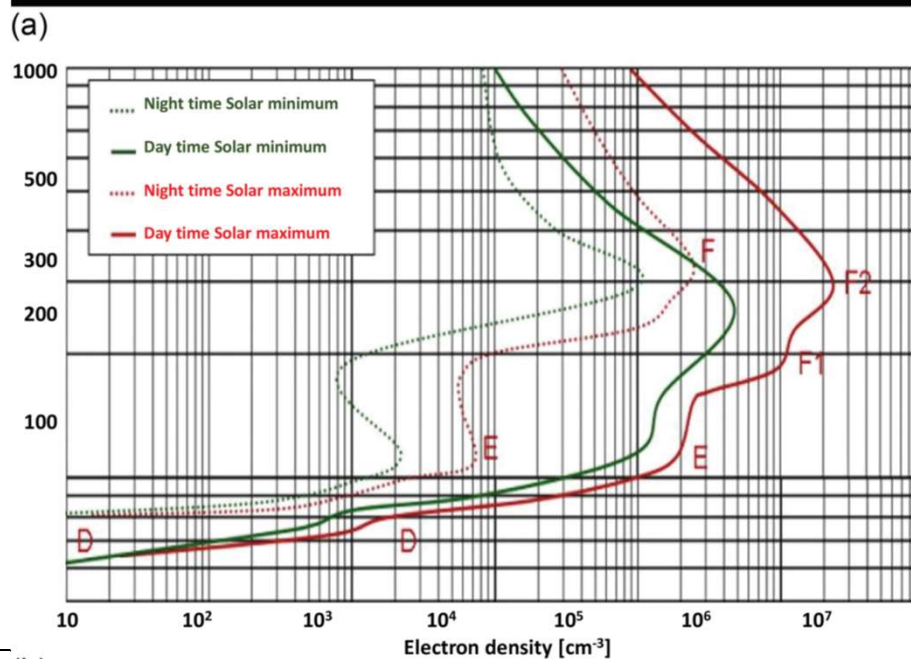


Ionospheric scintillations are the random intensity (I) and phase (σ_ϕ) fluctuations suffered by electromagnetic waves traversing the ionosphere due to irregularities of the electron content density, mostly originated by the solar activity and plasma irregularity processes.



(a) Indication of the complexity of the ionosphere-thermosphere-mesosphere (ITM) system of planet Earth and the range of physical processes operating. Credits: NASA's Goddard Space Flight Center/Mary Pat Hrybyk-Keith [<https://svs.gsfc.nasa.gov/12960>].

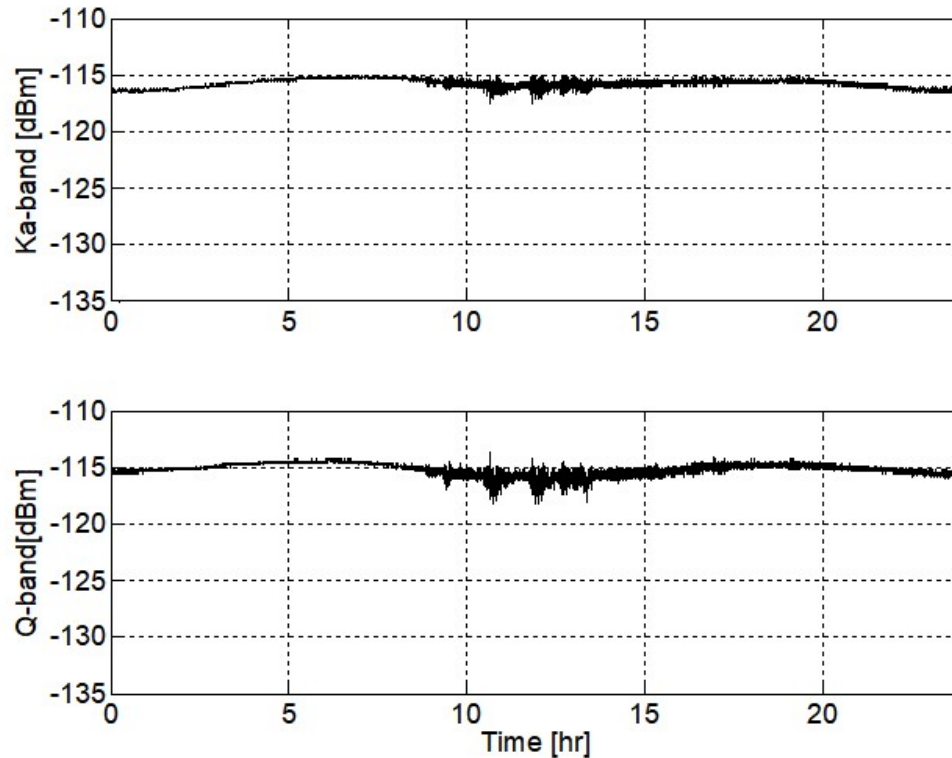
(b) Typical electron density profile in the ionosphere and ionospheric layers during day/night (from <https://sidstation.loudet.org/ionosphere-en.xhtml>).



(b)

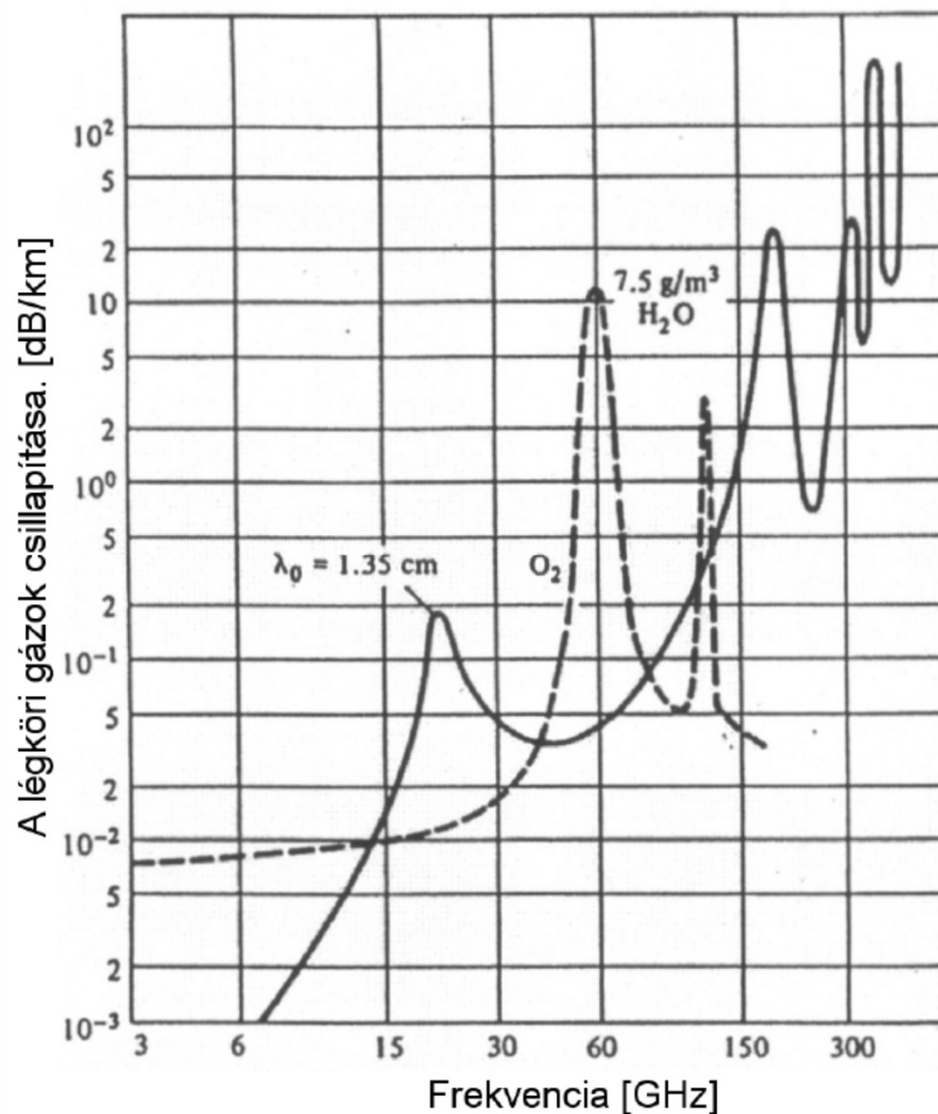
Ionoszférikus szcintilláció

- AlphaSat Geo szinkron műhold, Ka-sáv: 19.701 GHz / Q-sáv: 39.402 GHz
- Júliusi napon készült, jól látszik a szcintilláció megjelenése amikor a levegő kezd felmelegedni.
- A szinuszos jellegű változás követési pontatlanság/vevő melegedés hatása lehet.

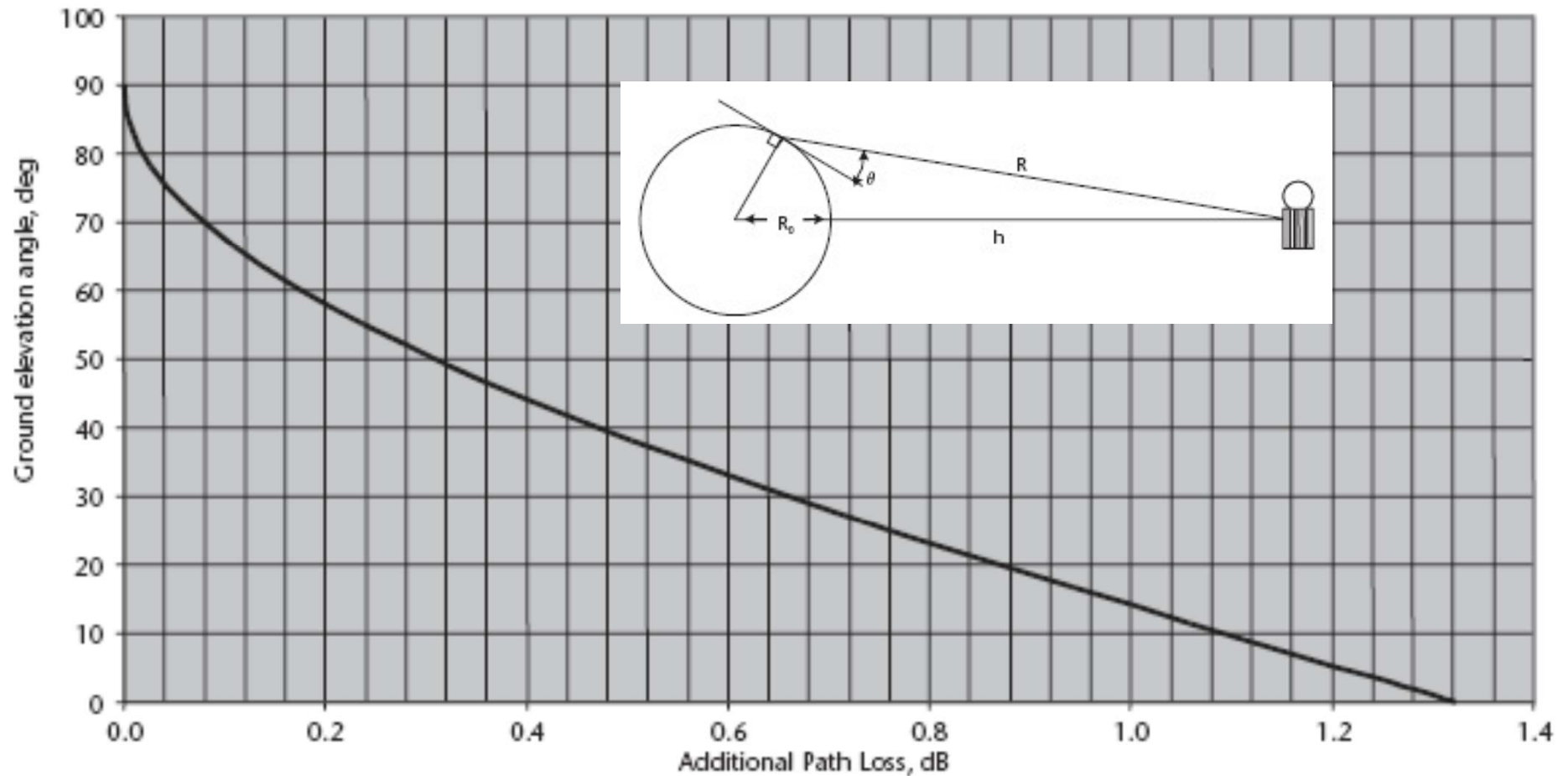


A légköri gázok csillapító hatása

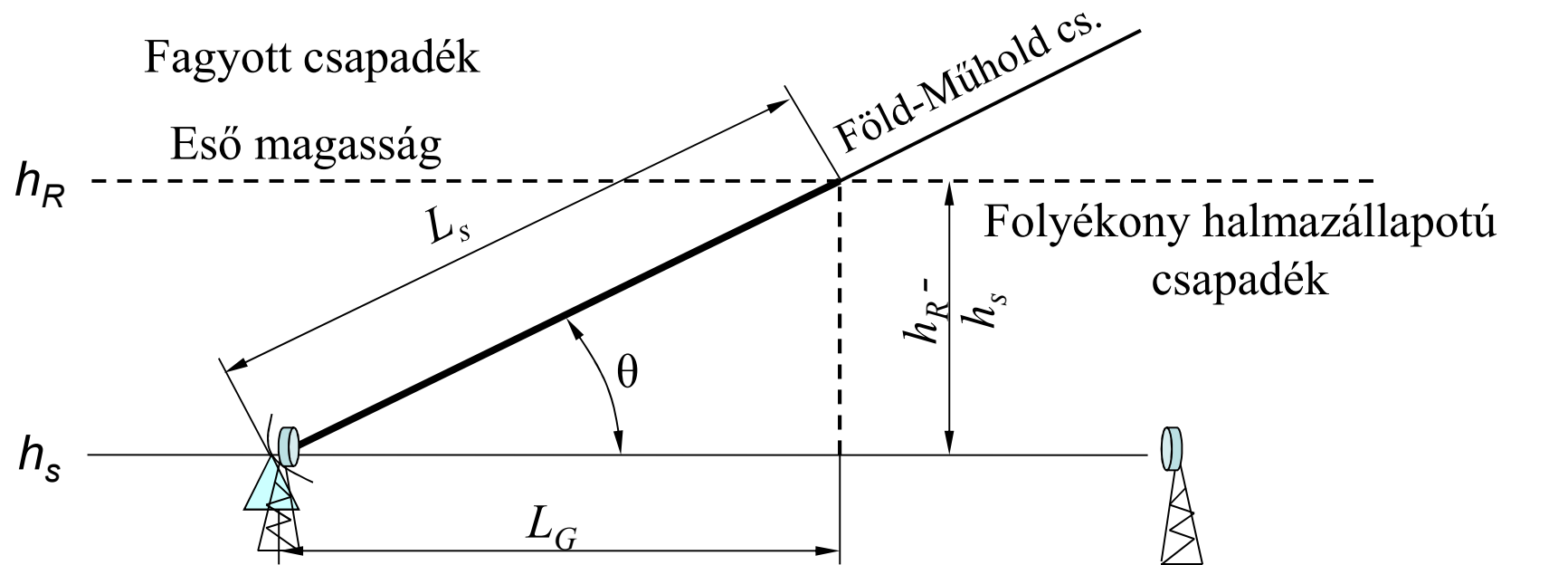
- A légkörben lévő gázok molekulái energiát nyernek el (abszorpció)
- Számottevő: **15 GHz** felett
- Oxigén és vízgőz molekulái okozzák
- Oxigén elnyelési vonalai:
 - 118,74 GHz
 - 50 GHz és 70 GHz között sok egymáshoz közeli
 - alacsonyabb sávban folytonos sávva szélesednek
- A vízgőz elnyelési vonalai:
 - 23,3 GHz
 - 183,3 GHz
 - 323,8 GHz
 - valamint az infravörös sávban
- A vízgőz csillapítása a koncentrációval arányos. Standard koncentráció: $7,5 \text{ g/m}^3$



A légkör miatti többlet csillapítás



Föld-műhold és földi pont-pont összeköttetések útvonala



L_s – ferde úthossz,

L_G – vízszintes útvetület, h_R – effektív eső magasság

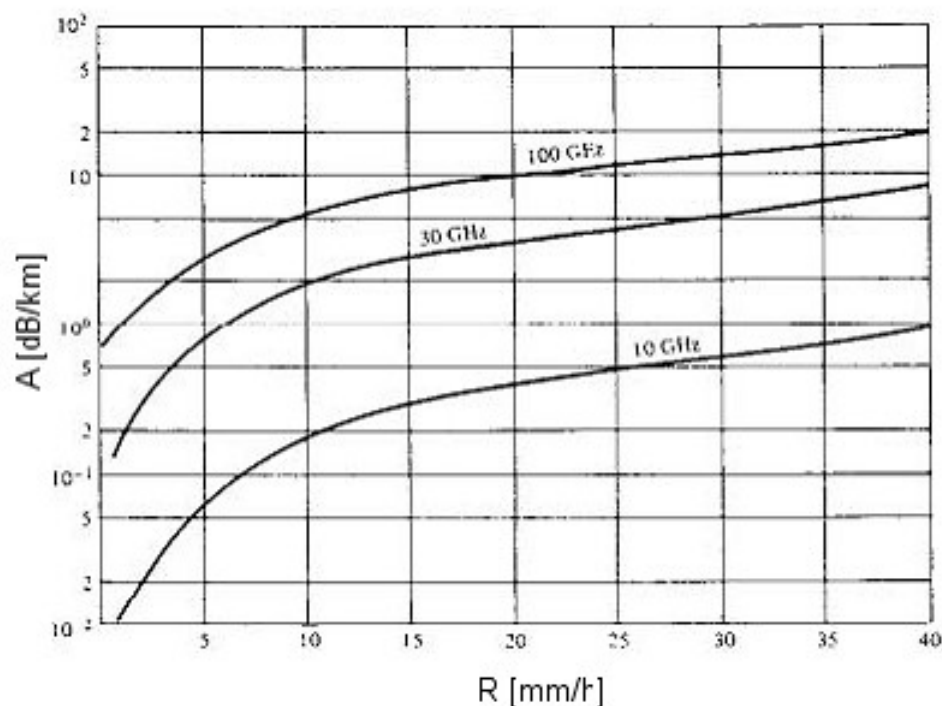
$L_s = (h_R - h_s) / \sin\theta$ [km], h_s – az állomás talaj feletti magassága

θ – antenna elevációs szöge,

$L_G = L_s \cos\theta$ [km].

A csapadék csillapítása

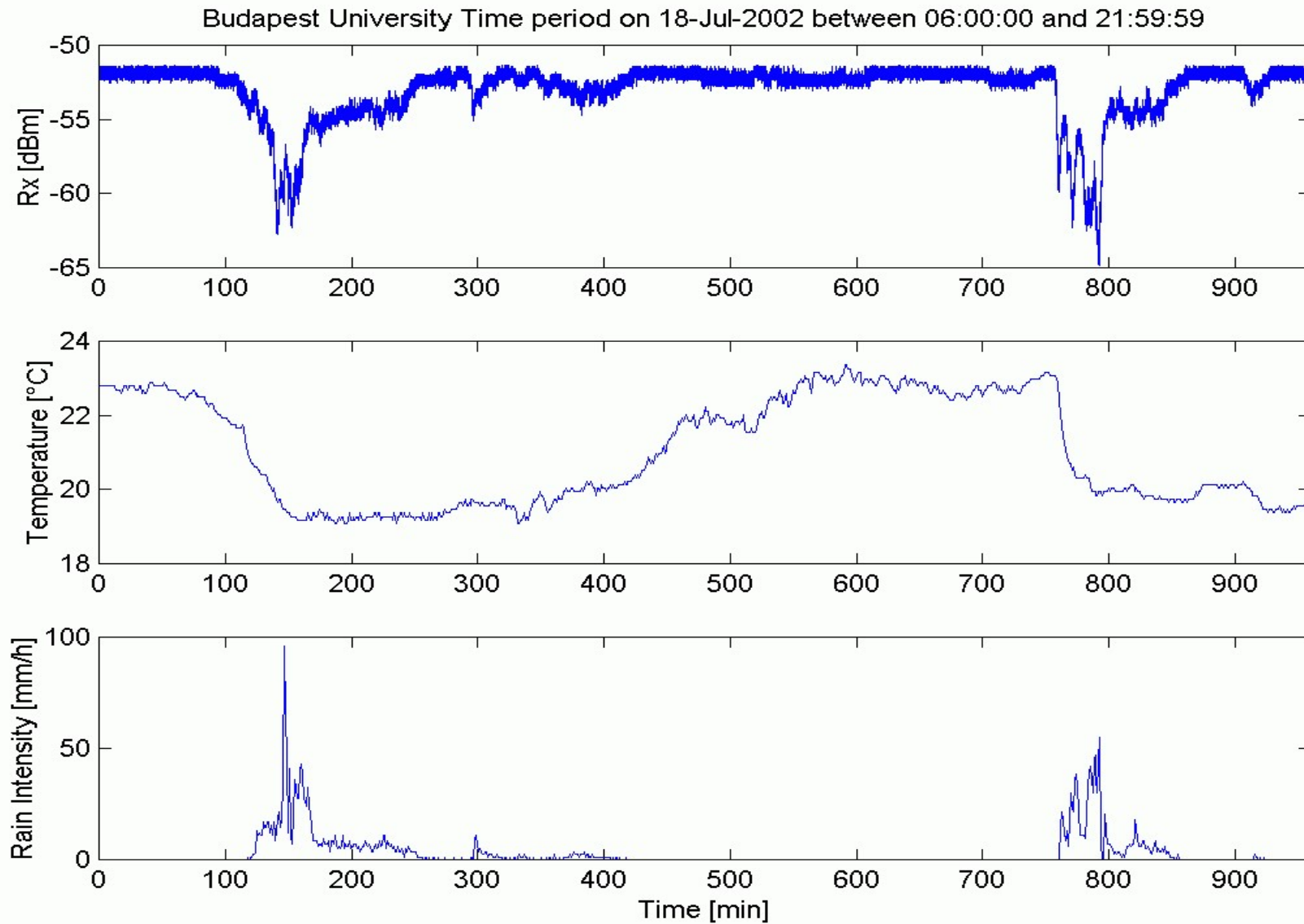
- Eső
 - csillapítása függ:
 - frekvenciától
 - esőintenzitástól [mm/h]
 - esőcseppek átmérőjétől
 - okai:
 - abszorpció
 - szóródás
 - polarizáció elfordulás
 - 10 GHz felett, főleg a fent említett csillapítás maximumokon.
 - az esőcsepp alakja miatt a H polarizációjú hullámot jobban csillapítja
- Jég, Hó
 - víz megfagy, dielektr. áll.-ja csökken
 - csillapítása elhanyagolható
 - radomon felhalmozódva csillapít!
- Köd
 - inkább optikán (hullámhossz, méret)



Az eső csillapítása az esőintenzitás és a frekvencia függvényében

- Havas eső (sleet)
 - Kialakulásához jellemző meteorológiai viszonyok
 - Esés közben a jég olvadni kezd, nedves burok alakul ki, akár 30 dB csillapítást tud okozni

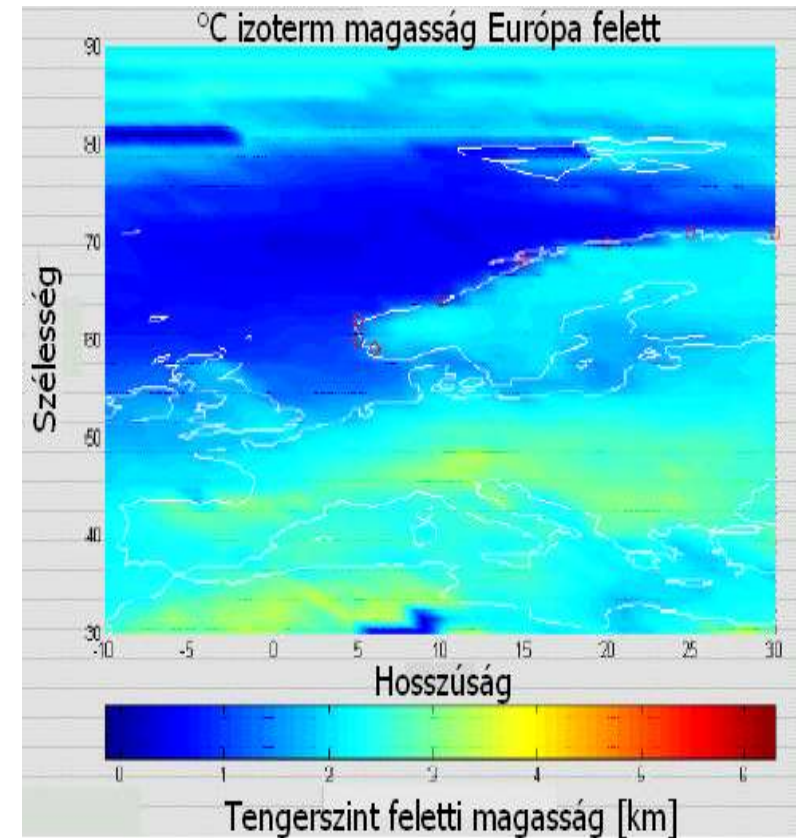
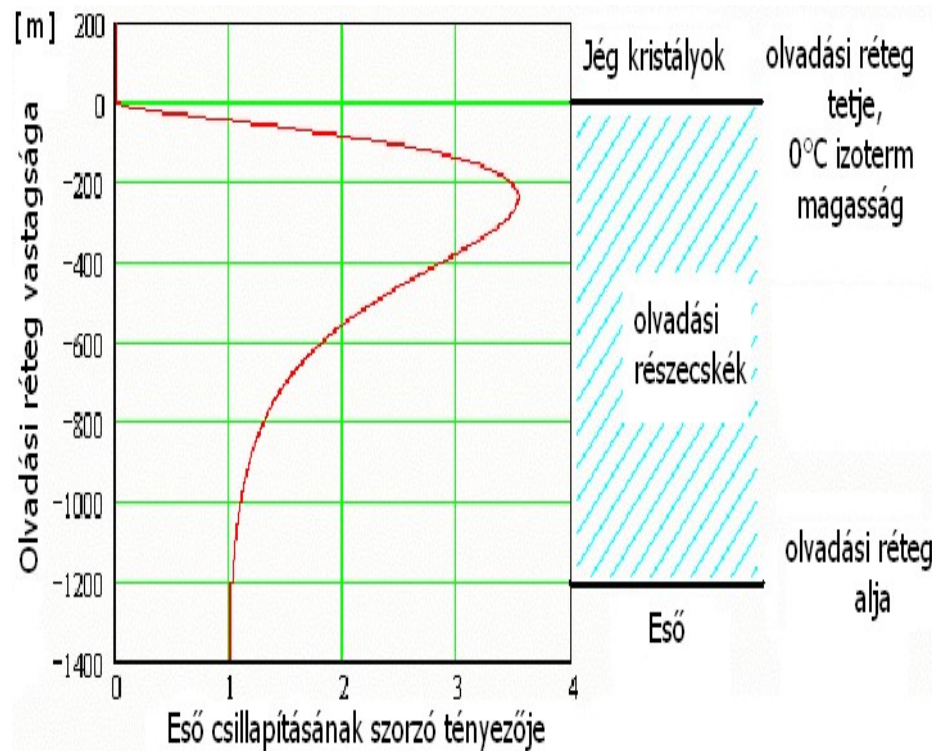
Tipikus vételi jelszint időfüggvény (38 GHz)



A havas eső (sleet) csillapítása

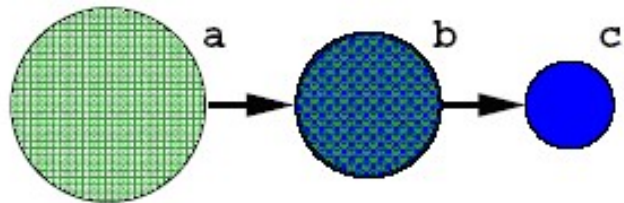
Létrejövésének feltételei:

- a hőmérséklet $0\text{ }^{\circ}\text{C}$ körüli vagy $1,6\text{-}6\text{ }^{\circ}\text{C}$ között van
- a páratartalom 70% feletti
- havas eső keveredhet szitáló esővel
- esetleg ködös idő

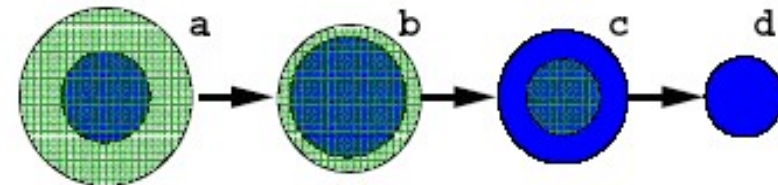


A havas eső (sleet) csillapítása

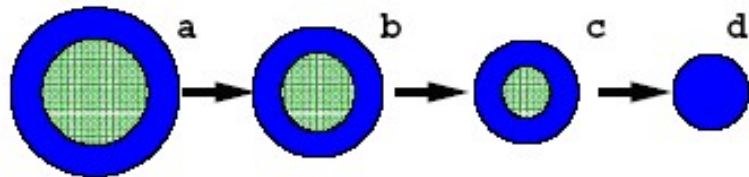
- Részecsketípusok



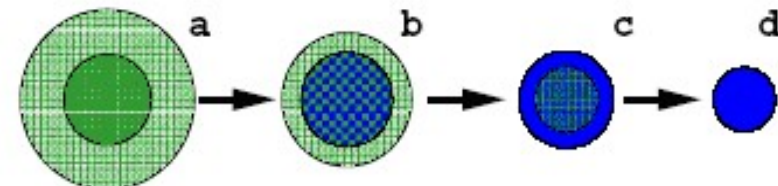
(1) Egyenletes izotropikus modell



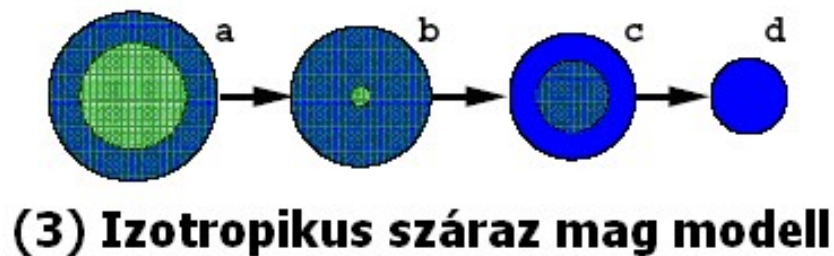
(4) Izotropikus nedves mag modell



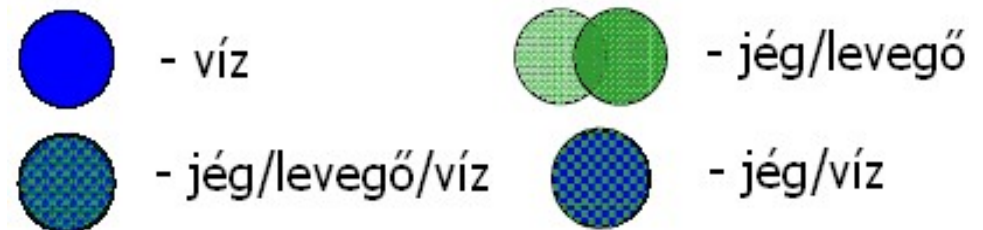
(2) Vizes héj modell



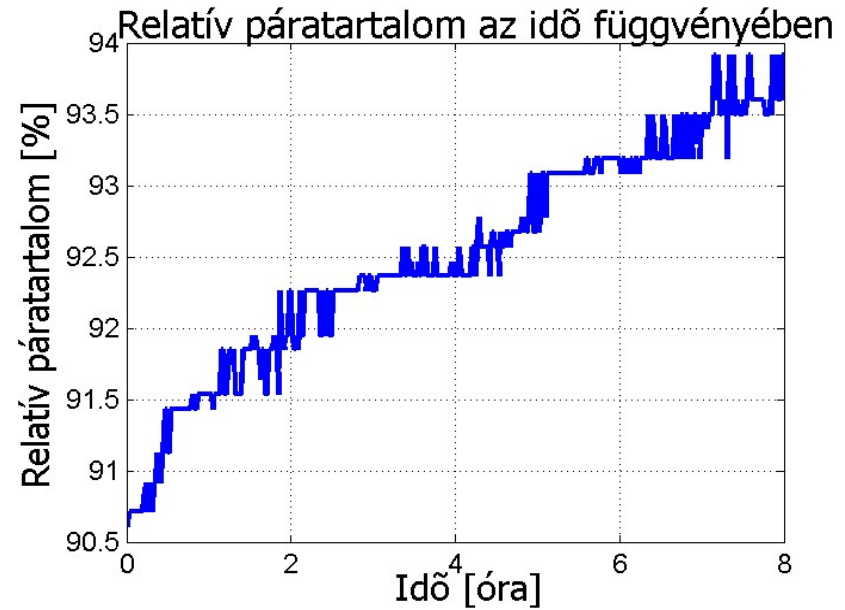
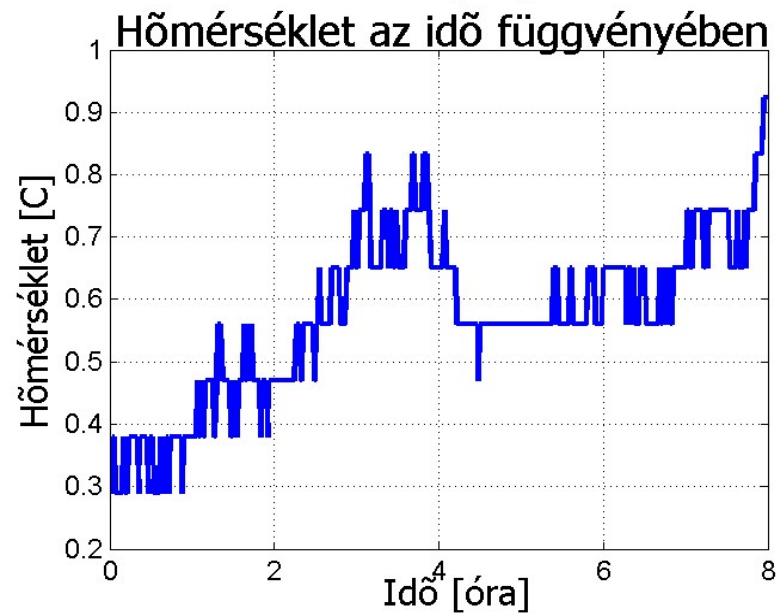
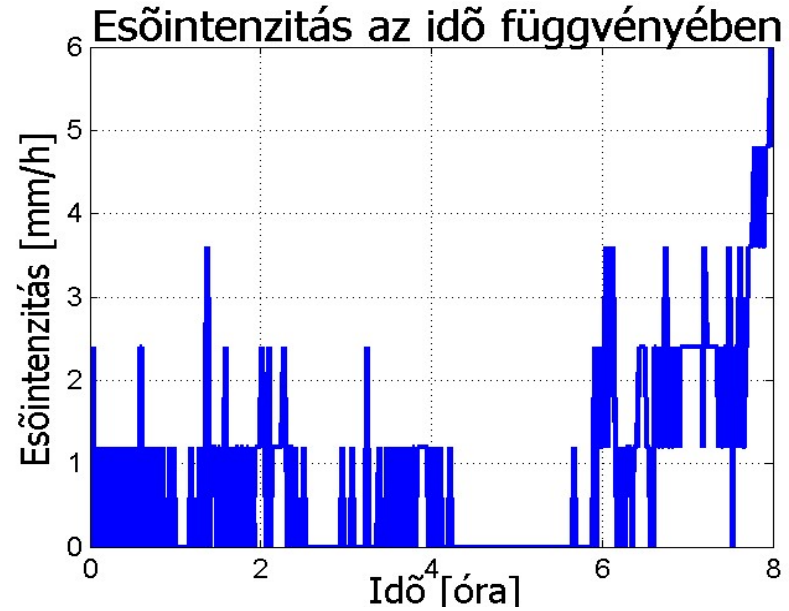
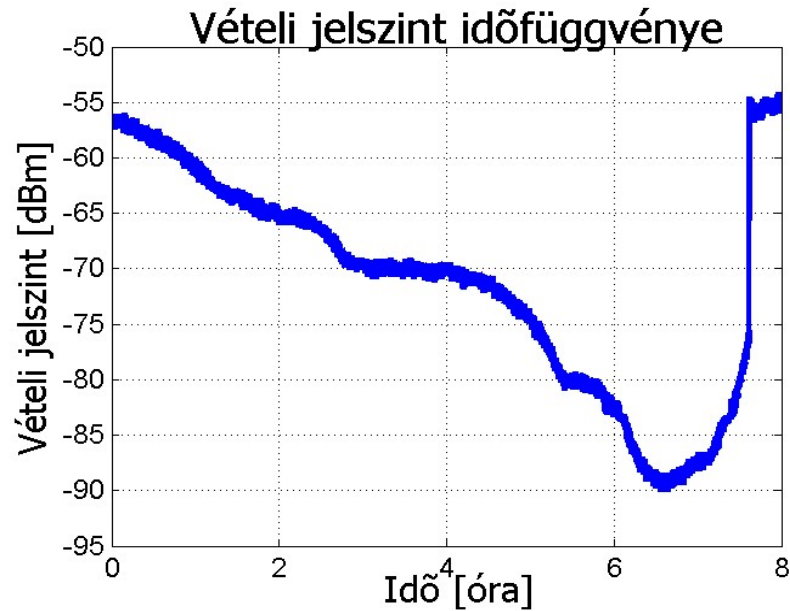
(5) 2 rétegű részecske modell



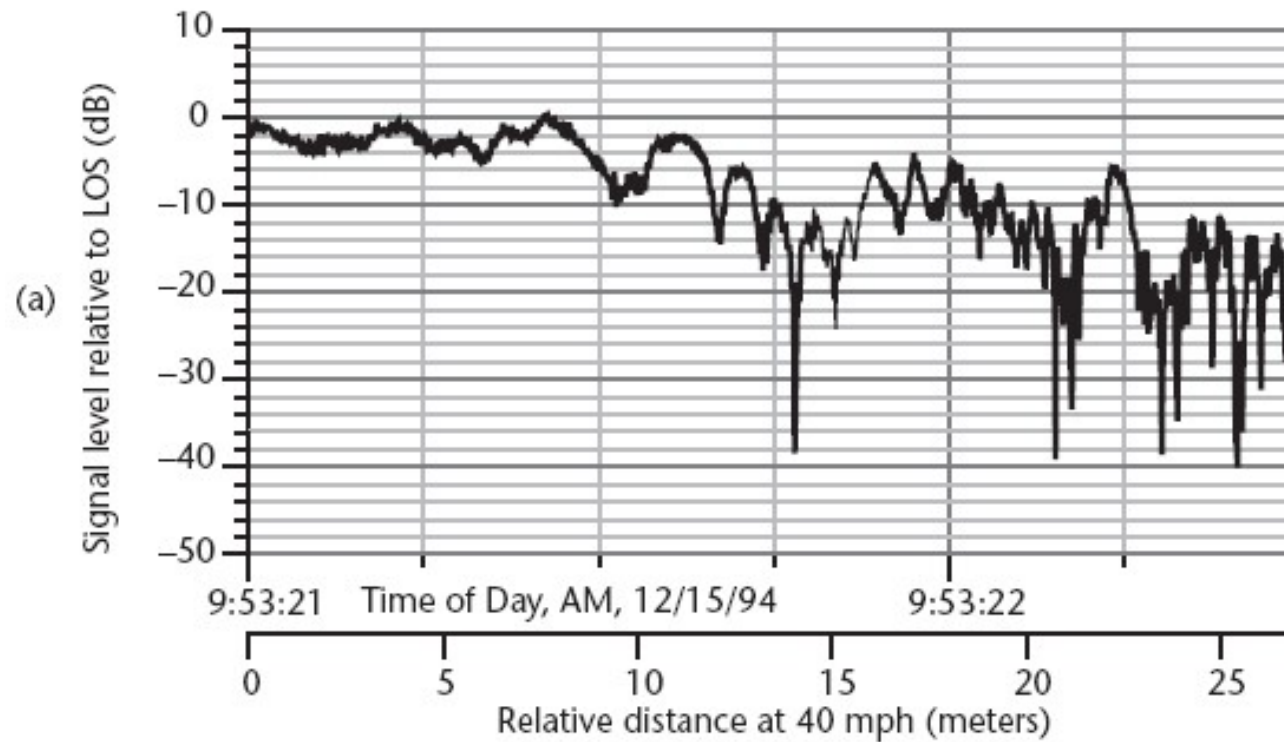
(3) Izotropikus száraz mag modell



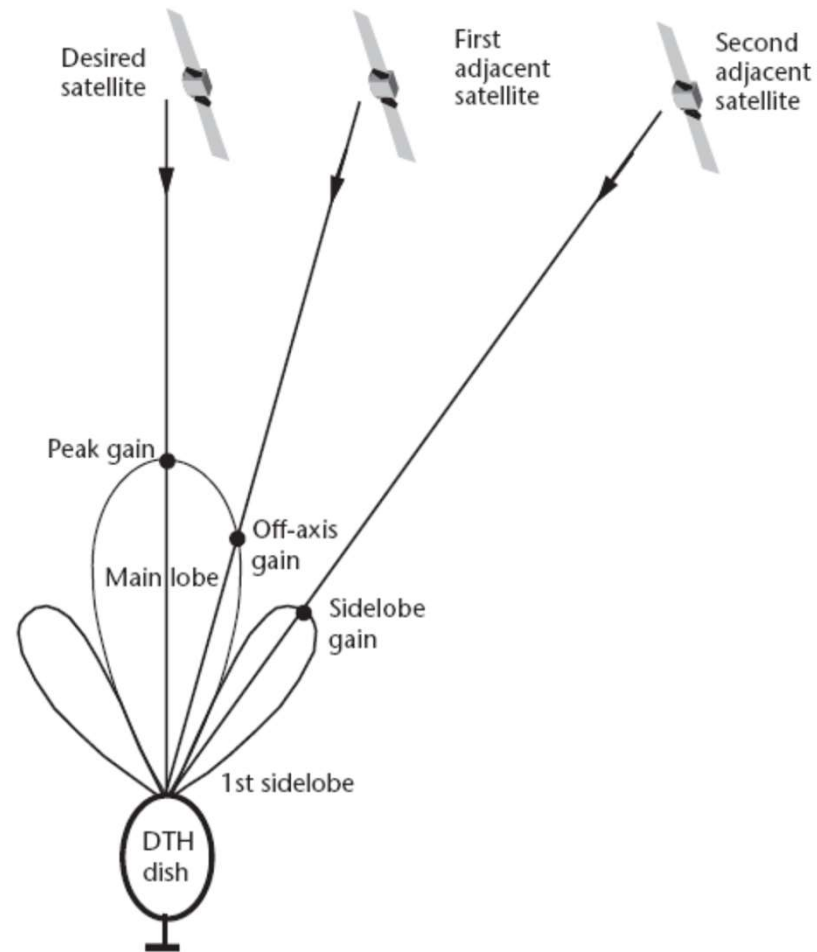
Mikrohullámú összeköttetésen havas eső hatása



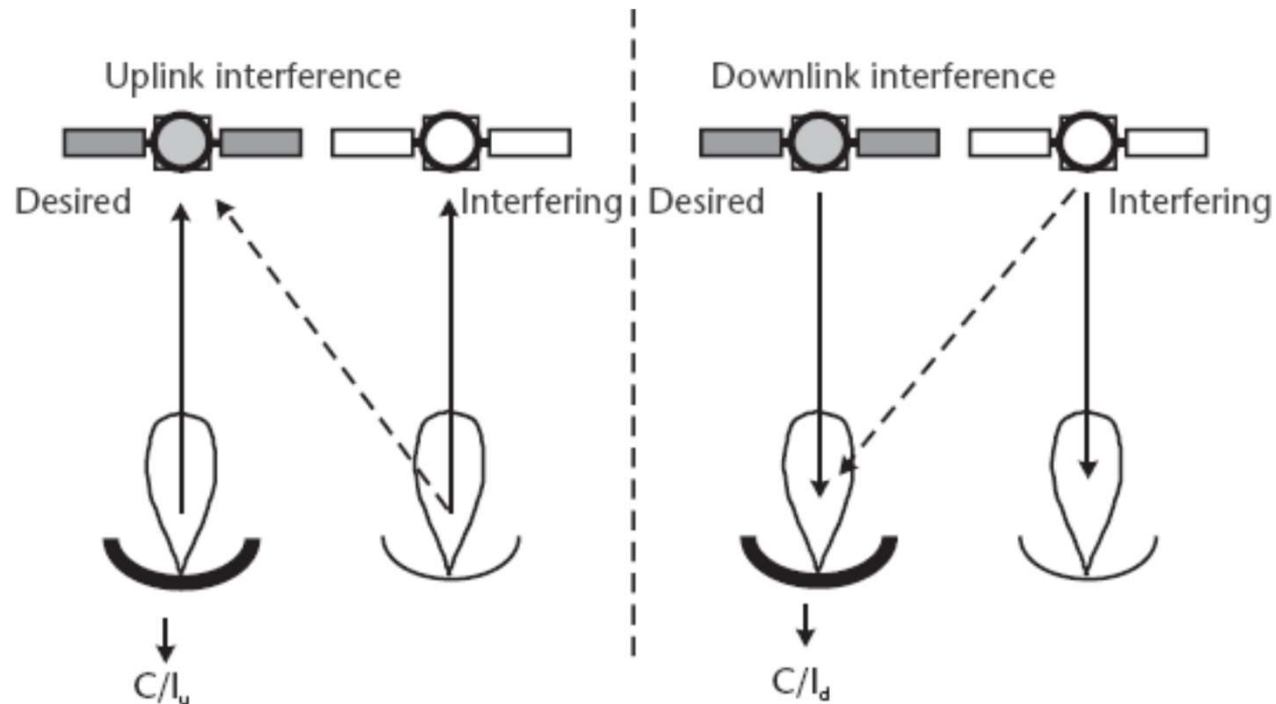
Driving from a clear area into an area with foliage shadowing.



Adjacent satellites operating in the same frequency band.



Basic GEO adjacent satellite interference model.



$$C/I = [EIRP_d - EIRP_i] + [G_d - G_i] - 20 \log (R_d/R_i)$$

Equivalent isotropically radiated power (EIRP) is the amount of power that a theoretical [isotropic antenna](#) would emit to produce the peak power density observed in the direction of maximum [antenna gain](#).

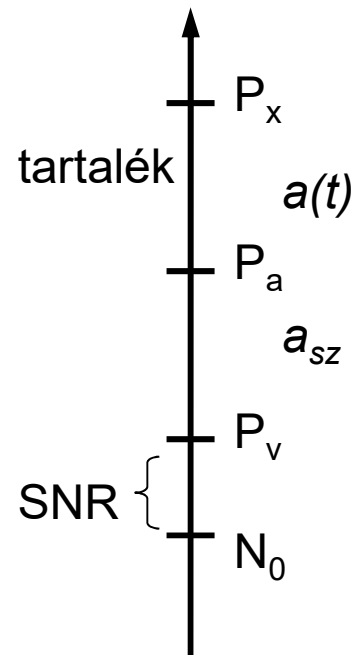
Fading elleni védekezés

- Fading tartalék
- Csatonakódolás
- Spektrumkiterjesztés
 - Frekvenciaugratás (FH)
 - Közvetlen kódsorozatú (DS)
- Csatornaki egyenlítő
- Diverziti

Fading tartalék

Fading tartalék a tervezett rendelkezésreálláshoz szükséges vételi szint és a „fadingmentes” szakaszcsillapításból adódó vételi szint közötti tervezett teljesítménykülönbség. A kiesések valószínűsége a fading tartalék megválasztásával tervezhető.

- Ha nem iktatnánk a rendszerbe fading tartalékot, akkor a fellépő fading folyamat okozta többletcsillapítás miatt az összeköttetés megszakadhatna.



- N_0 - vevő termikus zaja
- P_v - vevő oldali teljesítmény
- P_x - adó oldali teljesítmény
- a_{sz} - szakaszcsillapítás
- $a(t)$ - eső okozta fading

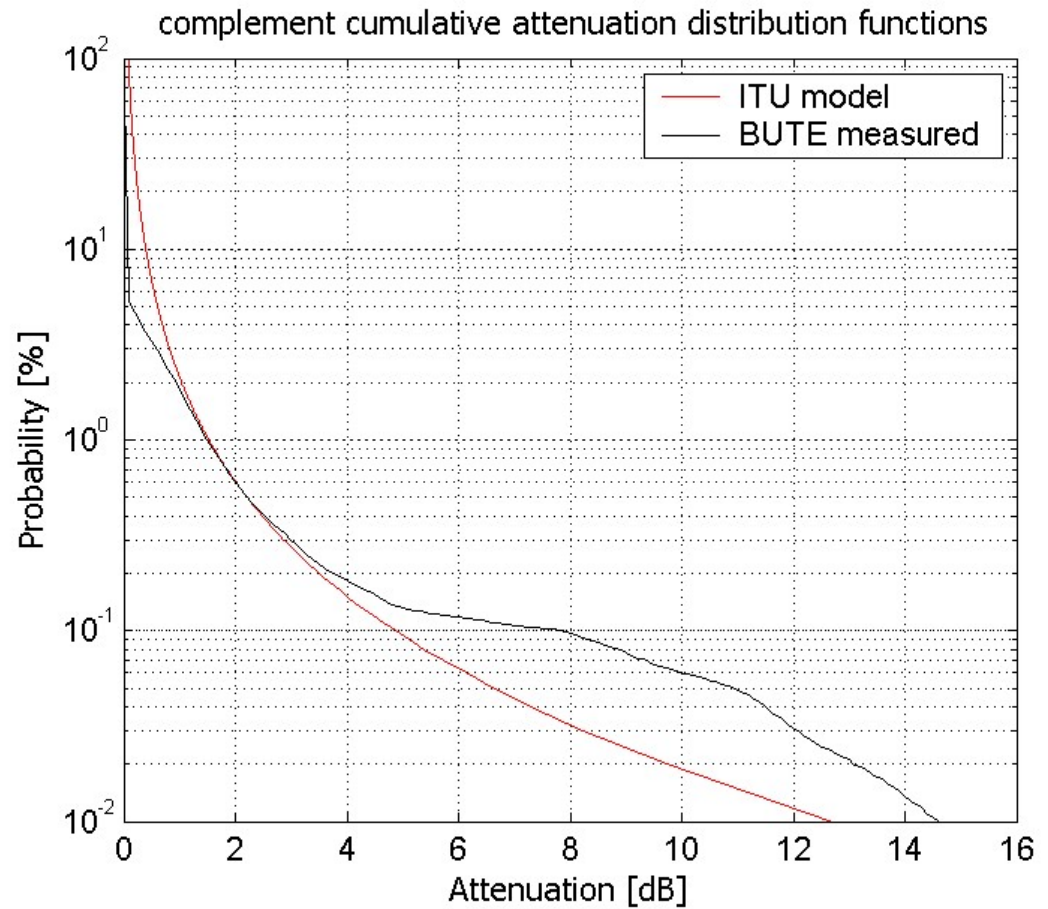


Table 2.3 Link Budget Analysis for the Downlink (3.95 GHz, C-Band)

<i>Item</i>	<i>Link Parameter</i>	<i>Value</i>	<i>Unit</i>	<i>Computation</i>
1	Transmit power (10W)	10.0	dBW	Assumption
2	Transmit waveguide losses	1.5	dB	Assumption
3	Transmit antenna gain	27.0	dB _i	U.S. Continental coverage
4	Satellite EIRP (toward LS)	35.5	dBW	1-2+3
5	Free-space loss	196.0	dB	(2.4)
6	Atmospheric absorption (clean air)	0.1	dB	Typical
7	Reccive antenna gain(3.2m)	40.2	dB _i	
8	Reccive waveguide loss	0.5	dB	
9	Reccived carrier power	-121.7	dBW	4-5-6+7-8
10	System noise temperature (140K)	21.5	dBK	
11	Earth station G/T	18.2	dB/K	7-8-10
12	Boltzmann's constant	-228.6	dBW/Hz/K	
13	Bandwidth (25 MHz)	74.0	dB Hz	
14	Noise power	-133.1	dBW	10+12+13
15	Carrier-to-noise ratio	11.4	dB	9-14

EIRP: Effective Isotropic Radiated Power

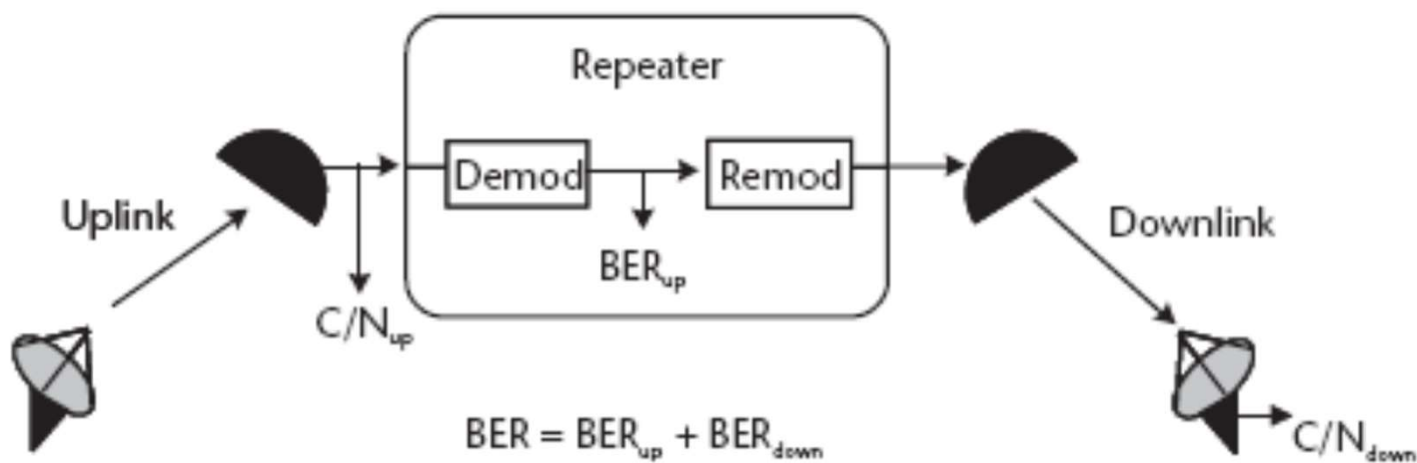
Table 2.4 Link Budget Analysis for the Uplink (6.175 GHz, C-band)

<i>Item</i>	<i>Link Parameter</i>	<i>Value</i>	<i>Units</i>	<i>Computation</i>
16	Transmit power (850W)	29.3	dBW	
17	Transmit waveguide losses	2.0	dB	
18	Transmit antenna gain (7m)	50.6	dB _i	
19	Uplink EIRP from Boston	77.9	dBW	16 - 17 + 18
20	Spreading loss	162.2	dB(m ²)	
21	Atmospheric attenuation	0.1	dB	
22	Flux density at the spacecraft	-84.4	dBW/m ²	19 - 20 - 21
23	Free-space loss	200.4	dB	
24	Receive antenna gain	26.3	dB _i	
25	Receive waveguide loss	0.5	dB	
26	System noise temperature (450K)	26.5	dB(K)	
27	Spacecraft G/T	-0.7	dB/K	24 - 25 - 26
28	Received C/T	-122.9	dBW/K	19 - 23 - 21 + 27
29	Boltmann's constant	-228.6	dBW/Hz/K	
30	Bandwidth (25 MHz)	74.0	dB Hz	
31	Carrier-to-noise ratio	31.7	dB	28 - 29 - 30

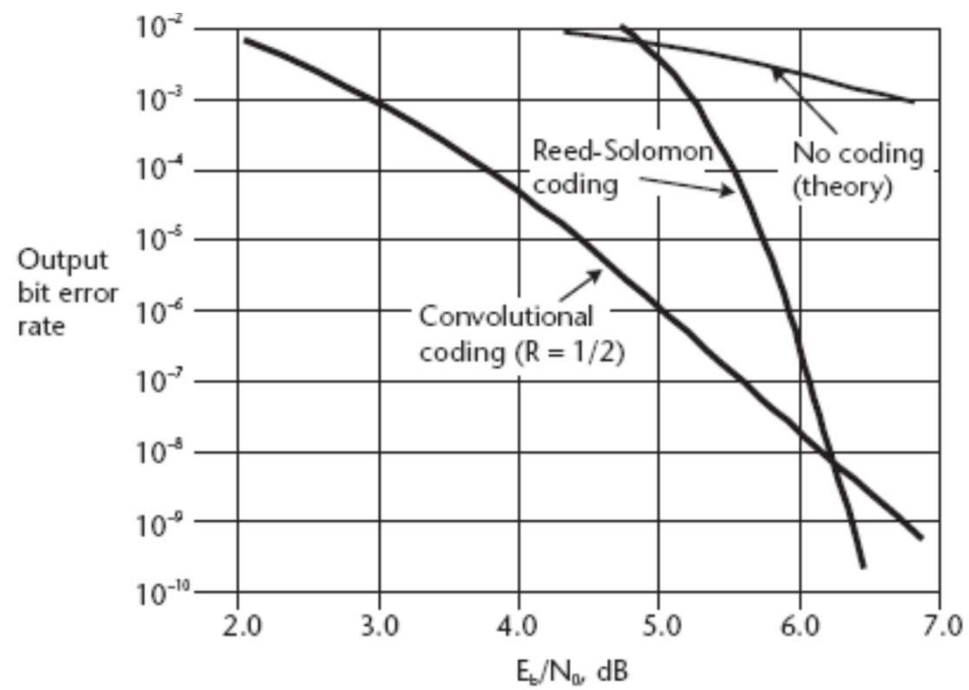
Table 2.5 Combining the Uplink and the Downlink to Estimate Overall Link Performance

<i>Item</i>	<i>Link Parameter</i>	<i>Value</i>	<i>Units</i>	<i>Computation</i>
32	Uplink C/N (31.7 dB)	1,479.1	Ratio	31
33	N_u/C	0.000676	Ratio	
34	Downlink C/N (11.4 dB)	13.8	Ratio	15
35	N_d/C	0.0724	Ratio	
36	Total thermal noise (N_u/C)	0.0731	Ratio	33 + 35
37	Total thermal C/N_d	13.7	Ratio	
38	Total thermal C/N_d	11.4	dB	
39	Interference C/I (18.0 dB)	63.1	Ratio	Assumption
40	I/C	0.015848	Ratio	
41	Total noise ($N_d + I/C$)	0.0889	Ratio	36 + 40
42	Total $C/(N_d + I)$	11.2	Ratio	
43	Total $C/(N_d + I)$	10.5	dB	
44	Required C/N	8.0	dB	Equipment

Eredő BER



Hibajavítás



Összefoglaló példa: DVB-S

