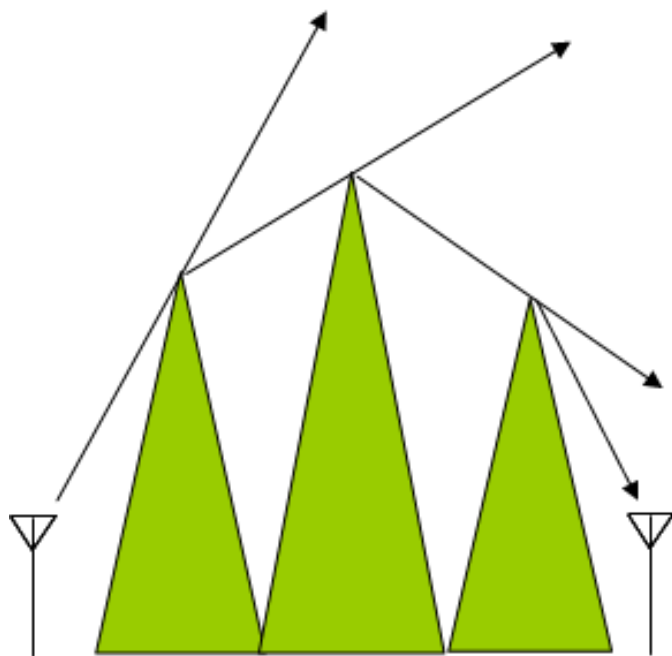


PROPAGACIJA

Načini širjenja in metode predikcije



Mobitel d.d., izobraževanje

27. 3. 2009, predavanje 9

Prof. dr. Jožko Budin

Metode za obravnavo propagacije

Metode za računanje jakosti signala:

- Splošne metode obravnave razširjanja valov
- Mehanizmi razširjanja valov
- Modeli upadanja polja v različnih okoljih
- Fresnelove cone in modeli uklona na oviri
- Odboj na tleh
- Uklon na dveh ali več ovirah

Učinek na radijsko zvezo

1. Učinek na nivo signala in šuma:

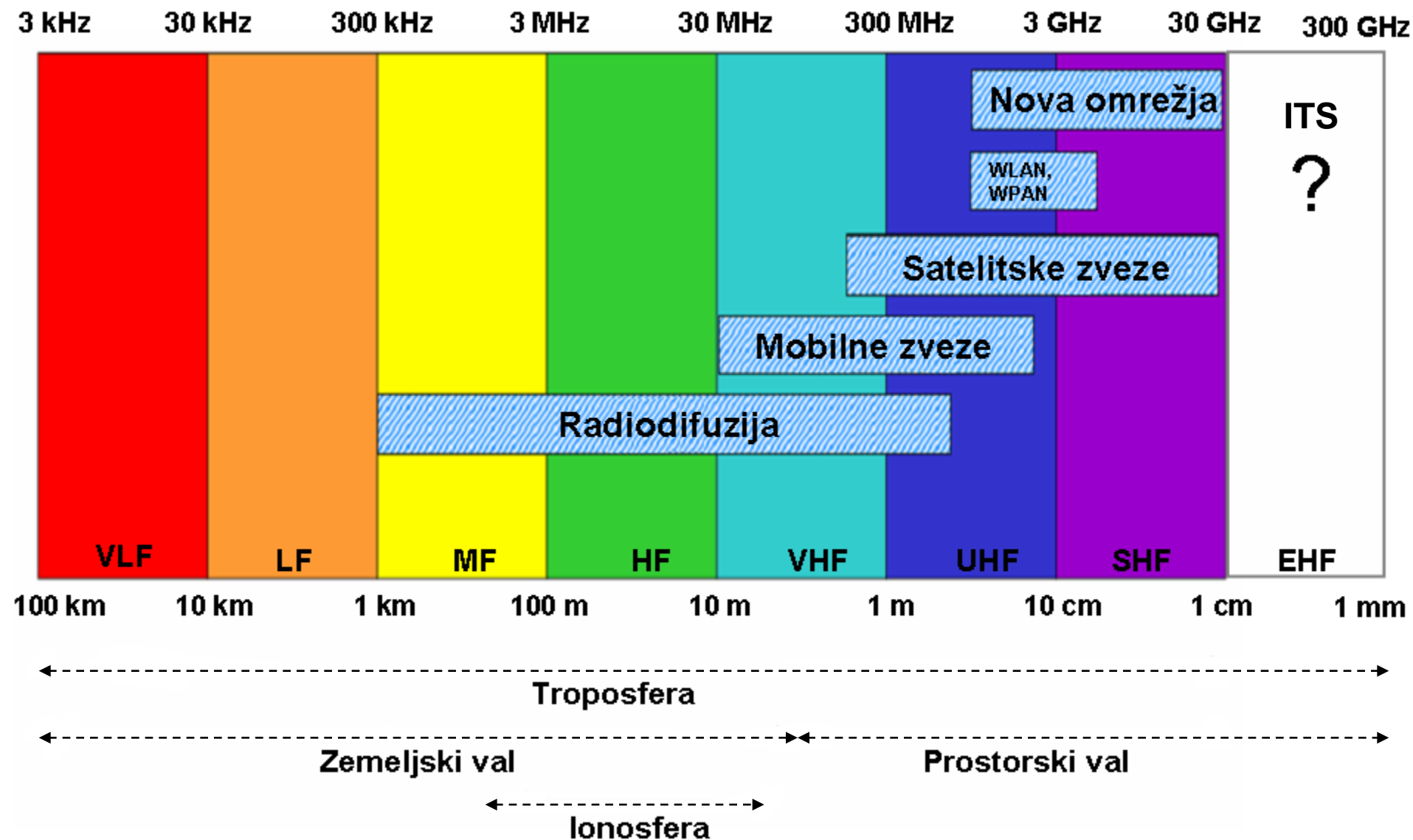
- slabljenje signala
- sprejem šumov

2. Učinek na kakovost signala (mnogostezni sprejem):

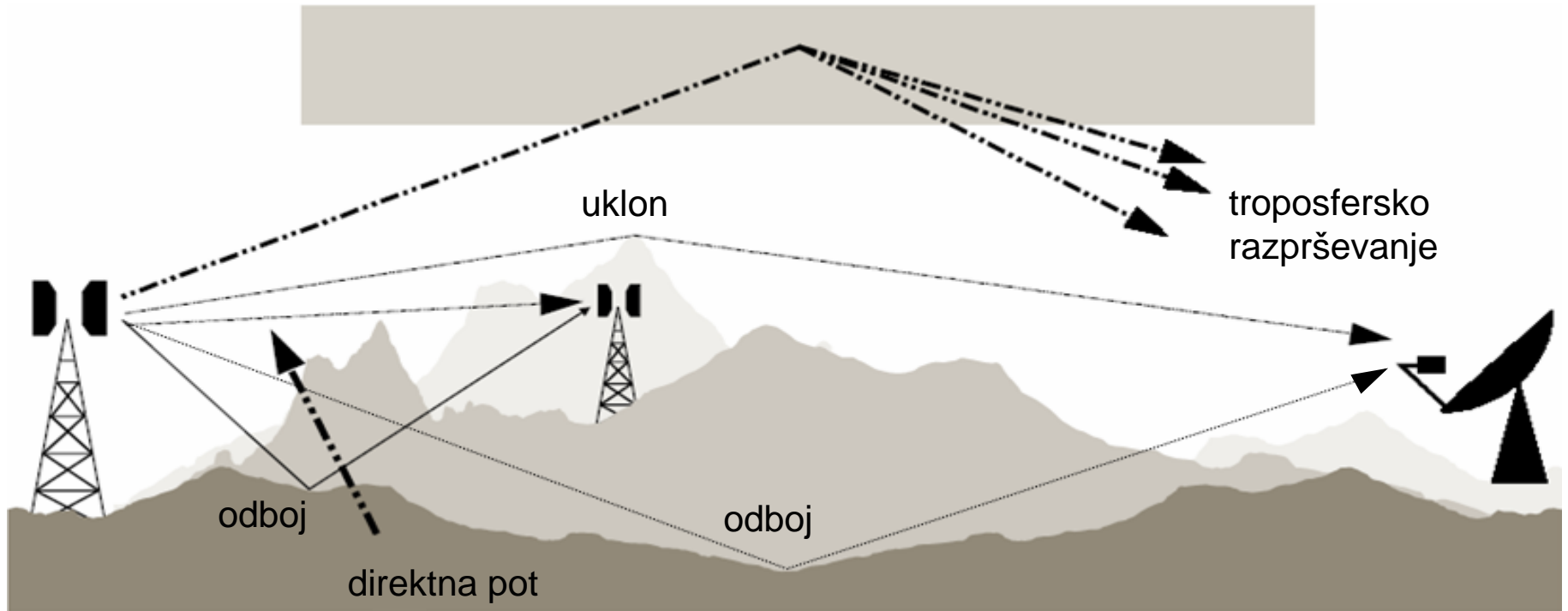
- časovna razpršitev signala
- frekvenčna razpršitev signala

V tej predstavitvi obravnavamo pojave pod tč. 1

Propagacija in radijski spekter



Radijske zveze na velike razdalje



Radijske zveze:

troposferske
ionosferske
zemlja – zemlja
zemlja – zrak
zemlja – vesolje
fiksne
mobilne

Radijske postaje:

terestrialne (prizemne)
zemeljske
vesoljske
platformne
stacionarne
mobilne

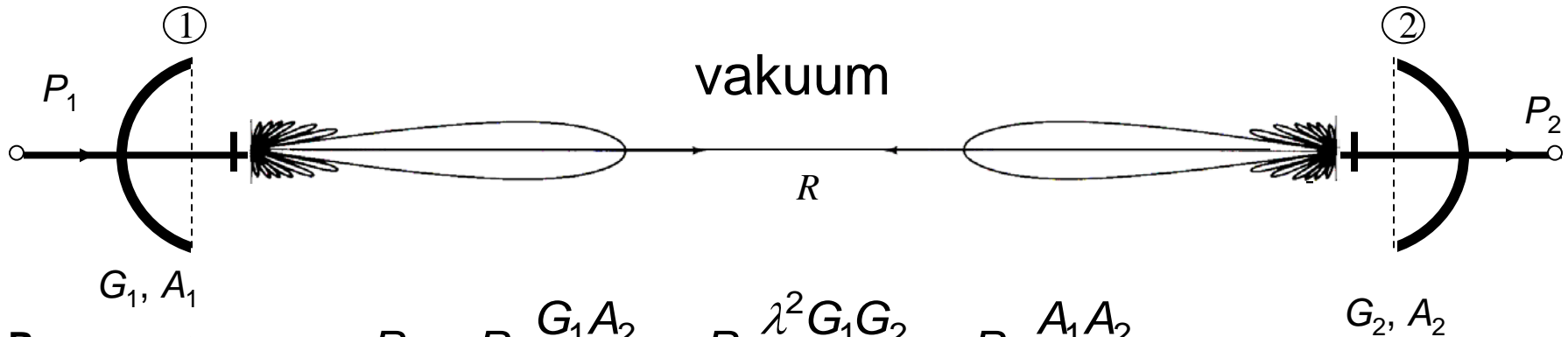
Radijska omrežja:

točka – točka
točka - več točk
točka – področje
zvezda
obroč
drevo
mreža

Terestrialna in ionosferska propagacija v nadaljevanju ni obravnavana.

Friisova prenosna formula

Temeljne definicije antenskih parametrov so prirejene za prenos med oddajno in sprejemno anteno. Z njimi zapisujemo prenosno enačbo na najpreprostejši način. Friisova prenosna formula (Friis transmission formula, 1946) se glasi:



- **Prenosna formula:**
$$P_2 = P_1 \frac{G_1 A_2}{4\pi R^2} = P_1 \frac{\lambda^2 G_1 G_2}{(4\pi R)^2} = P_1 \frac{A_1 A_2}{(\lambda R)^2}$$

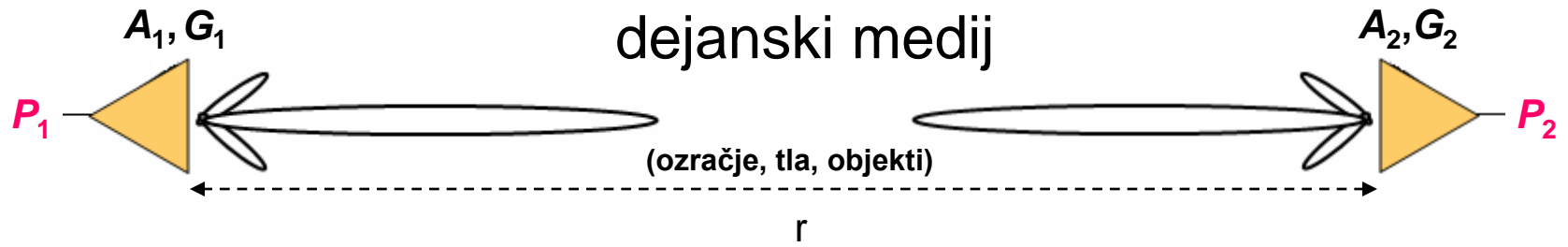
- **Slabljenje v decibelih:**
$$L = 10 \log \frac{P_1}{P_2} = 10 \log \frac{(4\pi R)^2}{\lambda^2 G_1 G_2} = 10 \log \frac{(\lambda R)^2}{A_1 A_2}$$

- **Posebnost:**
$$L = 32,45 + 20 \log R_{km} + 20 \log f_{MHz} - 10 \log G_1 - 10 \log G_2$$

Moč P_2 upada s kvadratom razdalje.

OPOMBA: Friisova formula daje prenos moči med prilagojenima in polarizacijsko skladnima antenama (optimalen prenos).

Širjenje vala v realnem prostoru – komunikacijska enačba



$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{G_1 G_2 \lambda^2}{(4\pi r)^2} L_1 L L_2$$

$$L_{dB} = 10 \log \frac{1}{L}$$

- L_1 ... slabljenje na oddajni strani
- L ... dodatno slabljenje pri propagaciji v realnem prostoru
- L_2 ... slabljenje na sprejemni strani

L_1 :

- slabljenje kablov in priključnih elementov
- slabljenje zaradi impedančne neprilagojenosti

L :

- vpojno in razpršilno slabljenje v ozračju
- odbojno slabljenje
- uklonsko slabljenje
- razpršilno slabljenje

L_2 :

- slabljenje kablov in priključnih elementov
- slabljenje zaradi impedančne neprilagojenosti
- slabljenje zaradi polarizacijske neuskkljenosti

Osnovno slabljenje v praznem prostoru

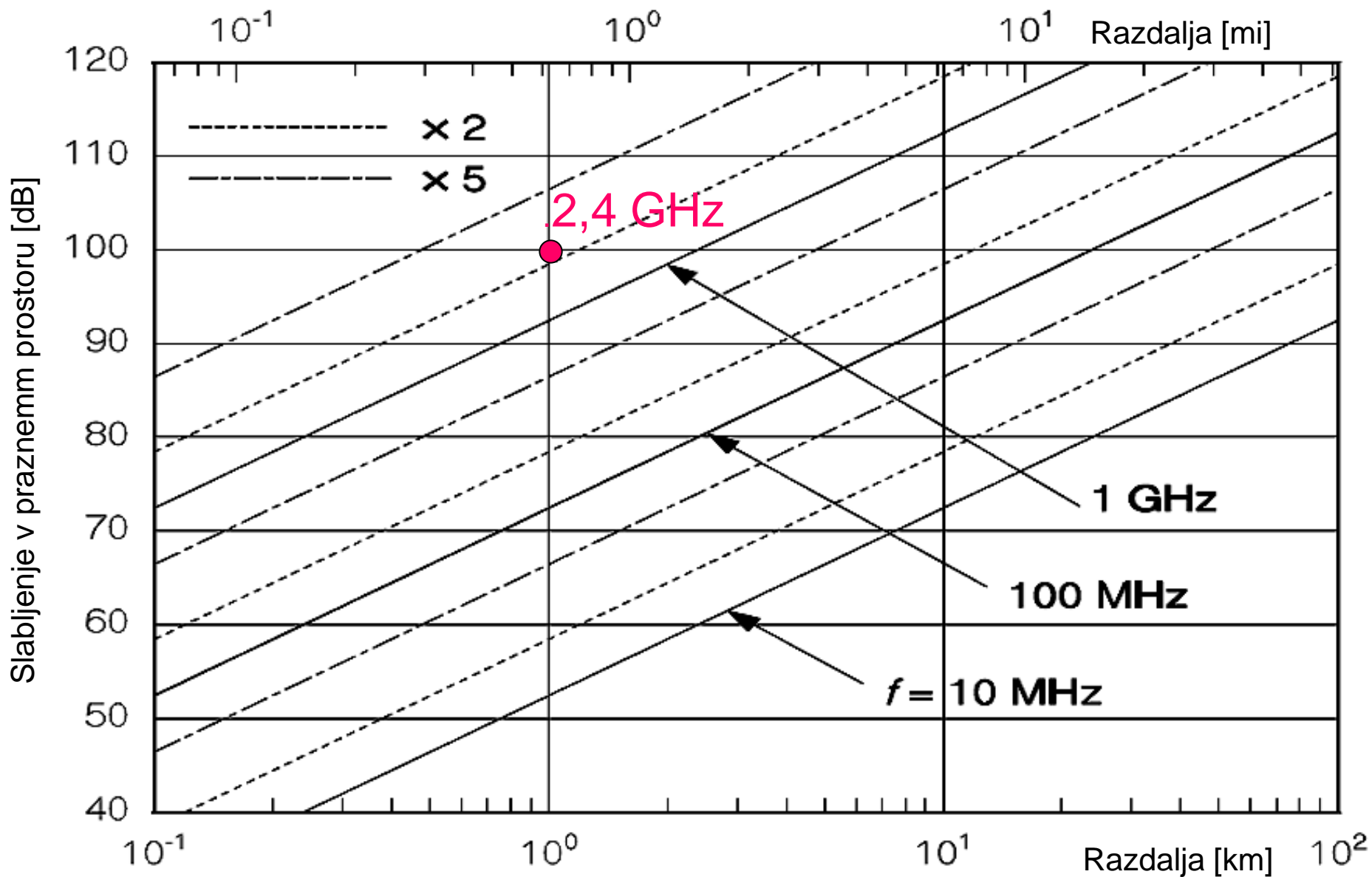
Slabljenje med dvema izotropnima antenama:

$$\begin{aligned} L_{\text{dB}} &= 10 \log(P_1/P_2) = \\ &= 92,45 + 20 \log r_{\text{km}} + 20 \log f_{\text{GHz}} \end{aligned}$$

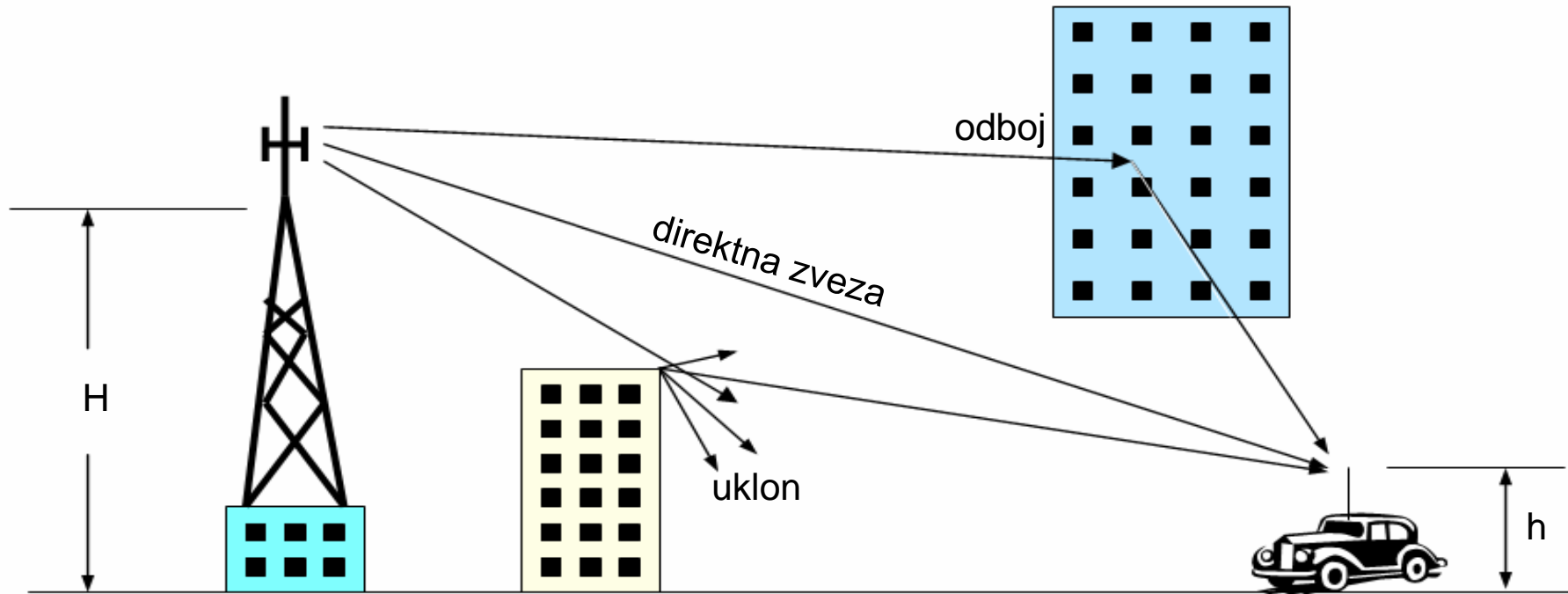
Slabljenje na dolžini 1 km pri frekvenci 1 GHz znaša 92,45 dB. Na dolžini 1 km pri frekvenci 2,4 GHz znaša približno 100 dB.

Slabljenje narašča 6 dB na oktavo in 20 dB na dekado (dolžine, frekvence).

Osnovno slabljenje



Propagacija in sistemi radijskih omrežij



WRAN	WWAN	WMAN	WLAN	WPAN (WSAN)
IEEE 802.22	IEEE 802.20	IEEE 802.16	IEEE 802.11	IEEE 802.15
	MBWA	WiMAX LMDS/MMDS UMTS/LTE	Wi-Fi HiperLAN	Wi-Media Bluetooth UWB ZigBee/RFID

Polje v praznem prostoru

Polje antene smernosti G in moči P v smeri glavnega snopa smernega diagrama na razdalji R :

$$E = \sqrt{\frac{PGZ_0}{2\pi}} \frac{1}{R} = \sqrt{60PG} \frac{1}{R}$$

Največja vrednost poljske jakosti v dB glede na 1V/m:

$$E_{dB \ 1V/m} = 20\log E = -42,2 + 10\log P_W + 10\log G - 20\log R_{km}$$

Polje v realnem prostoru izražamo s časovno - krajevno mediansko vrednostjo E_{med} , ki jo polje presega v 50% časa in na 50% lokacij. Za druge odstotke kraja in časa vnašamo statistični popravek.

Pojavi in mehanizmi širjenja vala v realnem prostoru

1. Vpoj (absorpcija):

- neresonančna
- resonančna

2. Odboj (refleksija):

- zrcalen (spekularen)
- razpršen (difuzen)
- notranji, totalni

3. Lom (refrakcija):

- diskreten
- zvezen

4. Uklon (difrakcija):

- klinasta ovira
- obla ovira
- večkratna ovira

5. Interferenca:

- konstruktivna
- destruktivna
- večstezna (multipath)



odboj



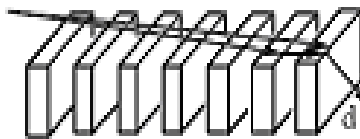
difuzni odboj



razpršitev



uklon



večkratni uklon



valovodni pojav

6. Razprševanje:

- Rayleigh ($L \ll \lambda$) sipanje
- Mie ($L = \lambda$)
- optično ($L \gg \lambda$)

7. Valovodno širjenje:

- hodnik, ulica
- snovni valovod

8. Presih (feding):

- Rayleigh
- Rice
- Nakagami

9. Polarizacija:

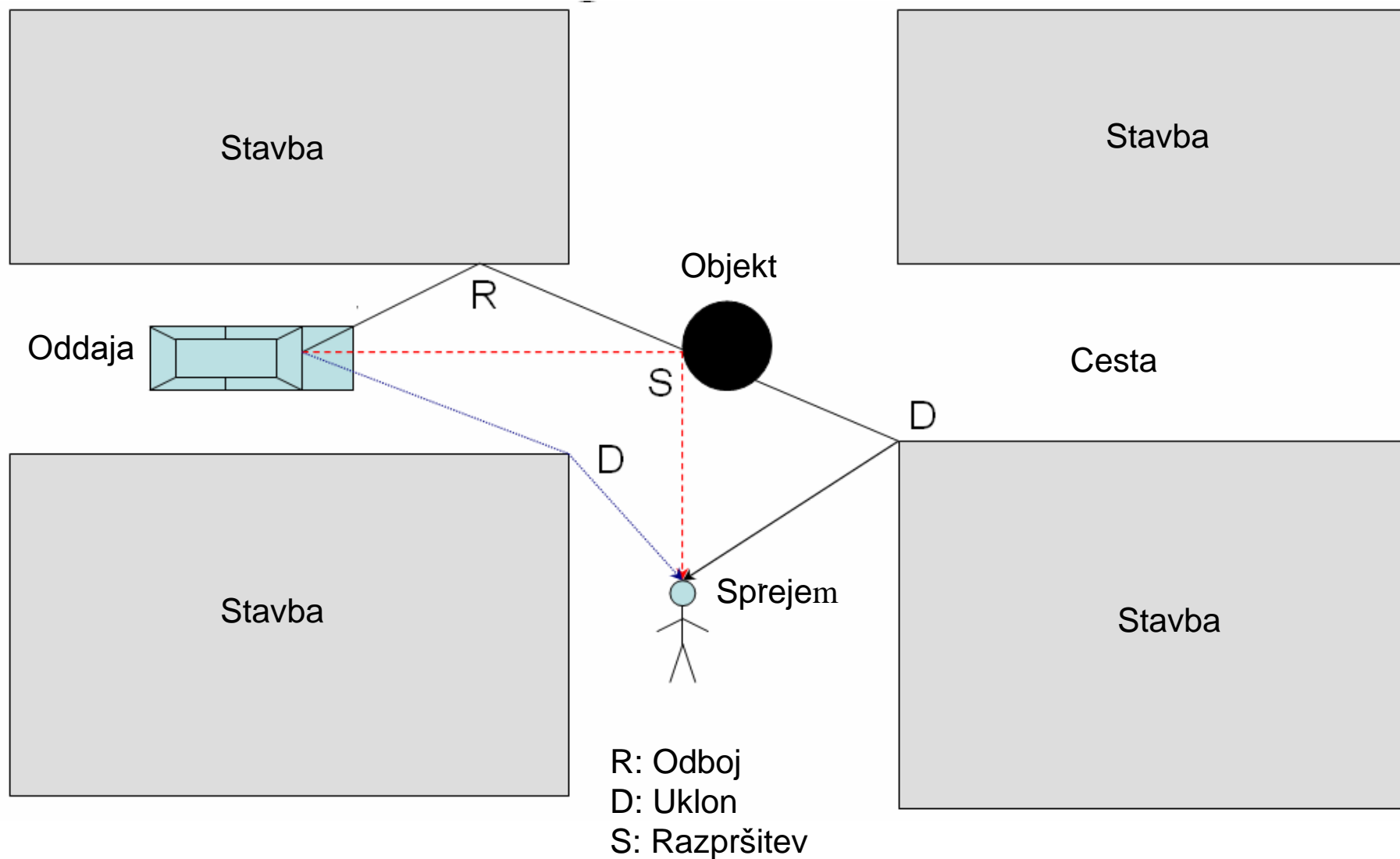
- neusklajenost
- depolarizacija

10. Kakovost signala:

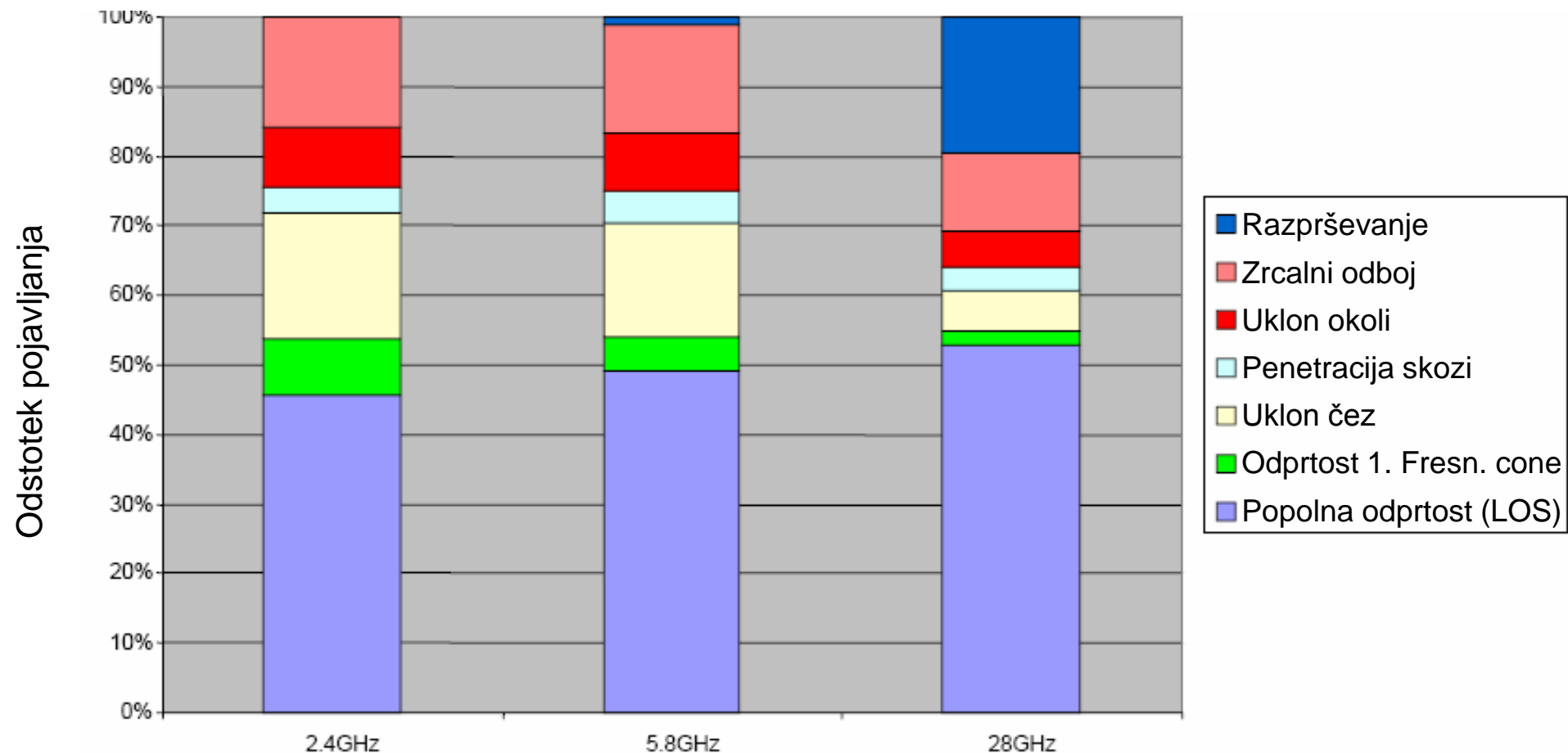
- razpršitev zakasnitve (časovna disperzija)
- Dopplerjev pomik (frekvenčna disperzija)

Mehanizmi širjenja v urbanem okolju

Propagacija v urbanem okolju

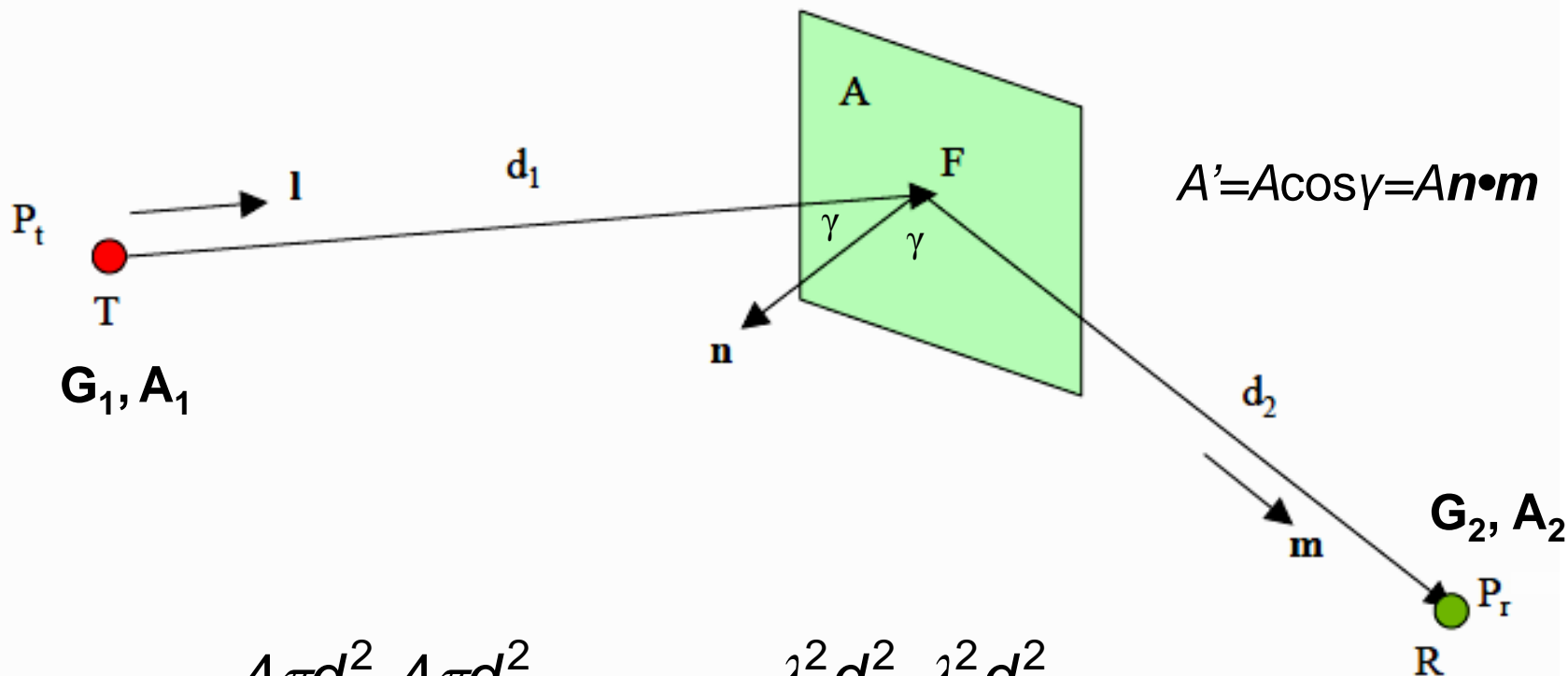


Pogostost pojavov in mehanizmov



Delež različnih pojavov pri razširjanju na urbanem področju (primer Manchester). S frekvenco se delež razpršenega polja povečuje. Delež radijskih zvez z radijsko vidljivostjo je okolo 50%.

Pasivni repetitor – model zrcalnega odboja



$$L = 10 \log \frac{4\pi d_1^2}{G_1 A'} \frac{4\pi d_2^2}{G_2 A'} = 10 \log \frac{\lambda^2 d_1^2}{A_1 A'} \frac{\lambda^2 d_2^2}{A_2 A'} =$$

$$= 10 \log \frac{\lambda^2 (d_1 + d_2)^2}{A_1 A_2} + 20 \log \frac{\lambda d_1 d_2}{A' (d_1 + d_2)}$$

Klasifikacija parametrov tal, terena in lomnosti

Prevodnost σ v mho/m:

- slaba tla $\sigma = 0,001$
- povprečna tla $\sigma = 0,005$
- dobra tla $\sigma = 0,02$
- morska voda $\sigma = 5$
- pitna voda $\sigma = 0,01$

Dielektrična konstanta:

- slaba tla $\epsilon_r = 4$
- povprečna tla $\epsilon_r = 15$
- dobra tla $\epsilon_r = 25$
- voda $\epsilon_r = 81$

Klasifikacija višine terena:

- ravnina 0 – 5 m
- položen teren 5 – 20 m
- blago valujoč 20 – 40 m
- valujoč teren 40 – 80 m
- gričevje 80 – 150 m
- hribovje 150 – 300 m
- planine 300 – 700 m
- gorovje nad 700 m

Klasifikacija lomnosti:

Standardni potek:

$$N(z) = (n - 1) \cdot 10^6 = 289 - 39 \text{ z/km}$$

- subrefrakcija $-39 < dN/dz < 0$
- standardna refrakcija $dN/dz = -39$ ($k=4/3$)
- superrefrakcija $-156 < dN/dz < -39$
- troposferski kanal $dN/dz < -156$

Lom v atmosferi

$$N = \frac{77,6p}{T} + \frac{3,73 \cdot 10^{-5} e}{T^2}$$

$$N = (n - 1)10^6$$

$$N(z) = N_0 - (dN/dz)z$$

$$N(z) = 289 - 40z, \quad z \text{ v km}$$

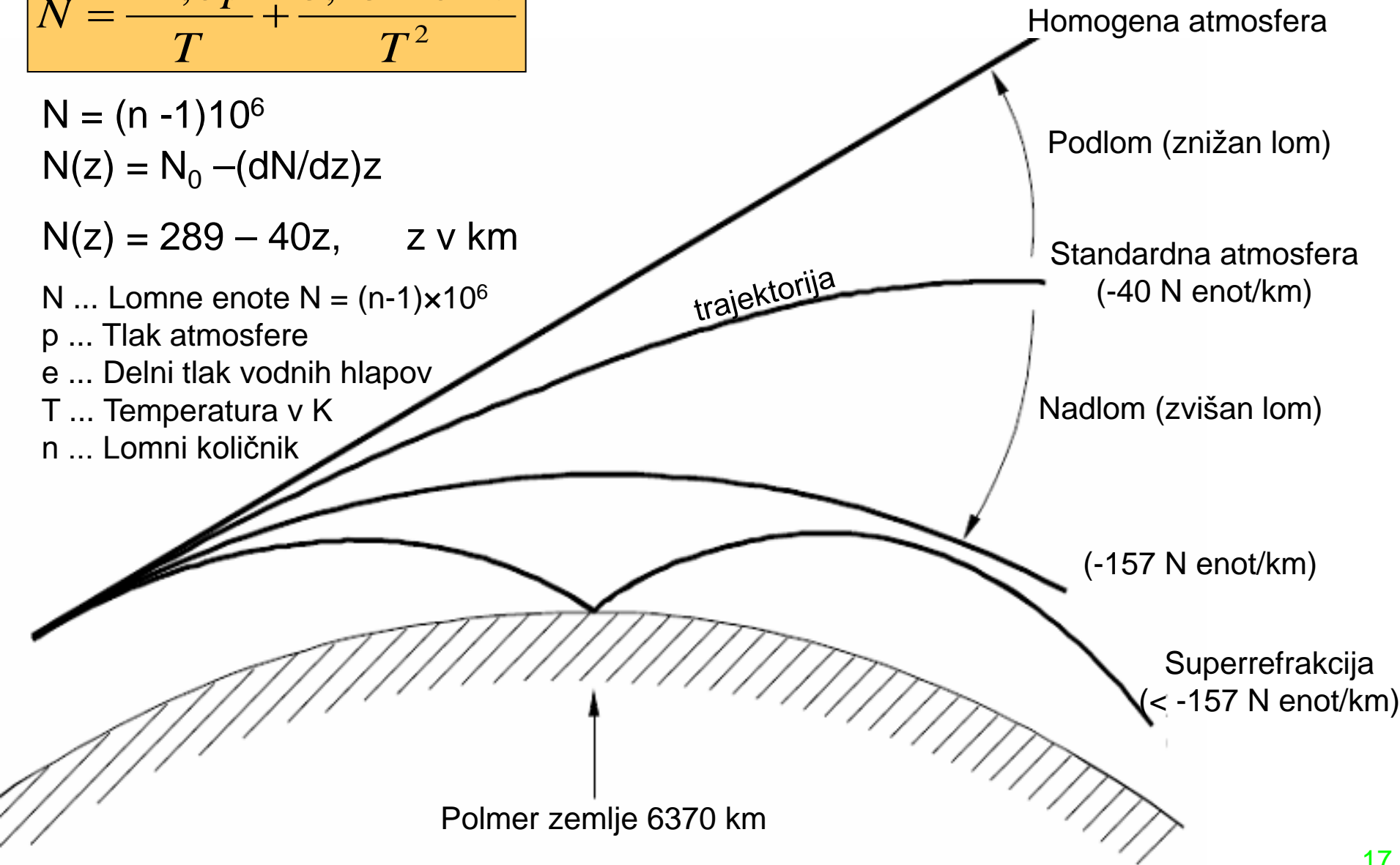
N ... Lomne enote $N = (n-1) \times 10^6$

p ... Tlak atmosfere

e ... Delni tlak vodnih hlapov

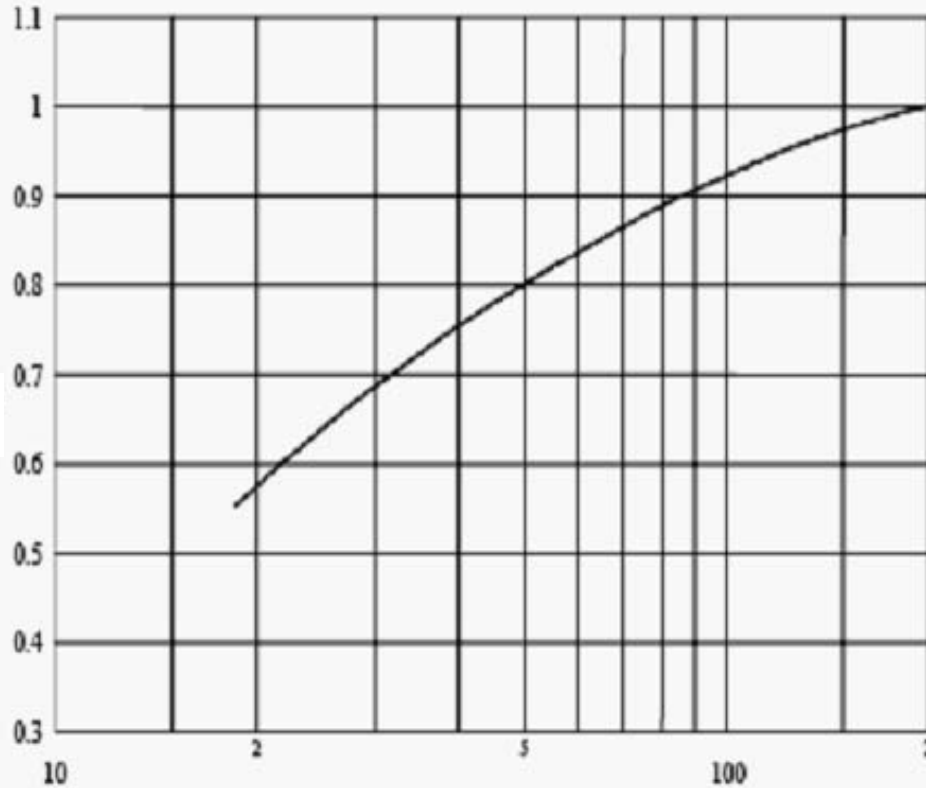
T ... Temperatura v K

n ... Lomni količnik

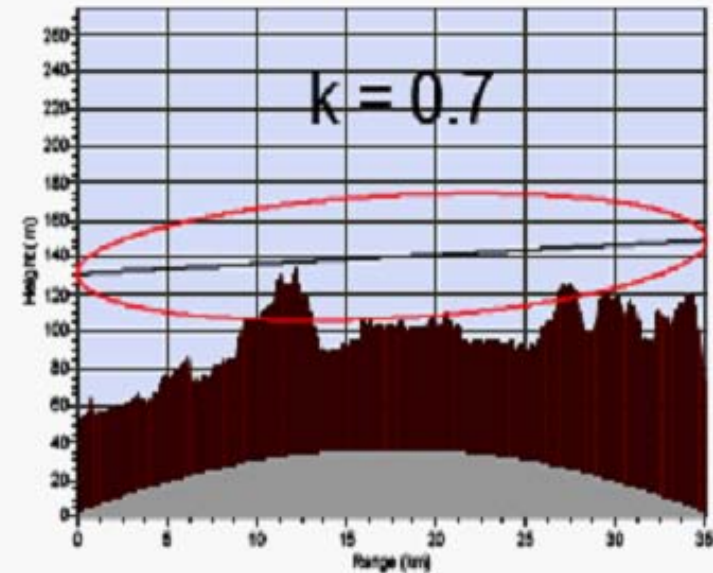
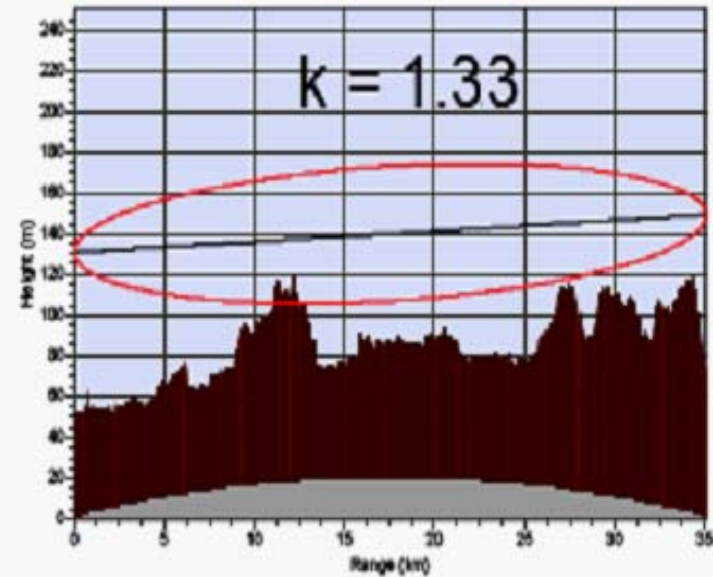


Podlom – vrednost k

Vrednost k tekom najslabšega meseca v 99,9 časa



Dolžina zveze



Lom v standardni troposferi

- Fizični polmer zemlje:
 - Navidezni polmer zemlje:
- Radijski valovi
- Svetloba

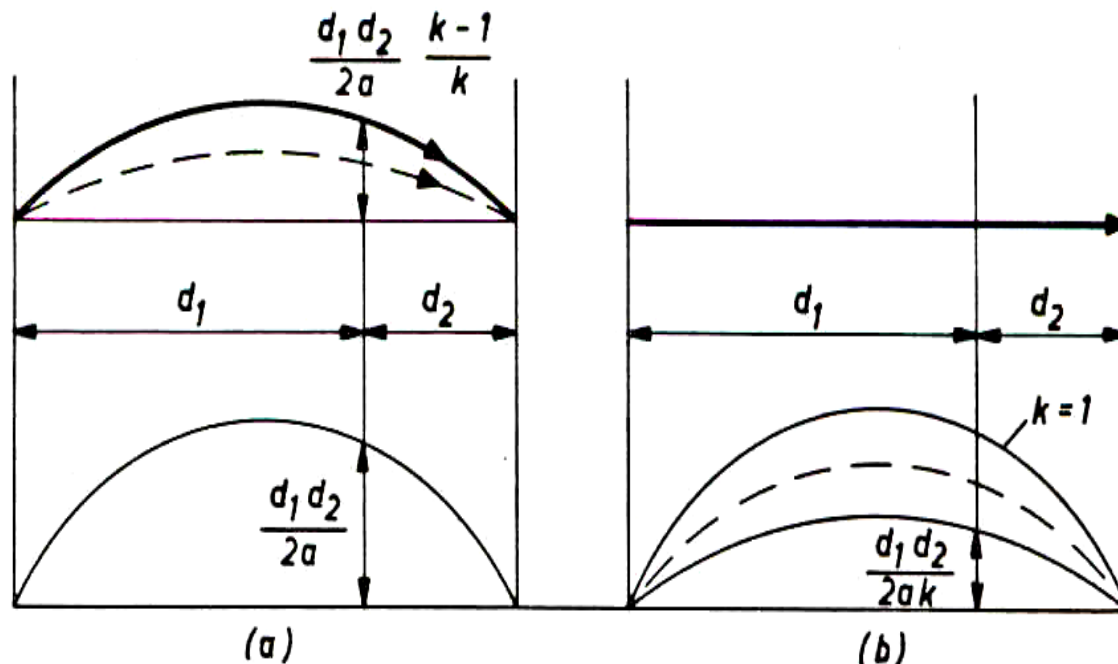
$$a = 6.370 \text{ km}$$

$$ka = 1,33a = 8.500 \text{ km}$$

$$ka = 1,18a = 7.520 \text{ km}$$

Dejanska trajektorija
 •Radio (polno)
 •Svetloba (prekinjeno)

Dejanska oblina Zemljine površine

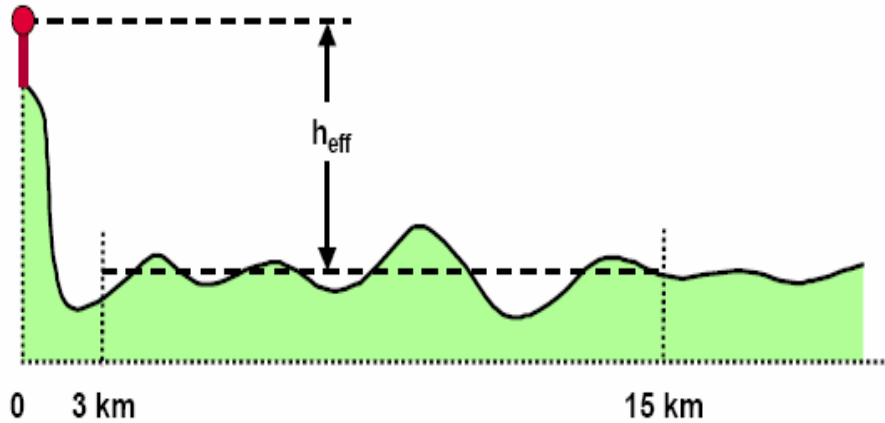


Navidezna trajektorija (raven žarek)

Navidezna oblina Zemljine površine
 •Radio (polno)
 •Svetloba (prekinjeno)

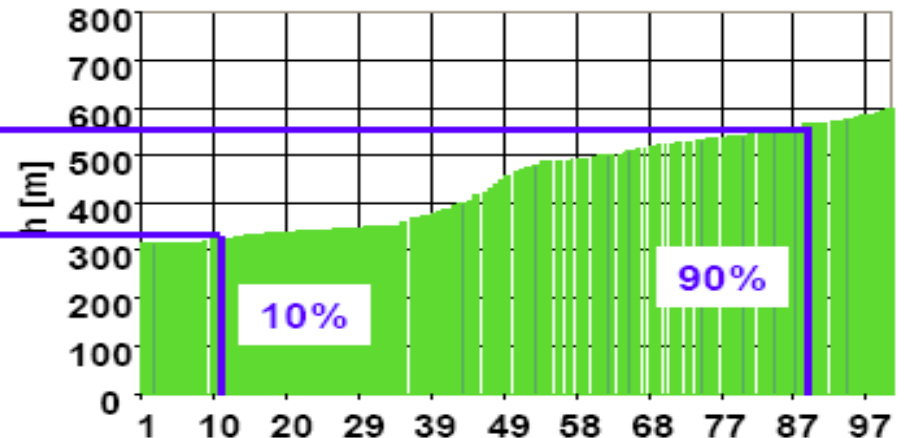
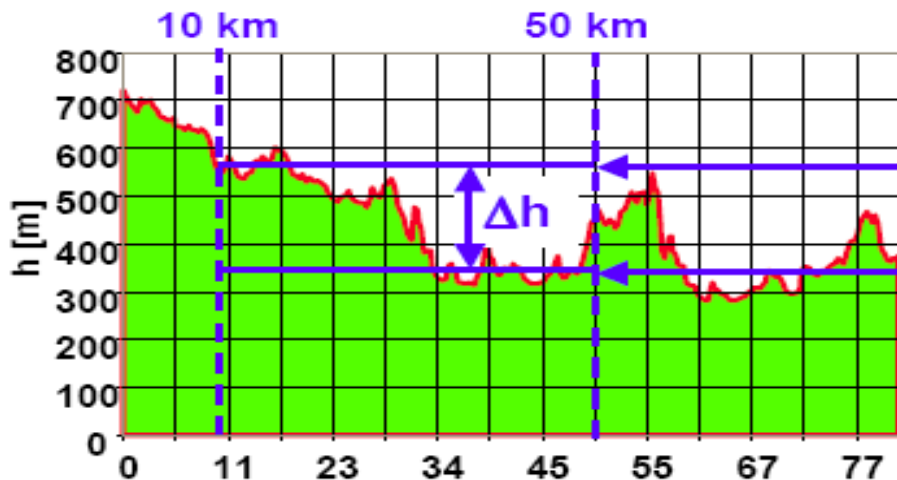
Statistični parametri terena

Efektivna višina oddajnih anten h_e



- Efektivna višina antene je višina nad povprečno višino terena na območju od 3 do 15 km pred anteno.
- Neravnost terena, določena na območju od 10 do 50 km pred anteno, je razlika višine, ki jo teren presega v 10% območja, in višine, ki jo teren ne dosega v 10% območja.

Neravnost terena Δh

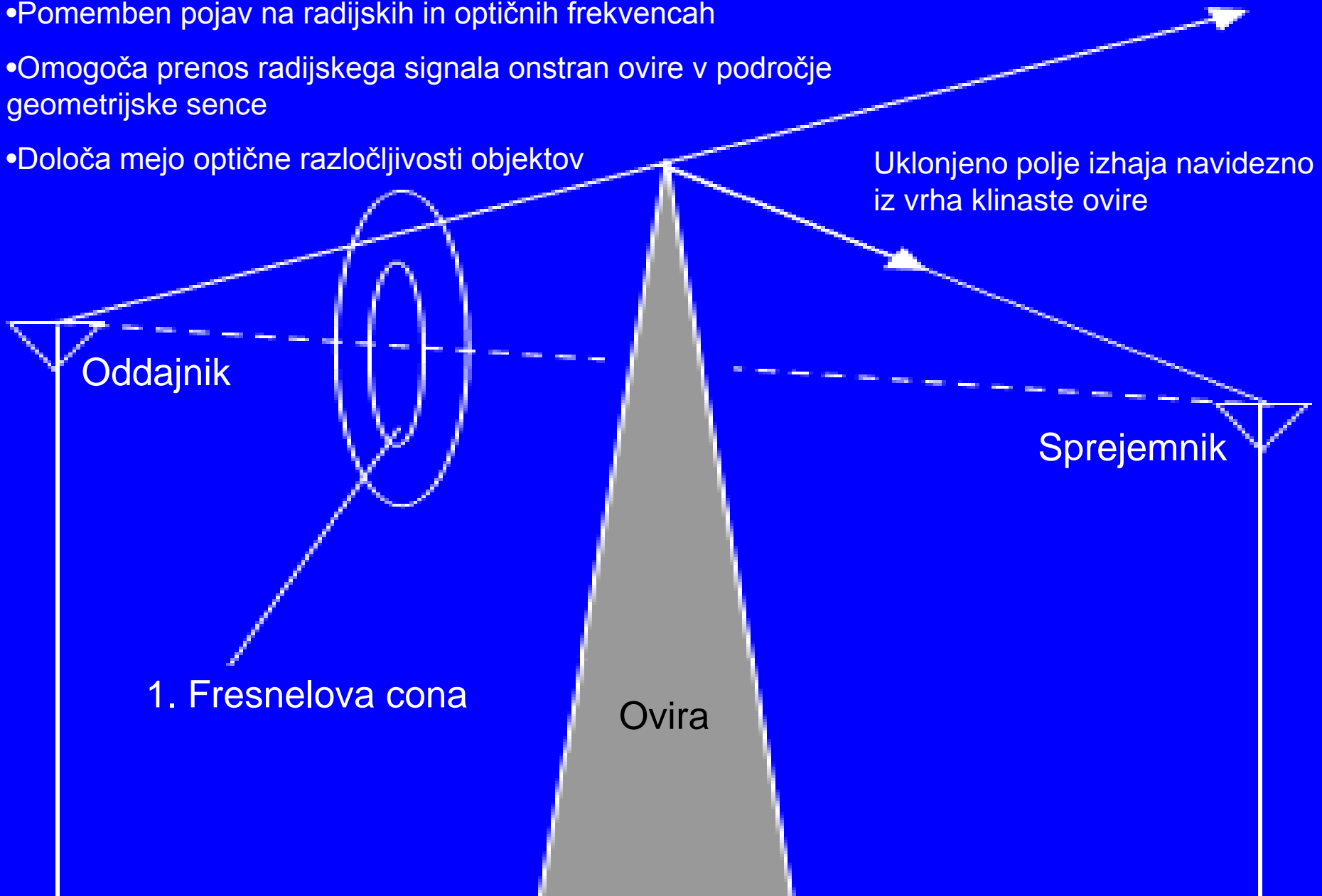


Princip stacionarne faze

- Princip stacionarne faze daje podlago za visokofrekvenčni (optični) približek pri reševanju problemov propagacije.
- Princip stacionarne faze omogoča prehod z valovne optike na geometrijsko (žarkovno) optiko (metoda “ray tracing” in “ray launching”).
- Pri seštevanju prispevkov Huygensovih virov (integraciji po ploskvi) prispevajo bistveno k rezultatu območja v okolici točk stacionarne faze. Z odmikom od točke stacionarne faze se fazni pogoji za konstruktivno interferenco bistveno ne spremenijo.
- V svetlobnem polju, na primer, so v prenosnem sistemu (vir, lomno-odbojni medij, opazovalec) točke stacionarne faze tiste, katerih okolica vidno zablesti. Vse druge točke prostora so za širjenje med virom in opazovalcem manj pomembne ali nepomembne.
- Pri uklonu na ostri oviri so točke, ki so najbližje (zaslonjeni) točki stacionarne faze, porazdeljene na robu ovire. Le-ta deluje kot navidezni vir uklonjenega polja (rob vidno zablesti).
- Mnogi znani pojavi in principi so povezani s principom stacionarne faze (Fermatov princip, Snellov zakon, drugi).

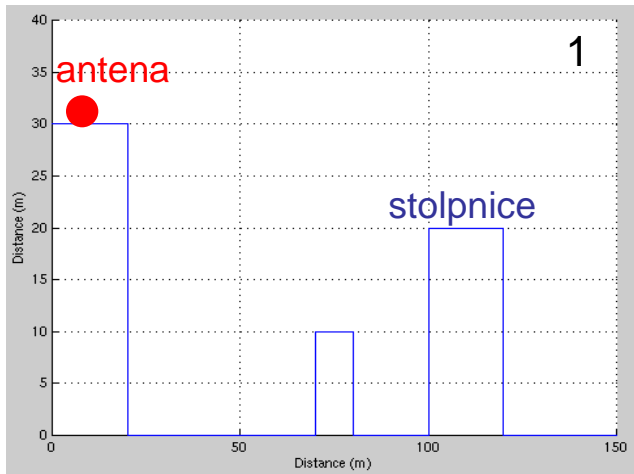
Uklon

- Pomemben pojav na radijskih in optičnih frekvencah
- Omogoča prenos radijskega signala onstran ovire v področje geometrijske sence
- Določa mejo optične razločljivosti objektov

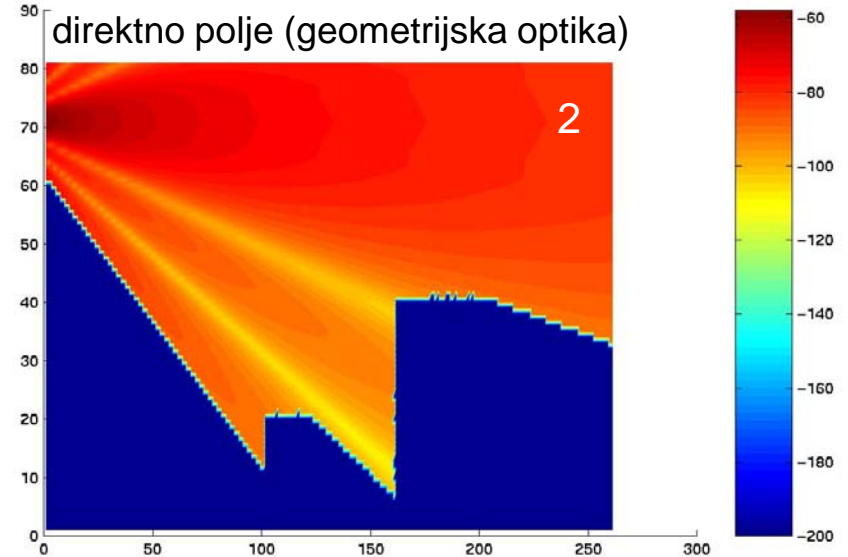


Primer uklona na ovirah (simulacija)

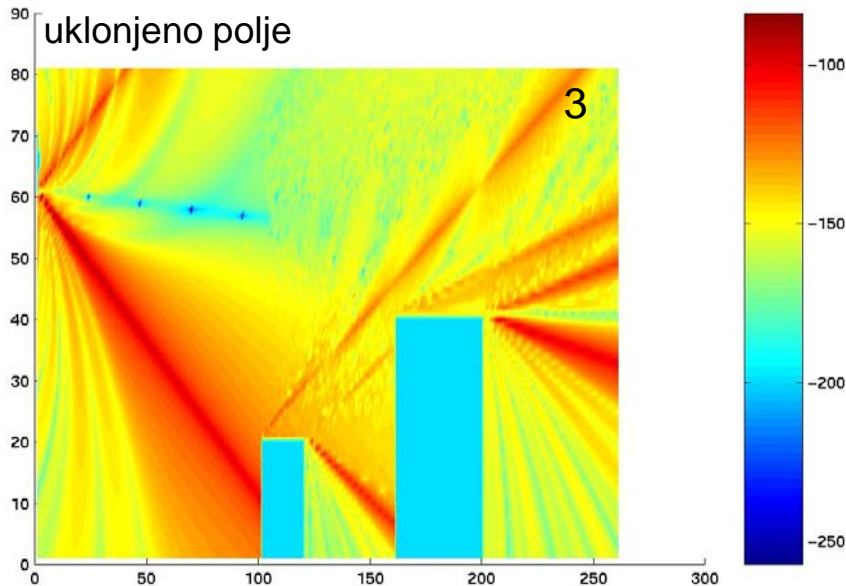
geometrija prostora



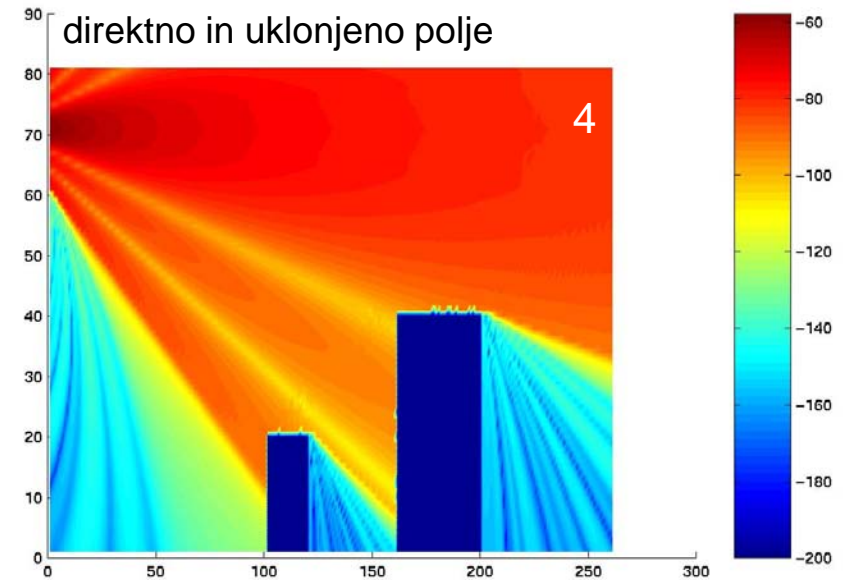
direktno polje (geometrijska optika)



uklonjeno polje



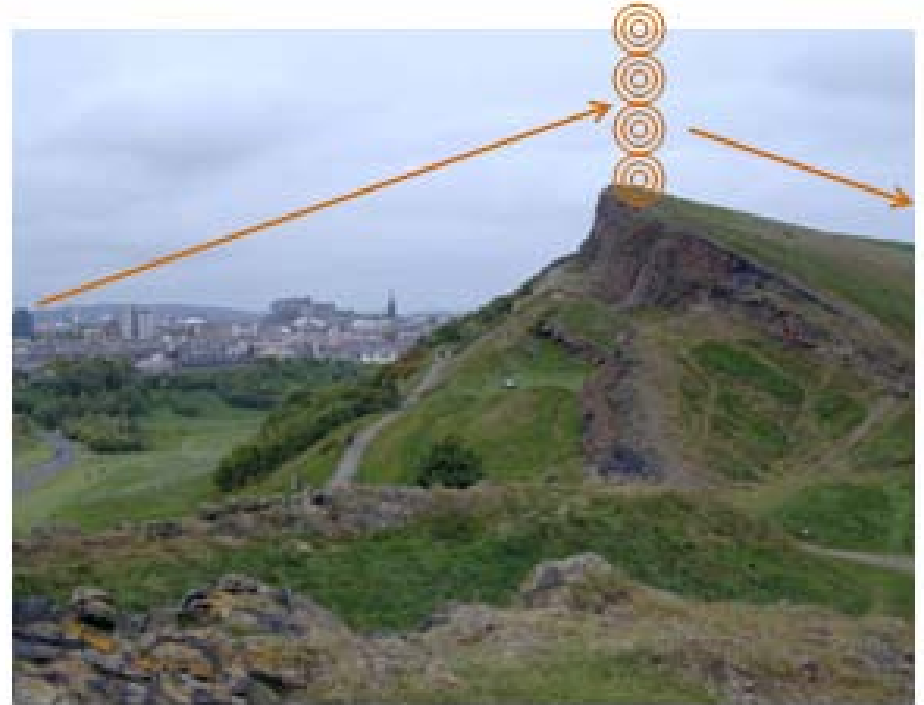
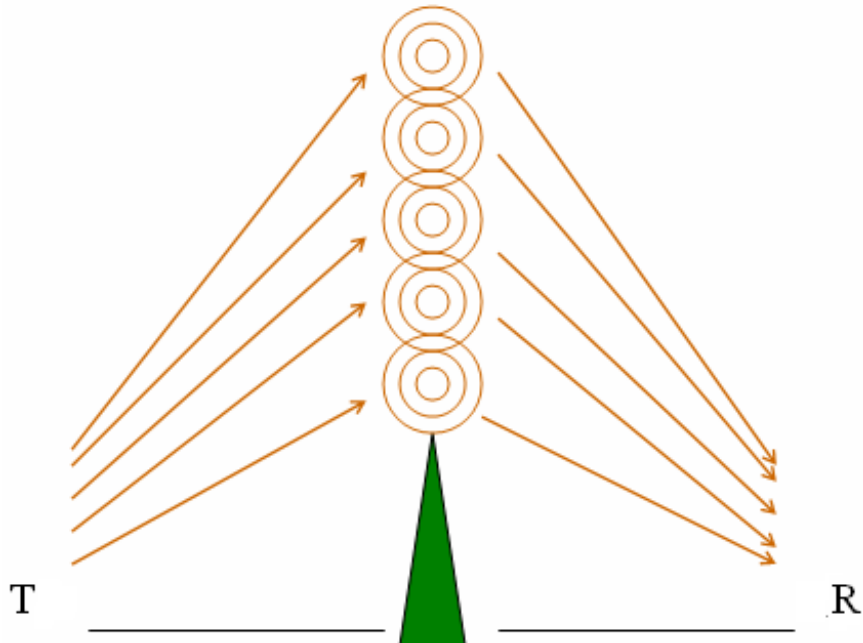
direktno in uklonjeno polje



Na meji med osvetljenim prostorom in geometrijsko senco se pojavlja uklonjeno polje, ki poskrbi za zvezen prehod svetlobe iz področja sence v področje osvetljenosti.

Huygensov princip

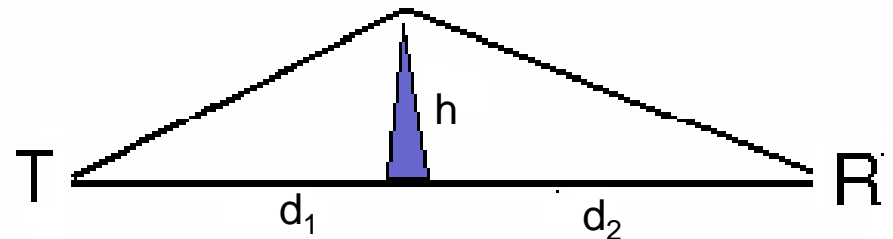
Huygensovi viri sevajo naprej (kardioida)



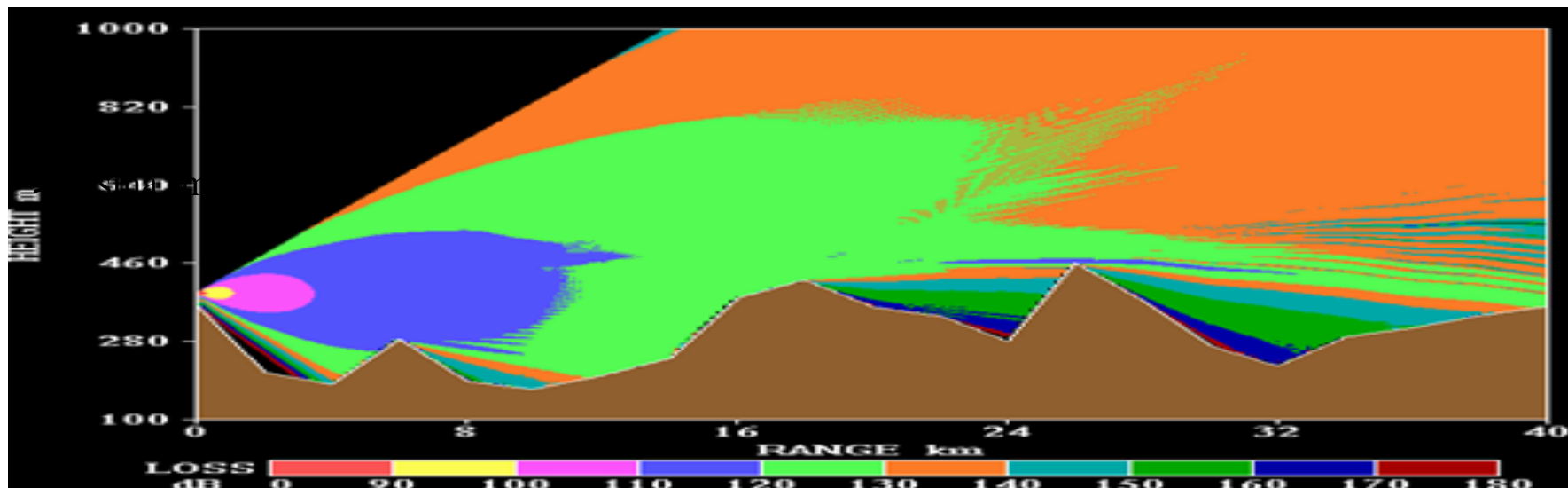
h ... Višina klinaste ovire nad zveznico oddajna antena - sprejemna antena

d_1 ... Razdalja oddajnik-ovira

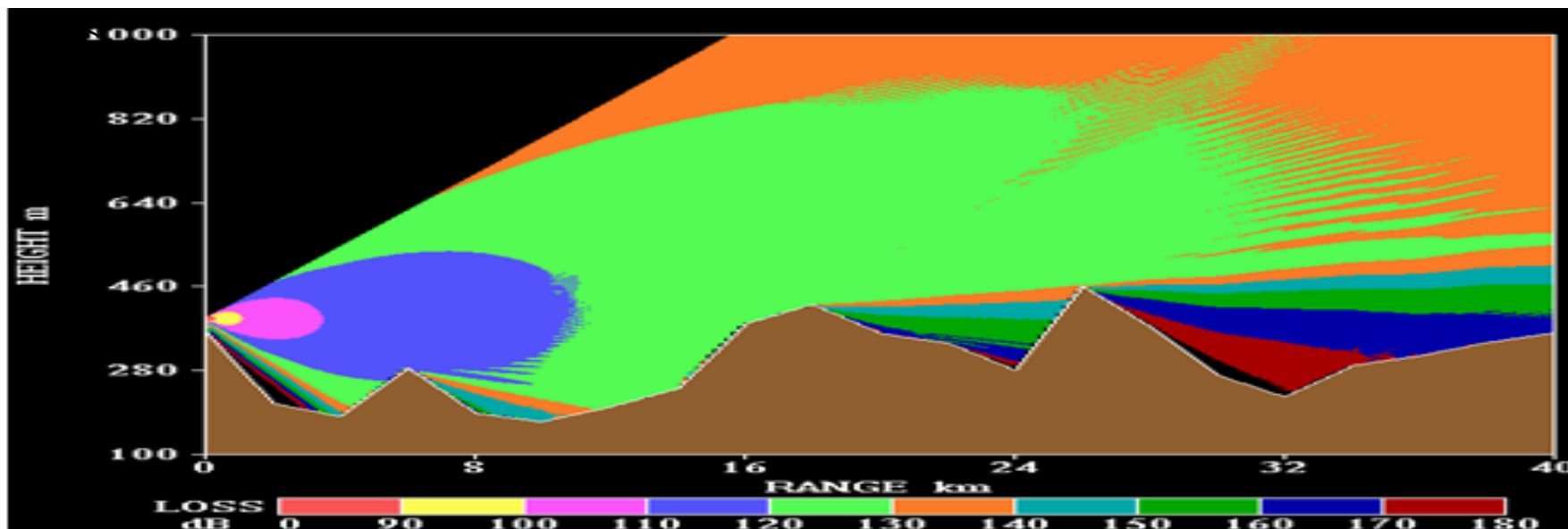
d_2 ... Razdalja sprejemnik-ovira



Uklon na razgibanem terenu

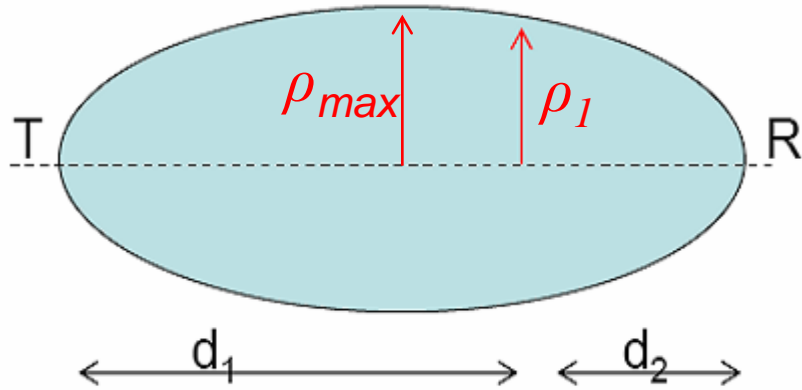


Uklonsko slabljenje v pogojih povišane lomnosti. V barvni lestvici je označeno skupno slabljenje.



Uklonsko slabljenje v pogojih standardne troposfere. V barvni lestvici je označeno skupno slabljenje.

Fresnelove cone



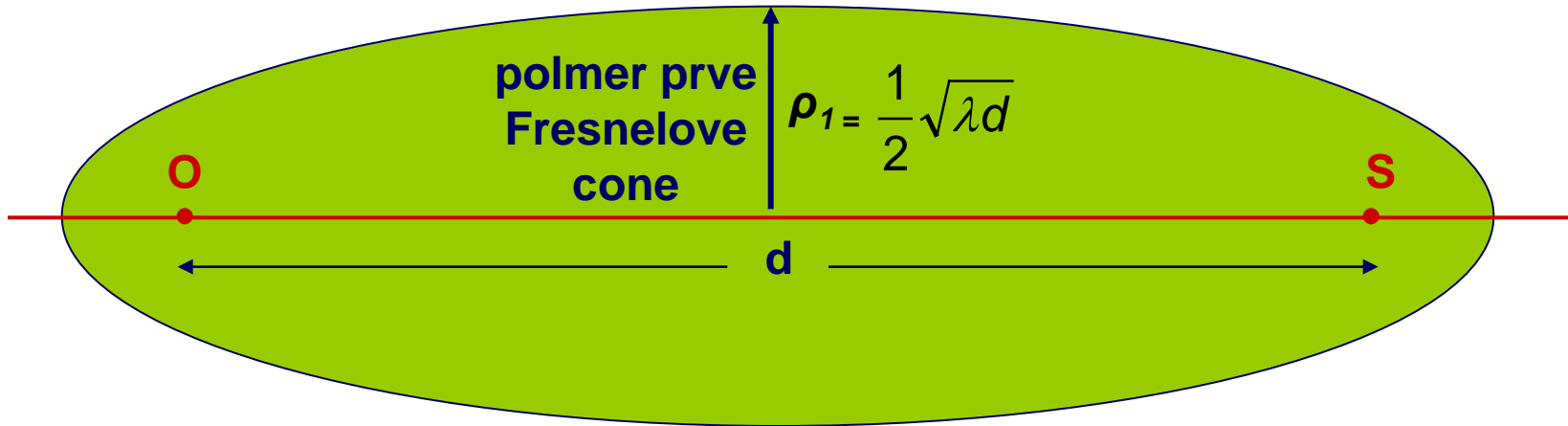
$$\rho_1 = \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{d}} \leq \rho_{\max} = \frac{1}{2} \sqrt{\lambda d}$$

ρ_1 ... polmer 1. Fresnelove cone, m
 $d = d_1 + d_2$... Razdalja T-R, m
 d_1 ... razdalja oddajnik-ovira, m
 d_2 ... razdalja sprejemnik-ovira, m
 λ ... valovna dolžina, m

- Za širjenje skozi prostor potrebuje val določen prostor, minimum katerega določa 1. Fresnelov elipsoid.
- 1. Fresnelov elipsoid simbolizira to, kar si v optiki predstavljamo z žarkom med dvema točkama. Pri $\lambda \rightarrow 0$, se elipsoid stanjša v daljico - žarek.
- Prehod iz radijskega področja v podmilimetrsko in optično področje si najlaže predstavimo s Fresnelovimi conami.
- Pri odprtem 1. Fresnelovem elipsoidu in zastrtih elipsoidih višjega reda, se sprejemano polje poveča dvakrat glede na polje v praznem prostoru (interferenčni paradoks).
- **Merilo za velikost con ni λ temveč $(\lambda)^{1/2}$.**
- Fresnelove cone so pripomoček za kvalitativno obravnavo razširjanja valov.

Pomen Fresnelovih con za širjenje

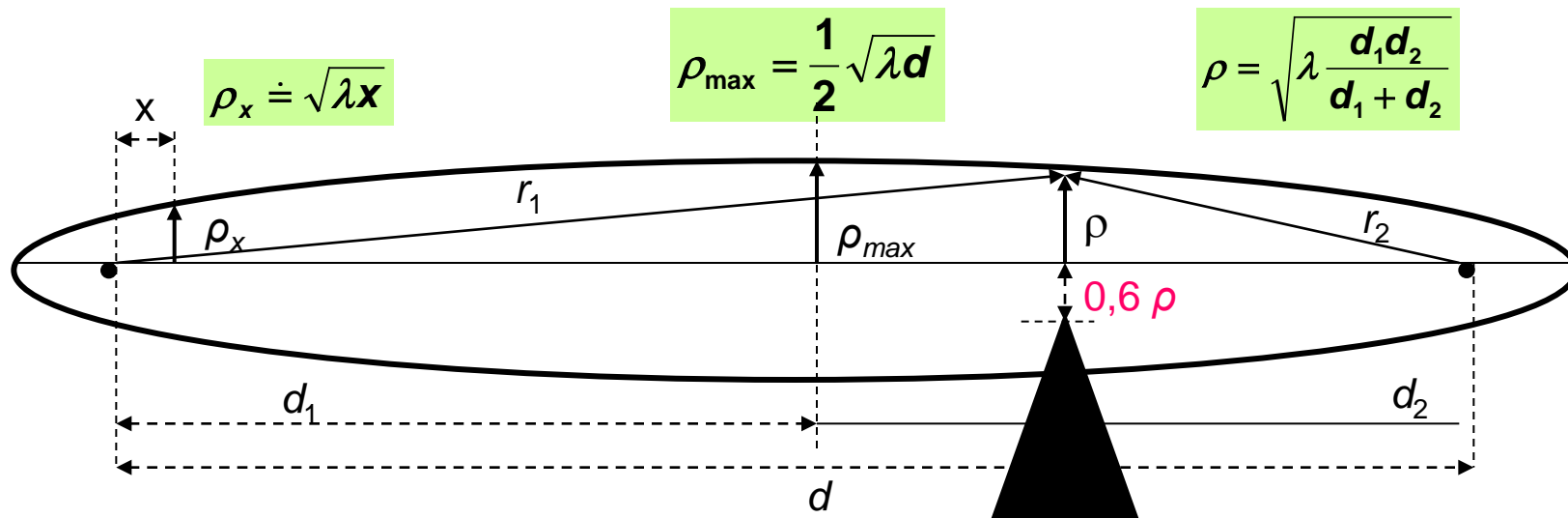
Nemoteno širjenje:



Val na poti O-S se širi podobno kot v praznem prostoru, če je prostor vsaj znotraj 1. Fresnelovega elipsoida prazen. Površino prereza tega elipsoida na polovični razdalji $(\pi/4)\lambda d$ v pasu ISM 2,4 GHz ($\lambda = 0,125$ m) pri razdalji $d = 10$ m ocenimo na 1 m^2 , na razdalji $d = 10$ km pa na 1000 m^2 .

Zakrivanje Fresnelovega elipsoida

Prostor, iz katerega sprejemamo Huygensove valove pretežno sofazno (s fazno razliko 0 do π) je rotacijski elipsoid z goriščema v oddajni in sprejemni točki.

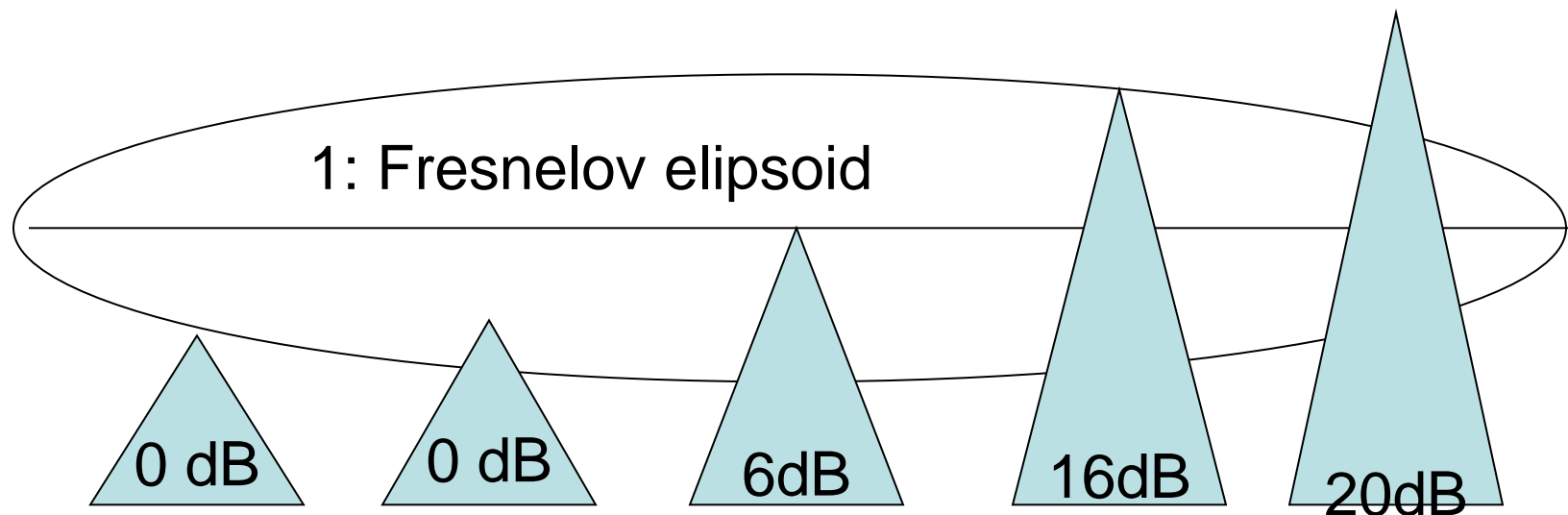


- Za praktično nezmanjšani sprejem sme koničasta ovira z ravnim robom segati v prostor 1. Fresnelove cone do največ $0,6 \rho$, kjer je ρ polmer prve cone na mestu ovire.
- Slabljenje, ki ga povzroča ovira (zaslon) površine $A \gg \lambda^2$ v središčnem delu 1. Fresnelove cone je v grobem približku

$$L = -10 \log \left(1 - \frac{A}{\rho^2 \pi} \right)$$

Ocenitev uklonskega slabljenja

- Ni zaslonitve: 0 dB
- Zaslonitev 40% (odprtost 60%): 0 dB
- Zaslonitev do zveznice med antenama: 6 dB
- Zaslonitev do zgornjega roba 1. Fresnelovega pasu: 16 dB
- Zaslonitev do zgornjega roba 2. Fresnelovega pasu: 20 dB
- Zaslonitev do 2xširine 1. Fresnelovega pasu: 22 dB

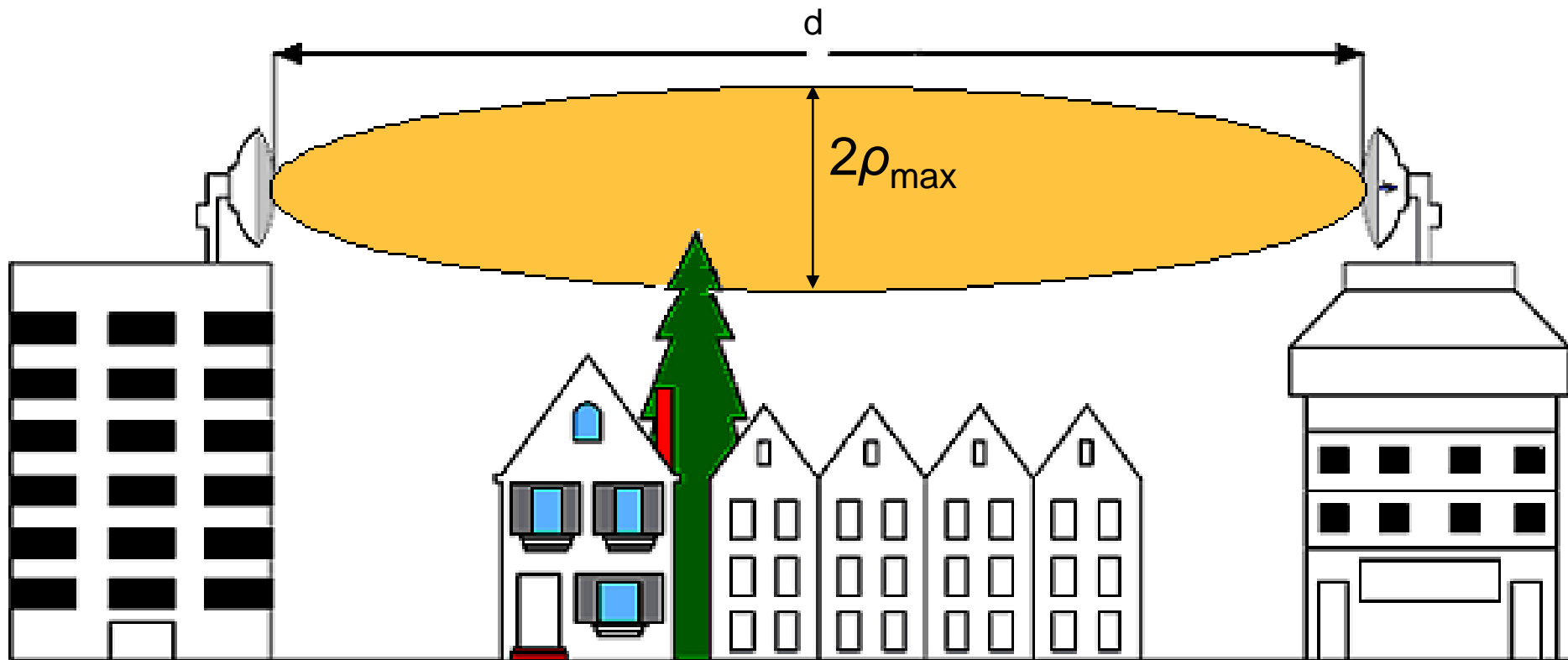


V primerjavi z drugimi vrstami slabljenja ima uklonsko slabljenje zmerno vrednost.

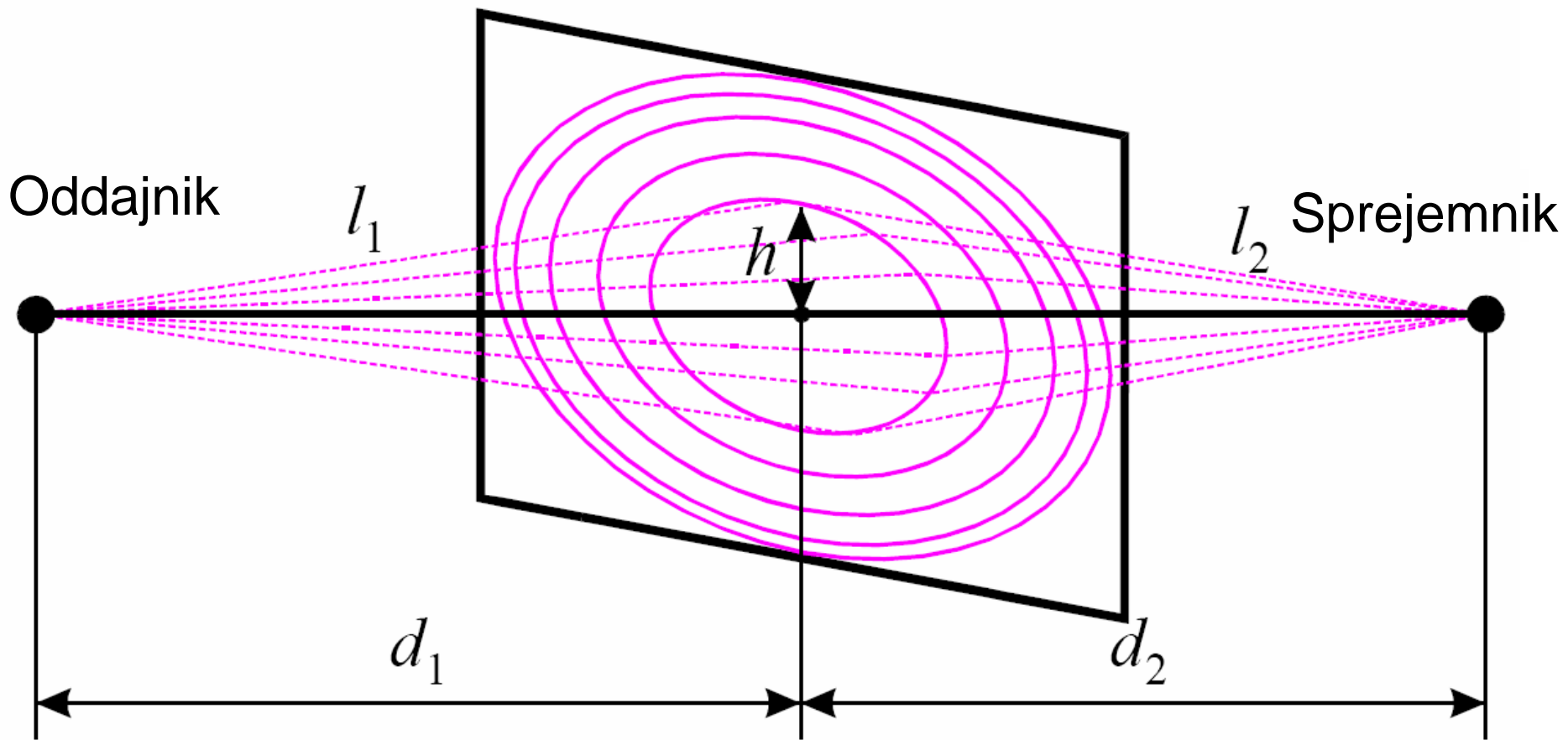
Polmer 1. Fresnelovega elipsoida

Največja vrednost premera $2\rho_{\max}$ [m]

Razdalja d [km]	0,1	0,3	0,5	1,0	3,0	5,0	10,0
$\lambda = 30$ cm	5,5	9,5	12,2	17,3	30,0	38,7	54,7
$\lambda = 15$ cm	3,9	6,7	8,65	12,3	21,3	27,5	38,8
$\lambda = 10$ cm	3,2	5,5	7,1	10,0	17,3	22,4	31,6



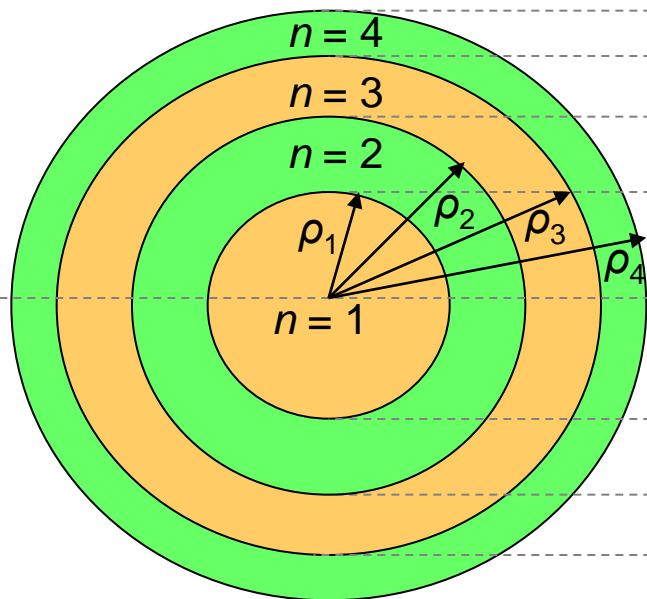
Fresnelovi kolobarji v prostoru



Fresnelove cone - geometrija

Območja v prostoru ali na ploskvi med oddajno in sprejemno anteno razmejujemo po faznem kriteriju glede na pomen, ki ga imajo za razširjanje vala. Najpomembnejša območja so v okolici točk stacionarne faze.

Fresnelovi kolobarji

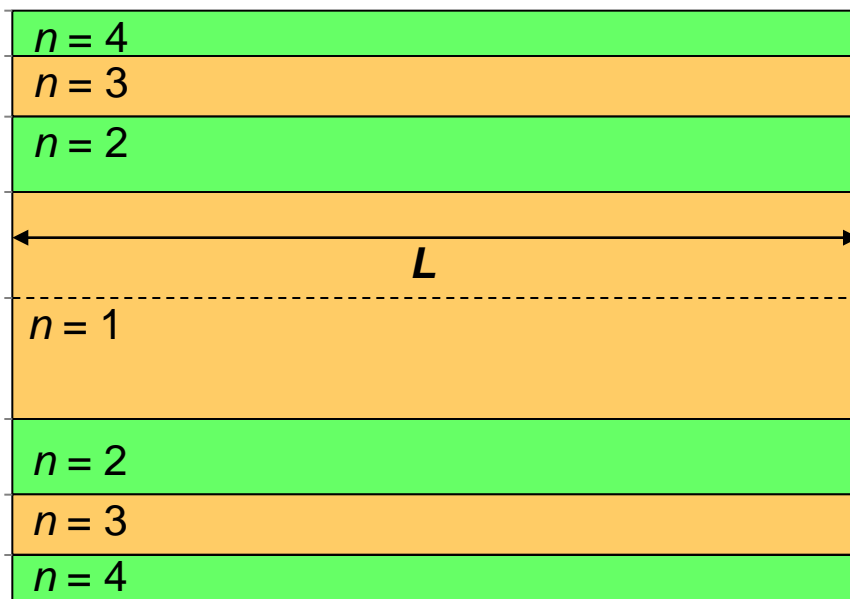


Površina con:

$$A_n = (\rho_{n+1}^2 - \rho_n^2)\pi = \lambda\pi \frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2}$$

je neodvisna od reda n cone, zato je konvergenca počasna.

Fresnelovi pasovi



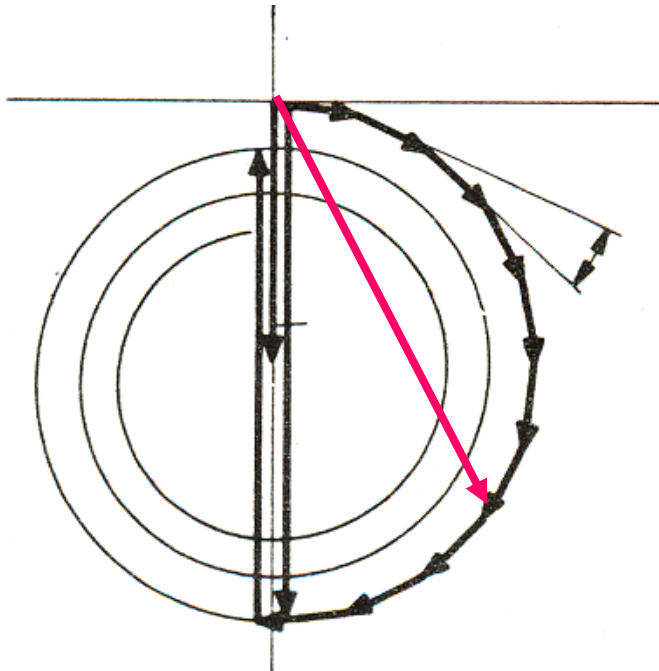
Površina con:

$$A_n = 2(\rho_{n+1} - \rho_n)L = 2L \sqrt{\frac{\lambda d_1 d_2}{d_1 + d_2}} (\sqrt{n+1} - \sqrt{n})$$

upada z rastočim redom cone, zato je konvergenca prispevkov hitrejša.

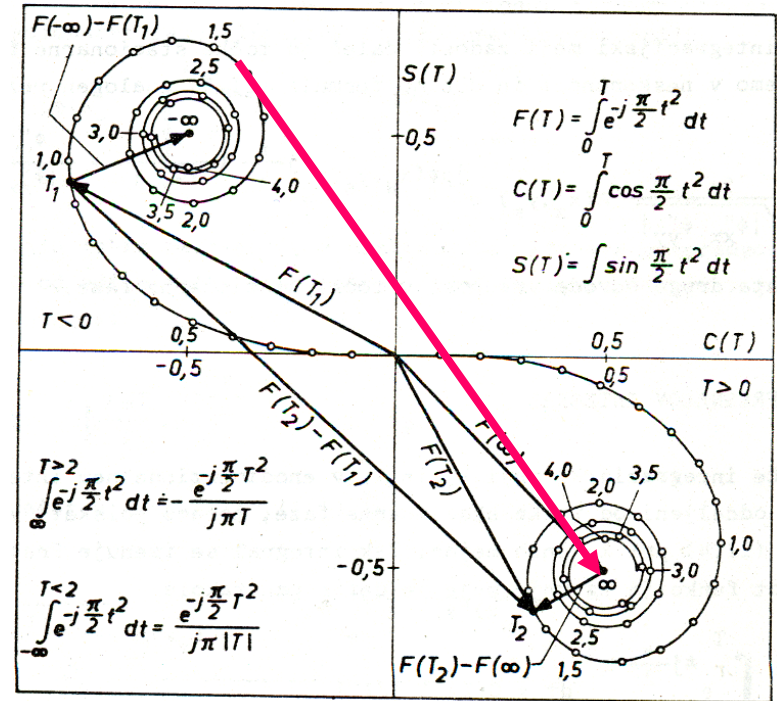
Fresnelove cone – obravnava polja

Fresnelovi kolobarji



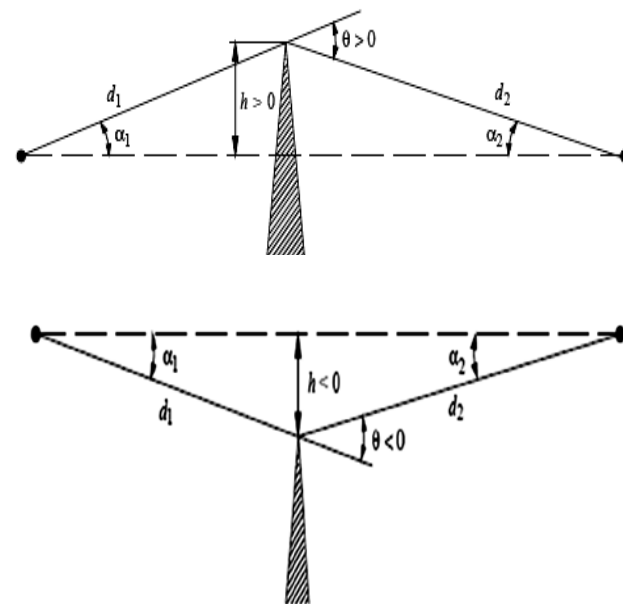
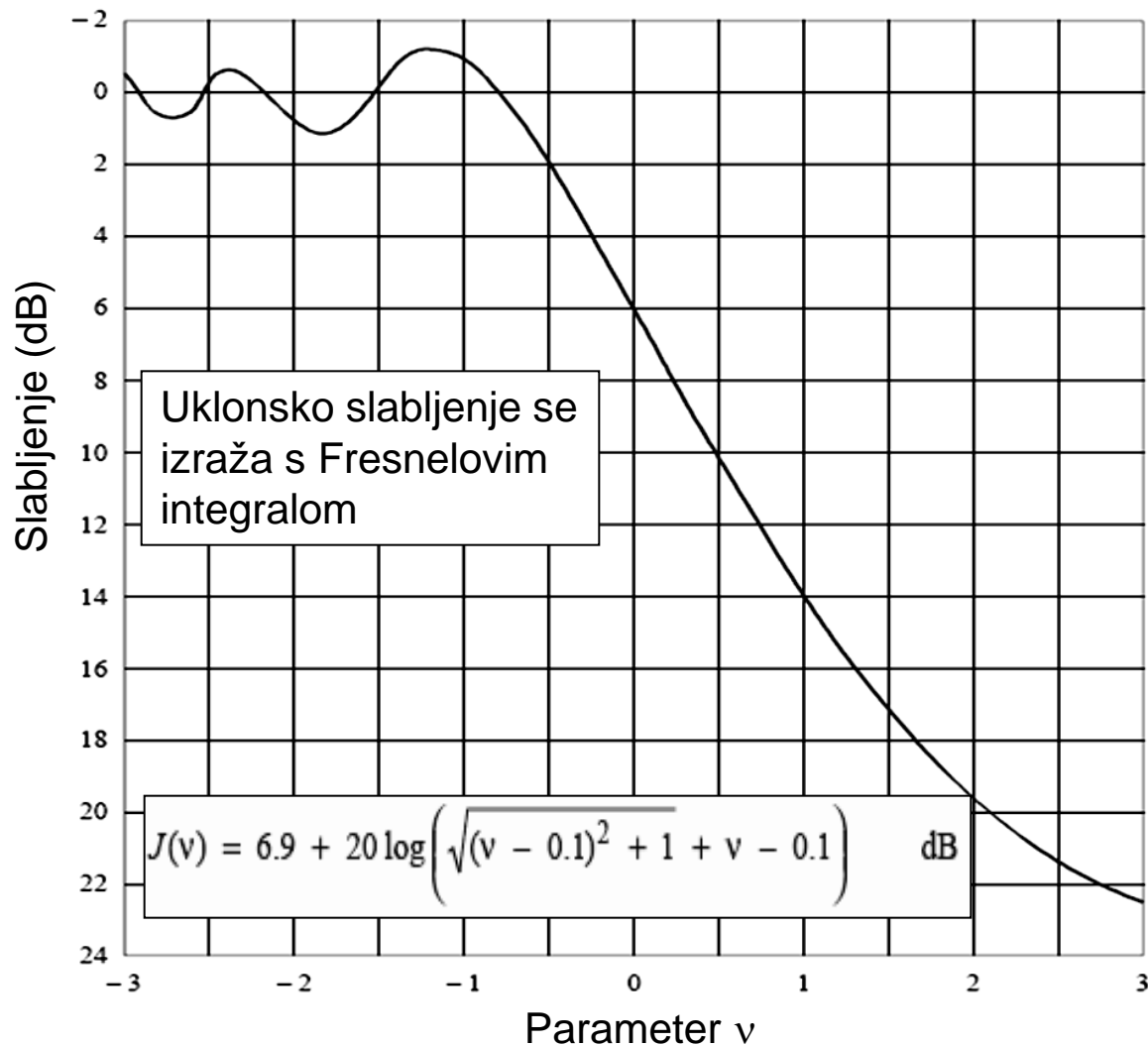
Z odkrivanjem kolobarjev polje močno oscilira in se počasi umirja proti vrednosti E_0 v neomejenem prostoru. Konvergenco omogočata rastoča razdalja in usmerjeno sevanje Huygensovih virov.

Fresnelovi pasovi



Z odkrivanjem pasov se oscilacije polja hitreje umirjajo proti vrednosti E_0 v neomejenem prostoru. Hitrejše konvergenco omogoča upadanje površine Fresnelovih pasov višjega reda.

Potek uklonskega slabljenja

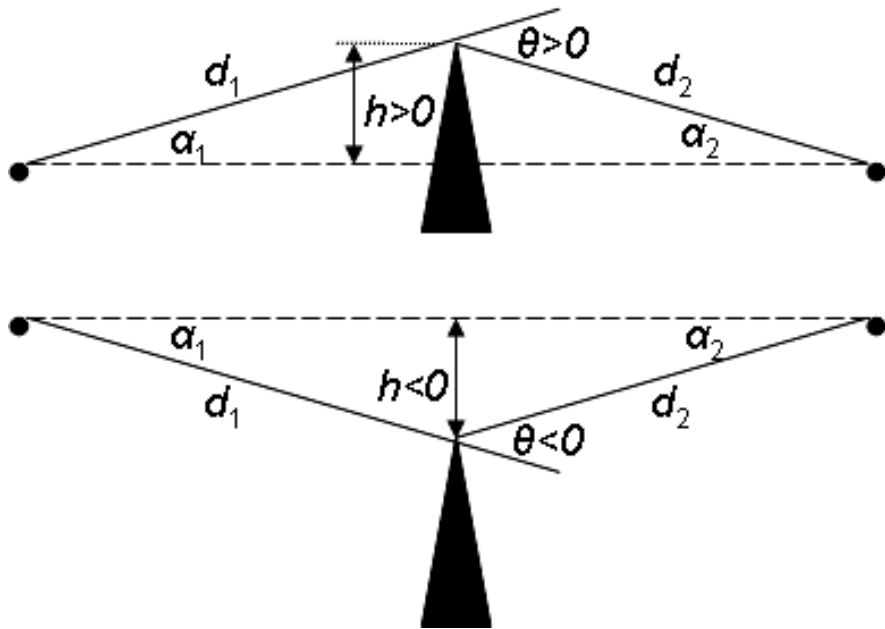


$$v = h \sqrt{\frac{2}{\lambda} \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)}$$

$$v = \theta \sqrt{\frac{2}{\lambda \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)}}$$

Uklon na absorpcijski klinasti oviri

Klinasta ovira nad zveznico in pod njo:



$$v = \sqrt{\frac{2h\theta}{\lambda}}$$

$$v = \sqrt{2} \frac{h}{\rho_1}$$

$$v = \sqrt{\frac{2d}{\lambda} \alpha_1 \alpha_2}$$

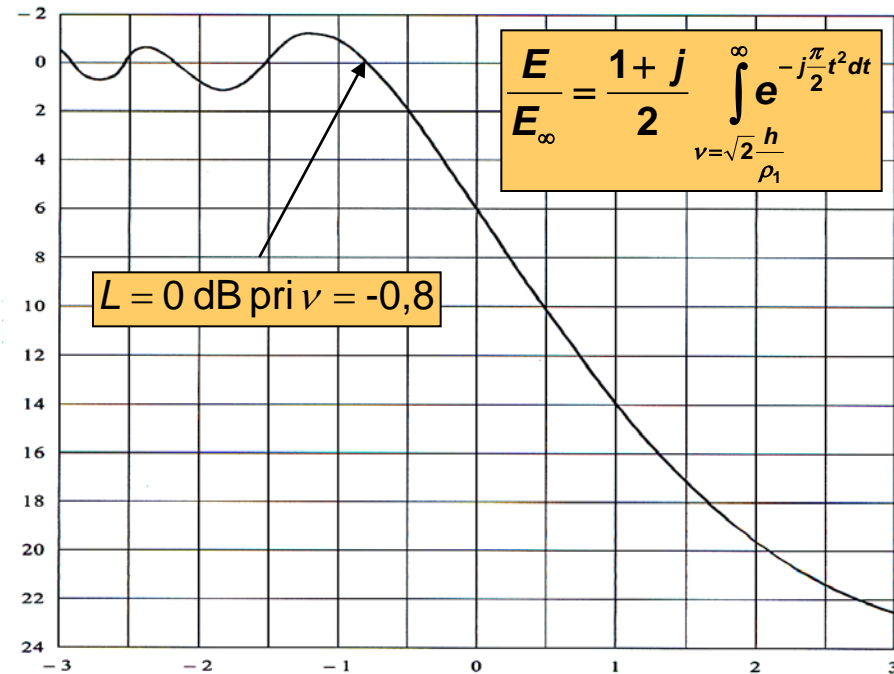
$$\rho_1 = \sqrt{\lambda \frac{d_1 d_2}{d_1 + d_2}}$$

$$\theta = h \left(\frac{1}{d_1} + \frac{1}{d_2} \right)$$

$$v = 0,0316 h \sqrt{\frac{2(d_1 + d_2)}{\lambda d_1 d_2}}$$

Praktične enote
(λ , h [m], d_1 , d_2 [km])

Uklonsko slabljenje:



$$v > -0,7: L_{dB} \doteq 6,9 + 20 \log \left(\sqrt{(v - 0,1)^2 + 1} + v - 0,1 \right)$$

$$v > 2,4: L \doteq -20 \log \frac{0,225}{v} = 13 + 20 \log v$$

$$\frac{E}{E_0} = \frac{1 + j}{2} \int_v^\infty e^{-j \frac{\pi}{2} t^2} dt$$

$$L_{k,dB} = 20 \log \left| \frac{E_0}{E} \right|$$

Uklonjeni val navidezno zhaja iz vrha ovire.

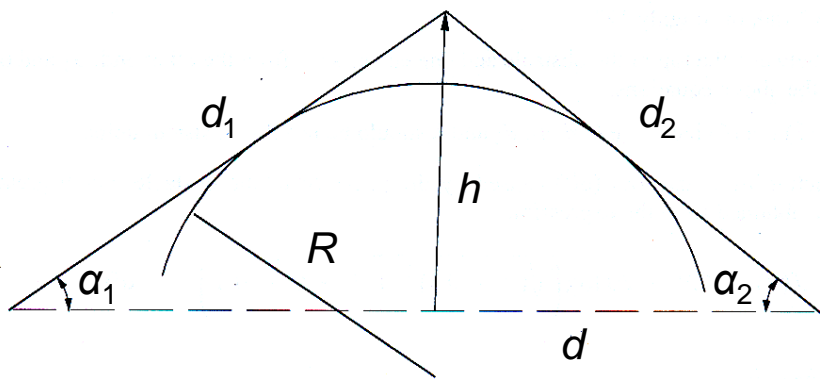
Uklonsko slabljenje klinaste ovire

Ovira sega do višine h nad zveznico med antenama (NLOS):

$$L_{\text{dB}} = 10 \log P_1/P_2 = \\ = 16 + 20 \log(h/\rho_1)$$

kjer je ρ_1 polmer 1. Fresnelove cone na mestu ovire. Ko ovira prekriva 1. cono znaša slabljenje 16 dB. Merilo za višino je ρ_1 . Nadaljni dvig ovire za ρ_1 prinese dodatno slabljenje 6dB. slabljenja. Formula velja pri $h > \sqrt{2}\rho_1$.

Uklon na absorpcijski cilindrični oviri

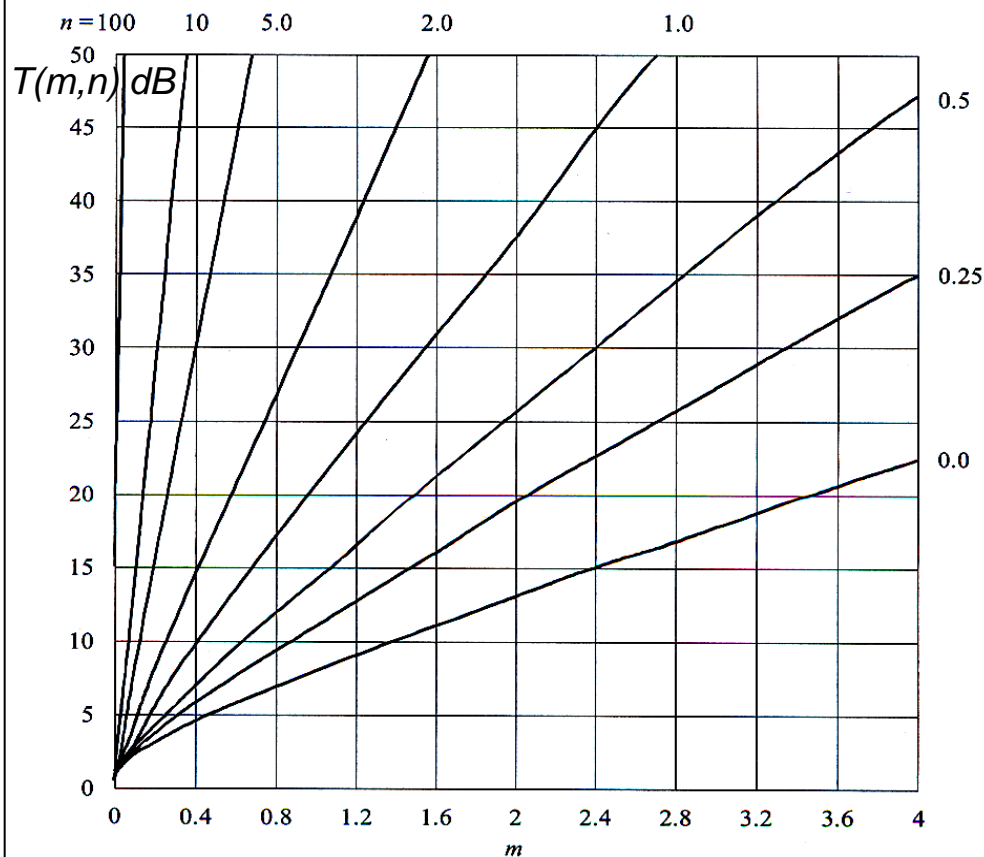


$$k = 8,2 + 12 n$$

$$b = 0,73 + 0,27(1 - e^{-1,43n})$$

$$n = \frac{h \sqrt[3]{\left(\frac{\pi R}{\lambda}\right)^2}}{R}$$

$$m = R \frac{d_1 + d_2}{d_1 d_2} \sqrt[3]{\frac{\pi R}{\lambda}}$$



$$L_{c,dB} = L_{k,dB} + T(m,n) \quad T(m,n) = km^b$$

$L_{c,dB}$ slabljenje cilindrične ovire polmera R

$L_{k,dB}$ slabljenje ekvivalentnega klina višine h

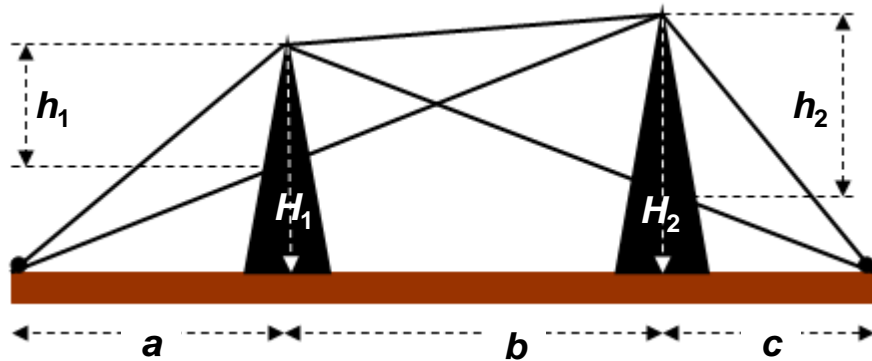
Pregled metod za uklonsko slabljenje na več klinastih ovirah

Metode, ki se najpogosteje uporabljajo:

- Bullington
- Epstein – Peterson
- Deygout
- **Giovaneli**
- Millington (teoretični model za 2 oviri)
- Vogler (model za n ovir)
- drugi

Uklon na dveh absorpcijskih klinastih ovirah (Epstein-Peterson, Deygout in Giovaneli)

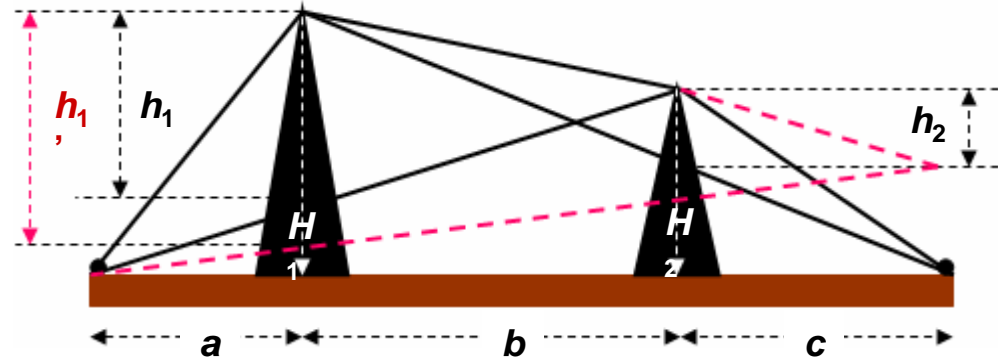
Primer enakovrednih ovir



$$L = L_1 + L_2$$

$$\left. \begin{aligned} L_1 &= L(h_1, a, b) \\ L_2 &= L(h_2, b, c) \end{aligned} \right\} \text{Epstein - Peterson}$$

Primer prevladujoče ovire



$$L = L_1 + L_2$$

$$\left. \begin{aligned} L_1 &= L(H_1, a, b+c) \\ L_2 &= L(h_2, b, c) \end{aligned} \right\} \text{Deygout}$$

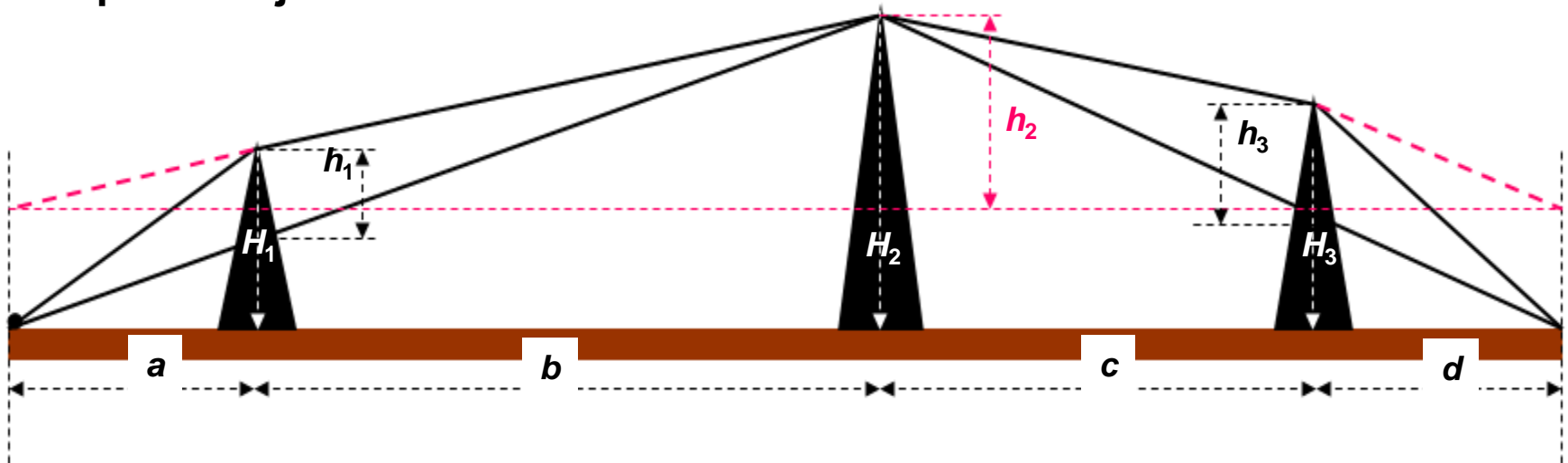
$$\left. \begin{aligned} L_1 &= L(h'_1, a, b+c) \\ L_2 &= L(h_2, b, c) \end{aligned} \right\} \text{Giovaneli}$$

Analitična metoda za dve oviri na osnovi Fresnel-Kirchhoffa:

Millingtonova rešitev izražena s površinskim (dvojnim) Fresnelovim integralom

Uklon na treh absorpcijskih klinastih ovirah (Deygout, Giovaneli)

Primer prevladujoče ovire



$$L = L_1 + L_2 + L_3$$

$$L_1 = L(h_1, a, b)$$

$$L_2 = L(H_2, a + b, c + d)$$

$$L_3 = L(h_3, c, d)$$

Deygout
precenitev
slabljenja

$$L = L_1 + L_2 + L_3$$

$$L_1 = L(h_1, a, b)$$

$$L_2 = L(h_2, a + b, c + d)$$

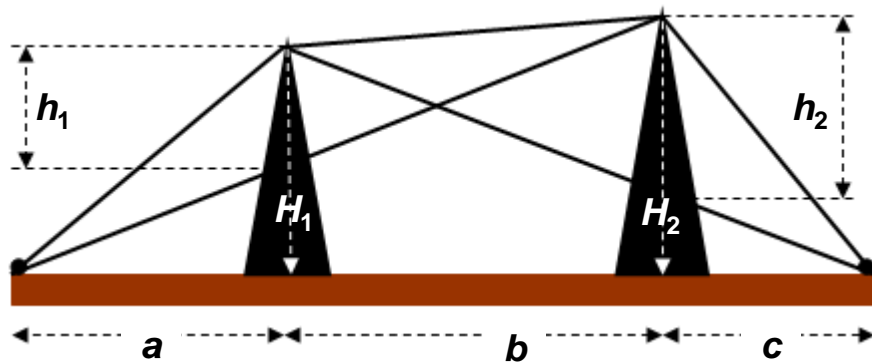
$$L_3 = L(h_3, c, d)$$

Giovaneli

Splošna metoda za n ovir na osnovi Fresnel-Kirchoffa je Voglerjeva metoda.

Uklon na dveh absorpcijskih klinastih ovirah (Epstein-Peterson, Deygout in Giovaneli)

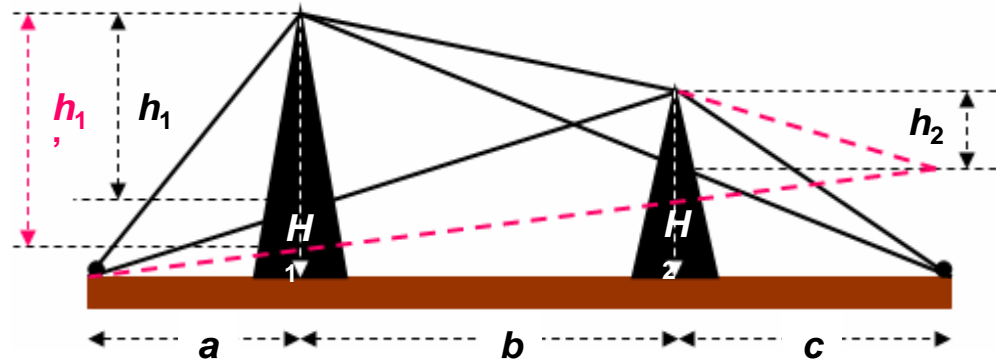
Primer enakovrednih ovir



$$L = L_1 + L_2$$

$$\left. \begin{aligned} L_1 &= L(h_1, a, b) \\ L_2 &= L(h_2, b, c) \end{aligned} \right\} \text{Epstein - Peterson}$$

Primer prevladujoče ovire



$$L = L_1 + L_2$$

$$\left. \begin{aligned} L_1 &= L(H_1, a, b+c) \\ L_2 &= L(h_2, b, c) \end{aligned} \right\} \text{Deygout}$$

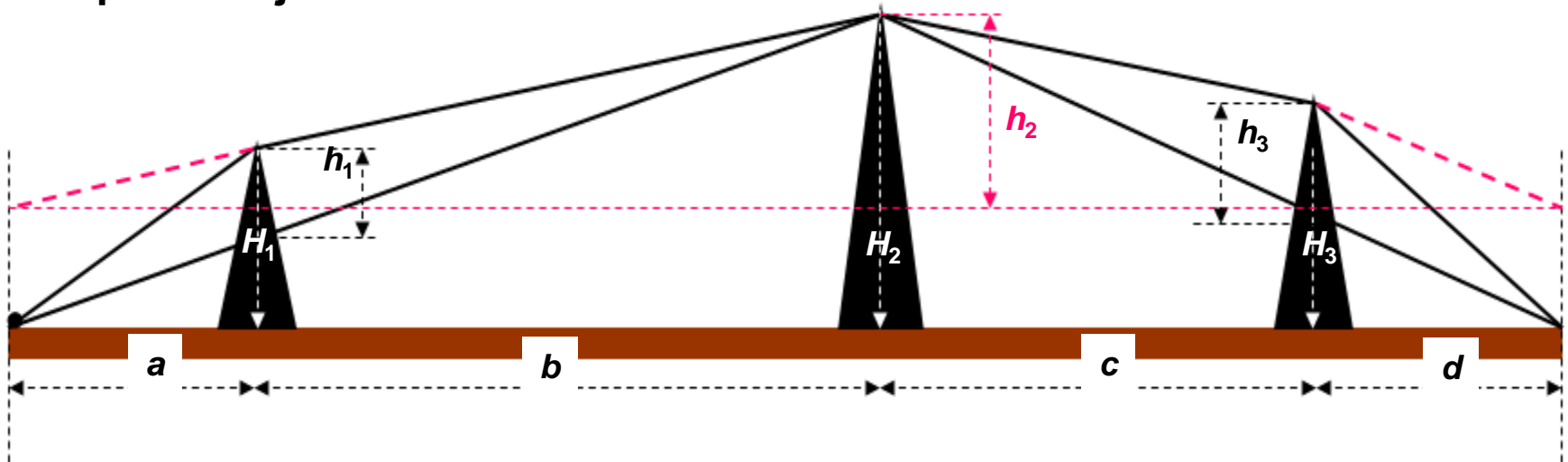
$$\left. \begin{aligned} L_1 &= L(h'_1, a, b+c) \\ L_2 &= L(h_2, b, c) \end{aligned} \right\} \text{Giovaneli}$$

Analitična metoda za dve oviri na osnovi Fresnel-Kirchhoffa:

Millingtonova rešitev izražena s površinskim (dvojnim) Fresnelovim integralom

Uklon na treh absorpcijskih klinastih ovirah (Deygout, Giovaneli)

Primer prevladujoče ovire



$$L = L_1 + L_2 + L_3$$

$$L_1 = L(h_1, a, b)$$

$$L_2 = L(H_2, a + b, c + d)$$

$$L_3 = L(h_3, c, d)$$

} Deygout
precenitev
slabljenja

$$L = L_1 + L_2 + L_3$$

$$L_1 = L(h_1, a, b)$$

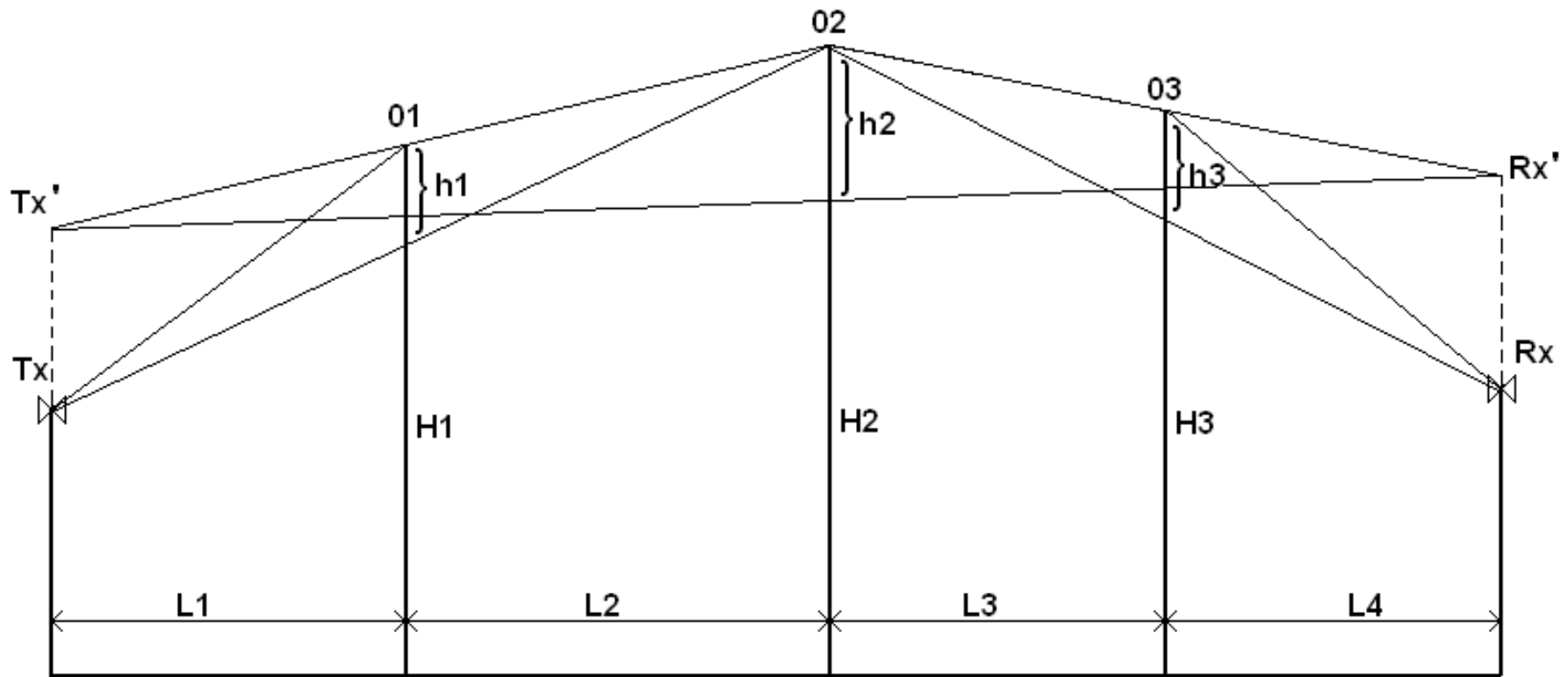
$$L_2 = L(h_2, a + b, c + d)$$

$$L_3 = L(h_3, c, d)$$

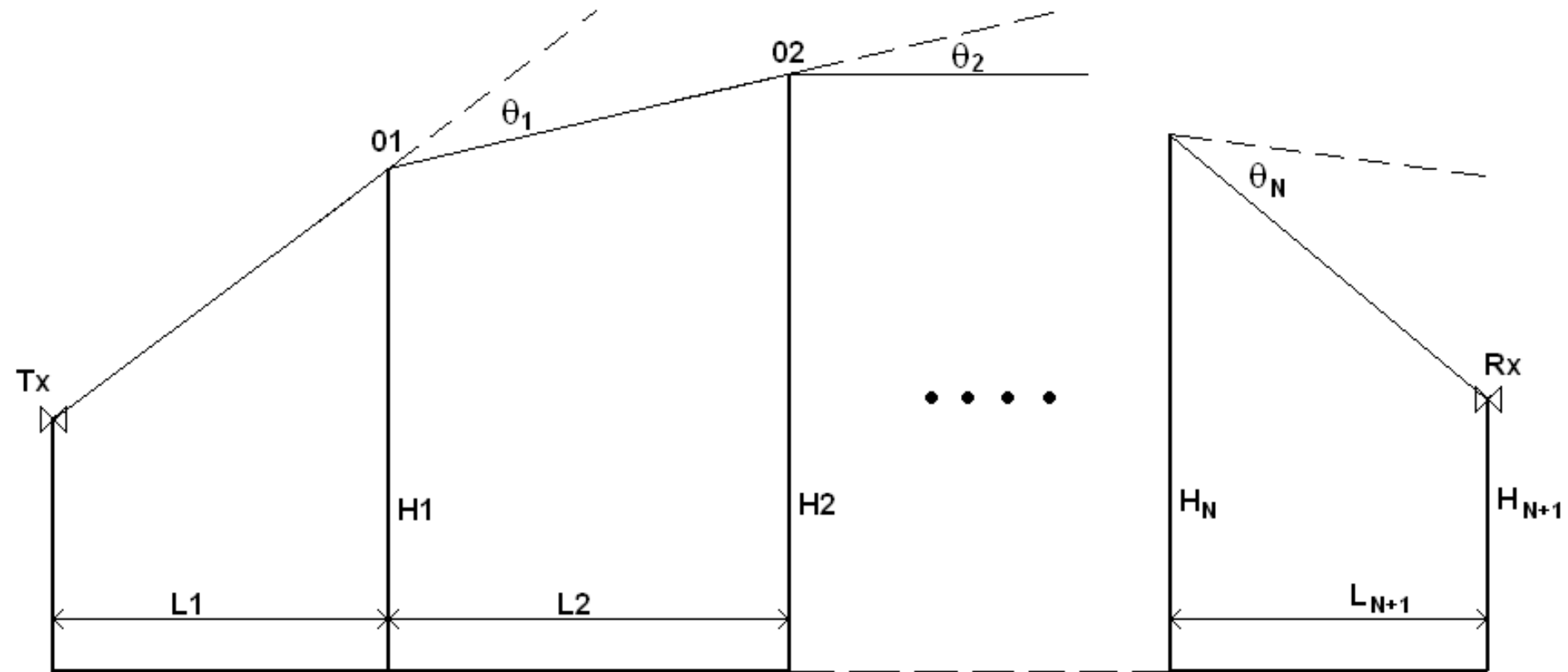
} Giovaneli

Splošna metoda za n ovir na osnovi Fresnel-Kirchoffa je Voglerjeva metoda.

Giovanellijska metoda za 3 ovire

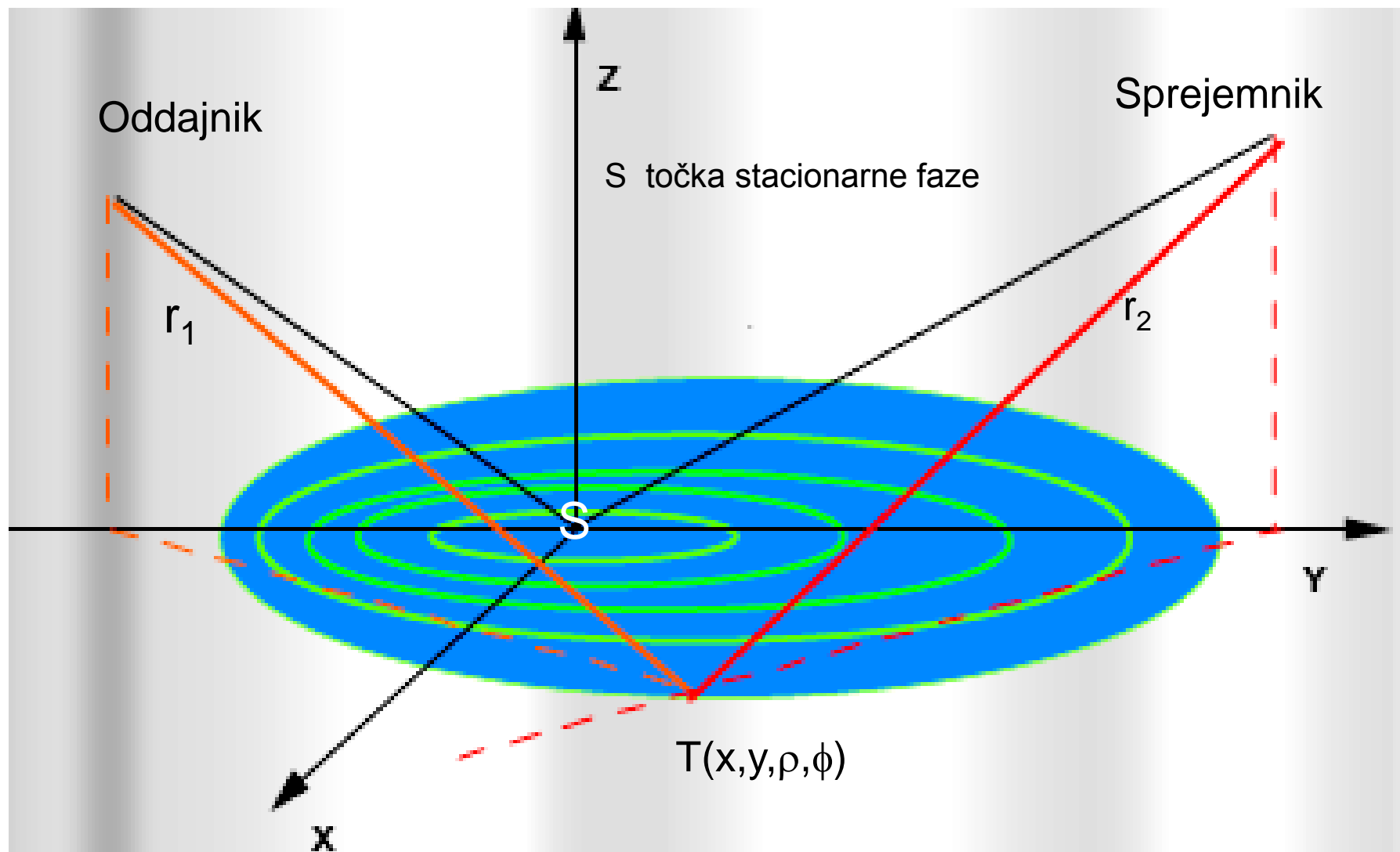


Voglerjeva metoda za n ovir



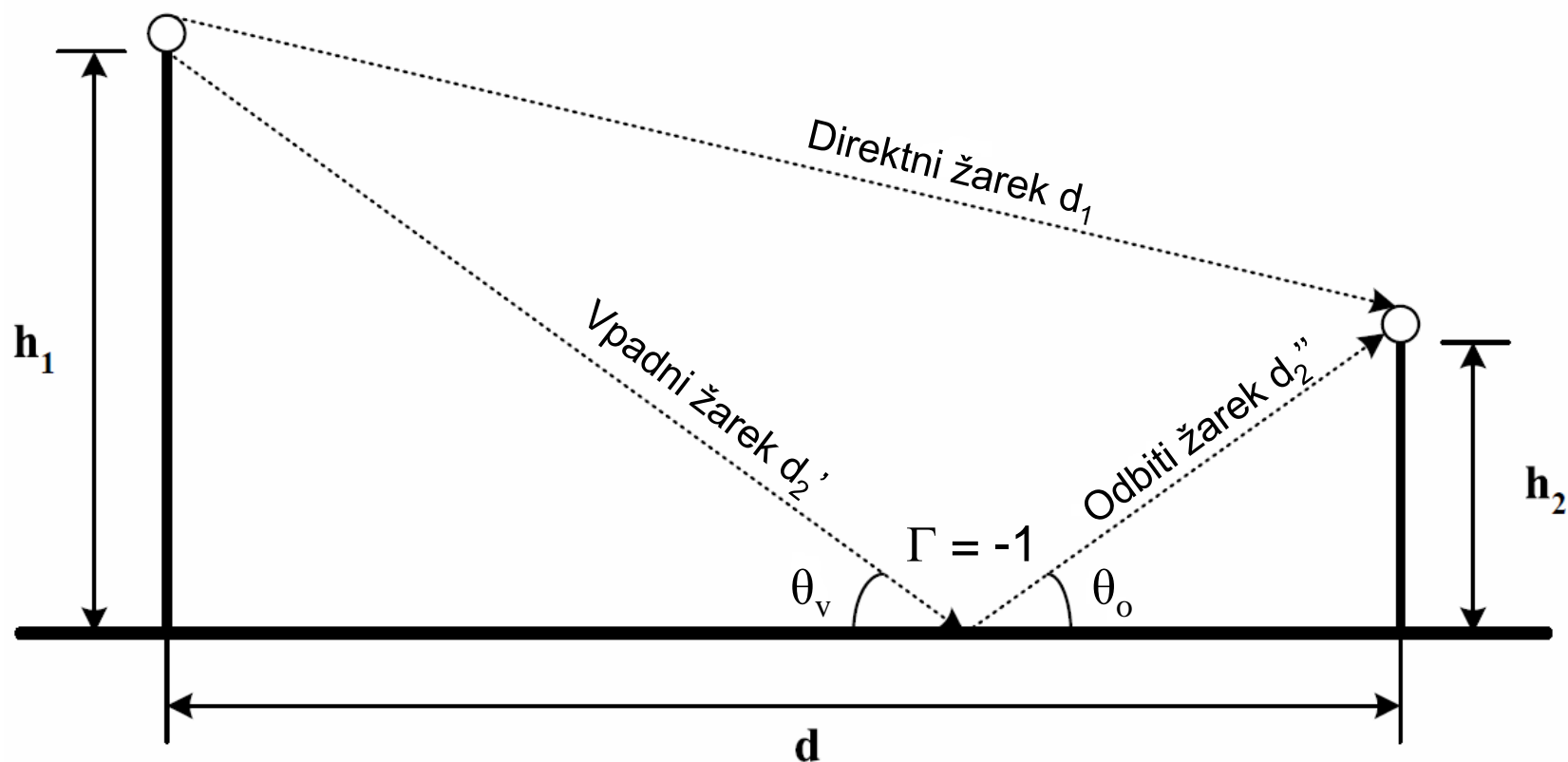
Fresnelove odbojne elipse

Ravnino tal med oddajno in sprejemno točko razdelimo na eliptične kolobarje po faznem kriteriju okoli točke stacionarne faze (točka žarkovnega odboja). K nastanku odboja prispevajo predvsem ploskve okoli točke stacionarne faze S znotraj 1. Fresnelove odbojne elipse.



Odboj od tal

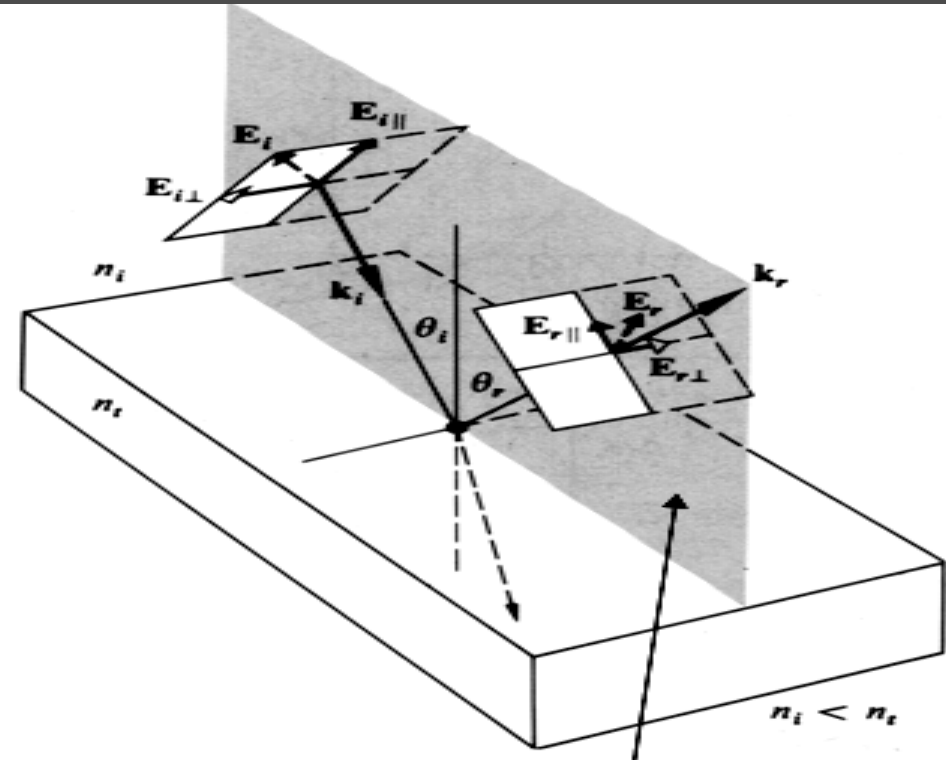
Predpostavimo običajne višine in dovolj velike razdalje (pogost primer v praksi)



Tako odbojni kot lomni zakon izhajata iz elektromagnetnih pogojev za enakost tangencialnih komponent na meji dveh snovi. Po Snellovem odbojnem zakonu sta vpadni in odbojni kot enaka. Pri zelo položnem kotu velja približno $\Gamma = -1$. Odboj od tal je totalen in protifazen. Tla morajo biti dovolj izravnana in gladka.

Fresnelova odbojnost tal

- Poševni vpad ravninskega vala na mejo dveh dielektrikov z izgubami pri dveh ortogonalnih polarizacijah (TE in TM)

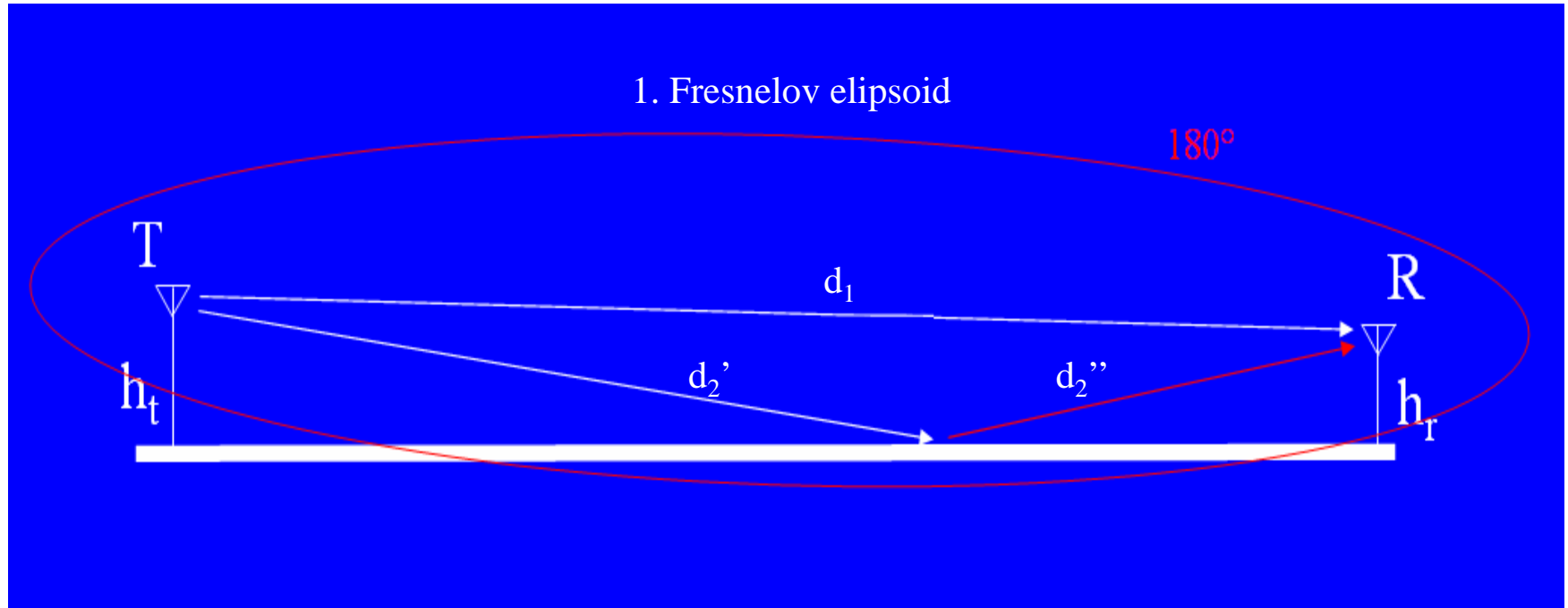


Fresnelovi koeficienti:

$$\Gamma^{\text{TE}} = \Gamma^{\perp} = \frac{\cos \theta - \sqrt{(\varepsilon_r - j\sigma/\omega\varepsilon_0) - \sin^2 \theta}}{\cos \theta + \sqrt{(\varepsilon_r - j\sigma/\omega\varepsilon_0) - \sin^2 \theta}}$$

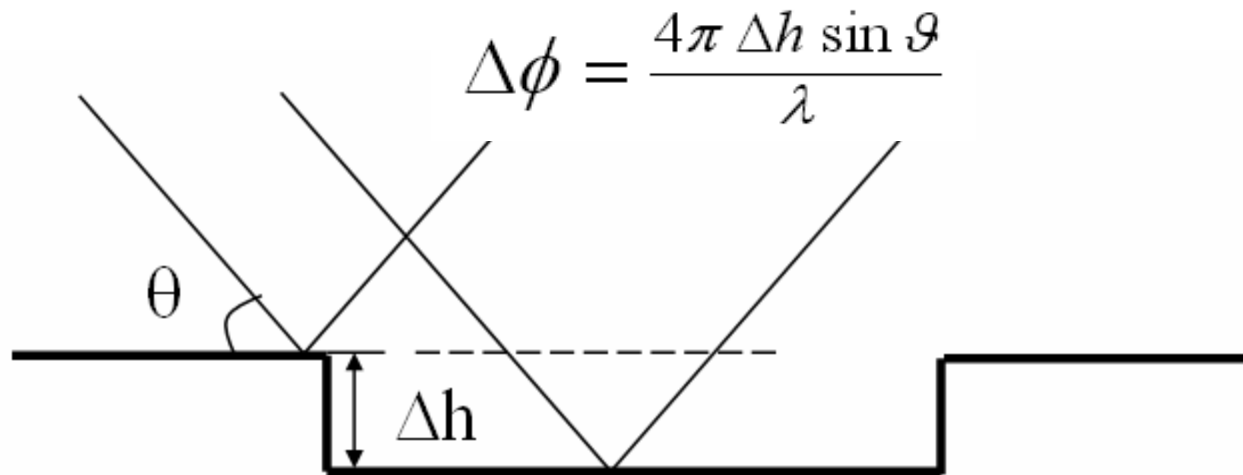
$$\Gamma^{\text{TM}} = \Gamma^{\parallel} = \frac{(\varepsilon_r - j\sigma/\omega\varepsilon_0)\cos \theta - \sqrt{(\varepsilon_r - j\sigma/\omega\varepsilon_0) - \sin^2 \theta}}{(\varepsilon_r - j\sigma/\omega\varepsilon_0)\cos \theta + \sqrt{(\varepsilon_r - j\sigma/\omega\varepsilon_0) - \sin^2 \theta}}$$

Učinek tal na širjenje skozi 1. Fresnelov elipsoid



Pri odboju od ravnih tal (po Rayleighovem kriteriju) se val odbija totalno in protifazno ($\Gamma = -1$). Ko elipsoid tangira tla, je razlika dolžine direktnega in odbitega žarka enaka $\lambda/2$ in fazna razlika 180° (po definiciji 1. Fresnelovega elipsoida), zato se valova seštevata sofazno (podvojita).

Odbojnost neravnih tal

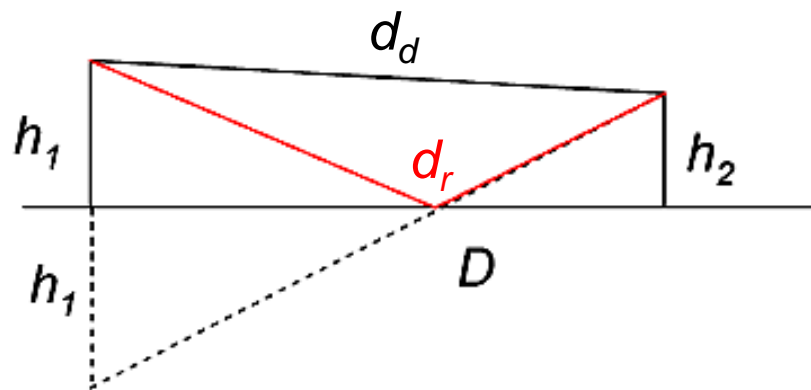


Kriterij za antene:
$$\Delta h < \frac{\lambda}{32 \sin \theta}$$

Kriterij za razširjanje:
$$\Delta h < \frac{\lambda}{8 \sin \theta}$$

Odbojnost tal:
$$\Gamma = \exp\left[-\frac{1}{2}\left(\frac{4\pi\sigma_s \sin \theta}{\lambda}\right)\right]$$

Geometrijski približki pri odboju



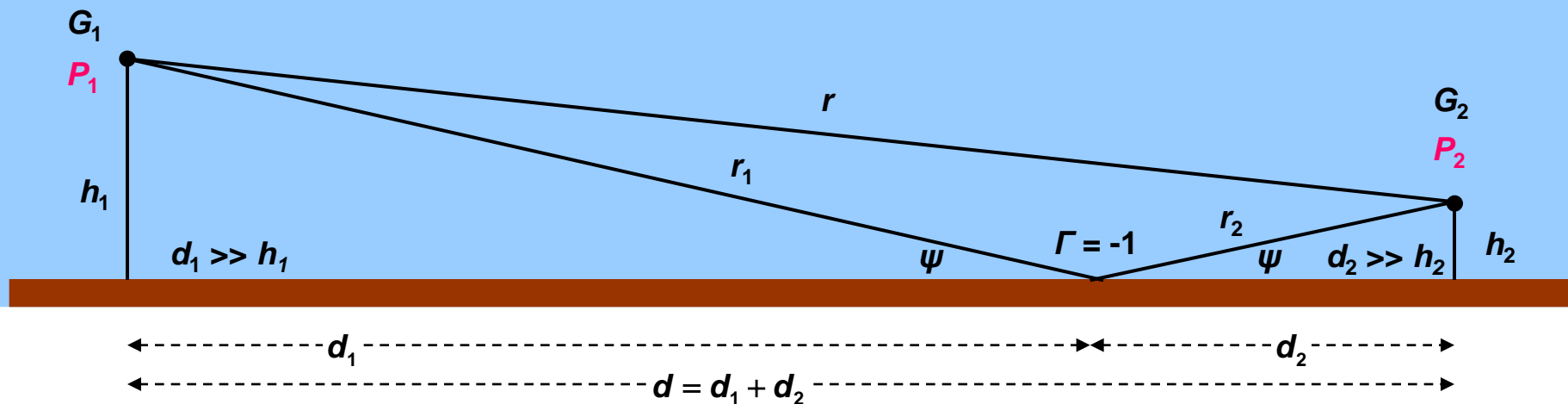
Direktni žarek: $d_d = \sqrt{D^2 + (h_1 - h_2)^2} = D \sqrt{1 + \left(\frac{h_1 - h_2}{D}\right)^2} \approx D \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{h_1 - h_2}{D}\right)^2 \right]$

Odbiti žarek: $d_r = \sqrt{D^2 + (h_1 + h_2)^2} = D \sqrt{1 + \left(\frac{h_1 + h_2}{D}\right)^2} \approx D \left[1 + \frac{1}{2} \left(\frac{h_1 + h_2}{D}\right)^2 \right]$

$$\sqrt{1+x} = 1 + \frac{1}{2}x - \frac{1}{2} \frac{1}{4}x^2 + \frac{1}{2} \frac{1}{4} \frac{3}{6}x^3 - \dots$$

$$\Delta = d_r - d_d \approx \frac{(h_1 + h_2)^2}{2D} - \frac{(h_1 - h_2)^2}{2D} = \frac{2h_1h_2}{D}, \text{ if } \frac{h_1 + h_2}{D} \ll 1$$

Interferenčno slabljenje pri odboju na ravnem terenu



$$\Delta h < \frac{\lambda}{8 \sin \psi} \quad \text{navidezno raven teren} \\ \text{(Rayleighov kriterij)}$$

$$\Delta h > \frac{\lambda}{8 \sin \psi} \quad \text{neraven teren}$$

Sprejemana moč:

$$P_2 = P_1 \frac{G_1 G_2 \lambda^2}{(4\pi d)^2} 4 \sin^2 \left(\frac{2\pi}{\lambda} \frac{h_1 h_2}{d} \right) \doteq P_1 G_1 G_2 \left(\frac{h_1 h_2}{d^2} \right)^2$$

$$\sigma_h^2 = \overline{(h - \bar{h})^2}$$

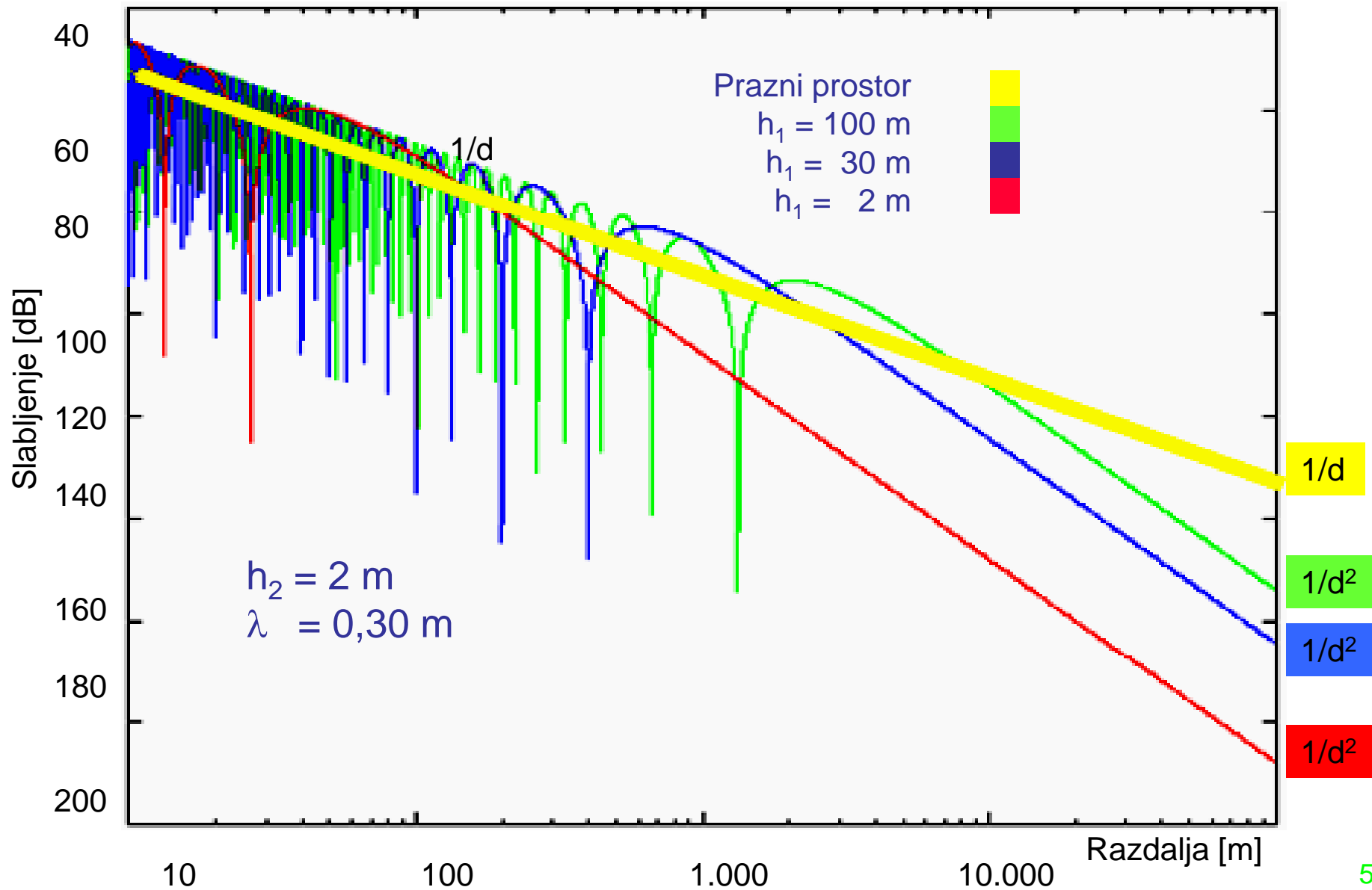
Interferenčno slabljenje je dodatno slabljenje glede na širjenje v praznem prostoru:

$$L_{dB} = -6 - 20 \log \left(\sin \left(\frac{2\pi}{\lambda} \frac{h_1 h_2}{d} \right) \right) \doteq -6 - 20 \log \left(\frac{2\pi}{\lambda} \frac{h_1 h_2}{d} \right)$$

Interferenčno slabljenje pri $r_1 + r_2 - r < \lambda/4$ lahko zelo zmanjšuje sprejem (naraščanje slabljenja s četrto potenco razdalje).

Interferenca pri odboju na ravnih tleh

Slabljenje med izotropnima viroma ($G_1=1$, $G_2=1$) nad ravnimi tlemi



Osnovno interferenčno slabljenje

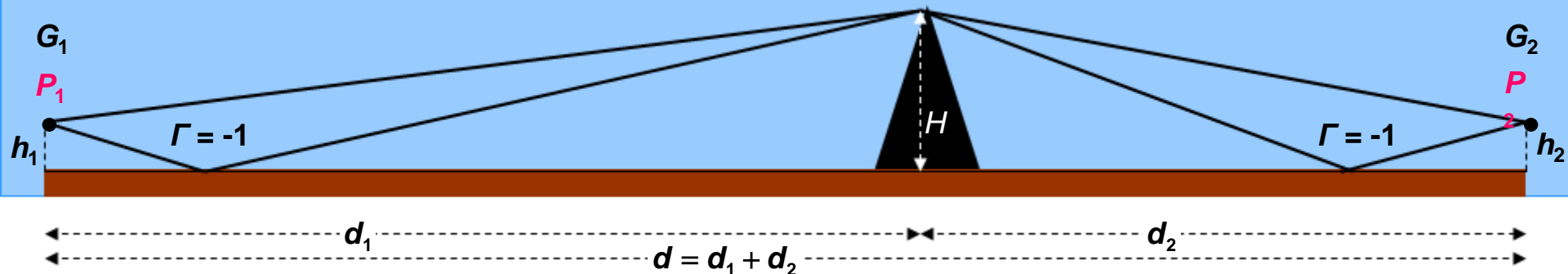
Slabljenje med izotropnima antenama nizko nad ravnimi tlemi (primer avtoceste):

$$L_{\text{dB}} = 10 \log (P_1/P_2) = \\ = 120 + 40 \log r_{\text{km}} - 20 \log h_{1\text{m}} - 20 \log h_{2\text{m}}$$

Na dolžini 1 km, višinah 20 m in 2 m (primer bazna postaja – avtomobil) znaša osnovno slabljenje 88 dB. Na razdalji 1 km in višinah 1 m (primer zveze med avtomobiloma) je slabljenje 120 dB.

Slabljenje ni odvisno od frekvence. Podvojitvev razdalje r na $2r$ prinese 12 dB slabljenja. Na ravni avtocesti je Rayleigh-jev kriterij izpolnjen.

Interferenčno in uklonsko slabljenje na ravnem terenu s klinasto oviro



Predpostavka: visoka ovira, majhna višina anten ($h_1, h_2 \ll H$), velika razdalja $d \gg H, h_1, h_2$

$$L = L_{01} + L_u + L_{02} \quad \text{Skupno slabljenje}$$

$$L_u \doteq 16 + 20 \log \frac{H}{\rho} \quad \text{Uklonsko slabljenje na oviri (v približku enako za vse žarke),} \quad \rho = \sqrt{\lambda \frac{d_1 d_2}{d}}$$

$$L_{01} \doteq -6 - 20 \log \left(\frac{2\pi h_1 H}{\lambda d_1} \right) \quad \text{Interferenčno slabljenje na poti } d_1.$$

$$L_{02} \doteq -6 - 20 \log \left(\frac{2\pi h_2 H}{\lambda d_2} \right) \quad \text{Interferenčno slabljenje na poti } d_2.$$

Upadanje s četrto ($n = 4$) potenco razdalje na prvem in drugem odseku.

$$P_2 = P_1 \frac{G_1 G_2 \lambda^2}{(\pi d)^2} \sin^2 \left(\frac{4\pi h_1 H}{\lambda d} \right) \frac{\lambda d}{(4\pi H)^2} \sin^2 \left(\frac{4\pi h_2 H}{\lambda d} \right) \quad \text{pri } d_1 = d_2 = \frac{d}{2}$$

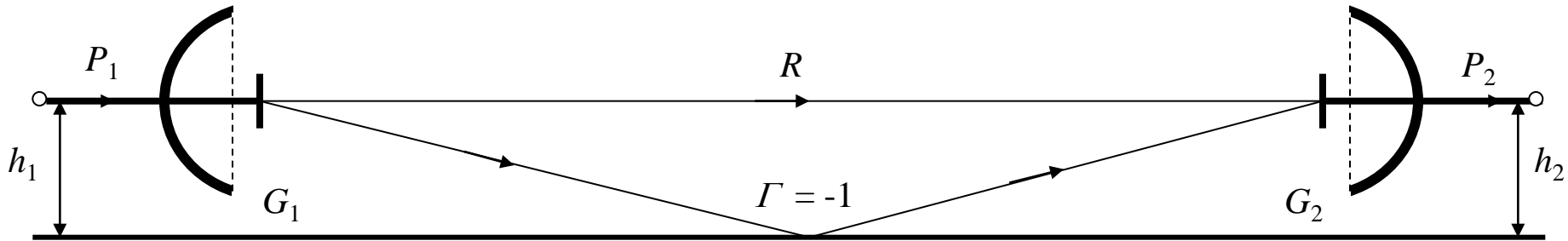
Interferenčno in uklonsko slabljenje

$$P_2 \doteq P_1 G_1 G_2 16 \frac{(h_1 h_2)^2 H^2}{\lambda d^5}$$

Upadanje s peto ($n = 5$) potenco razdalje. Visoka ovira lahko dejansko zmanjša slabljenje (**dobitek ovire!**)

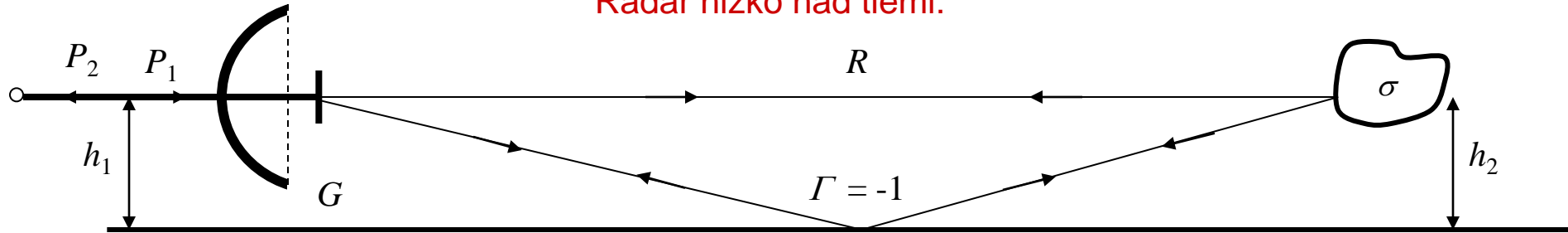
Radio in radar nad ravnimi odbojnimi tlemi

Radijska zveza nizko nad tlemi:



$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{G_1 G_2 \lambda^2}{(4\pi R)^2} \left(2 \sin \frac{2\pi h_1 h_2}{\lambda R} \right)^2 = \frac{G_1 G_2 h_1^2 h_2^2}{R^4}$$

Radar nizko nad tlemi:



$$\frac{P_2}{P_1} = \frac{G \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \left(2 \sin \frac{2\pi h_1 h_2}{\lambda R} \right)^4 = \frac{4\pi G^2 \sigma h_1^4 h_2^4}{\lambda^2 R^8}$$

Zelo izrazito upadanje sprejete moči z osmo potenco razdalje. Potrebna je zelo visoka moč in zelo občutljiv sprejem. Objekti nizko nad tlemi (nizko leteča letala) so za radar skoraj nevidni.

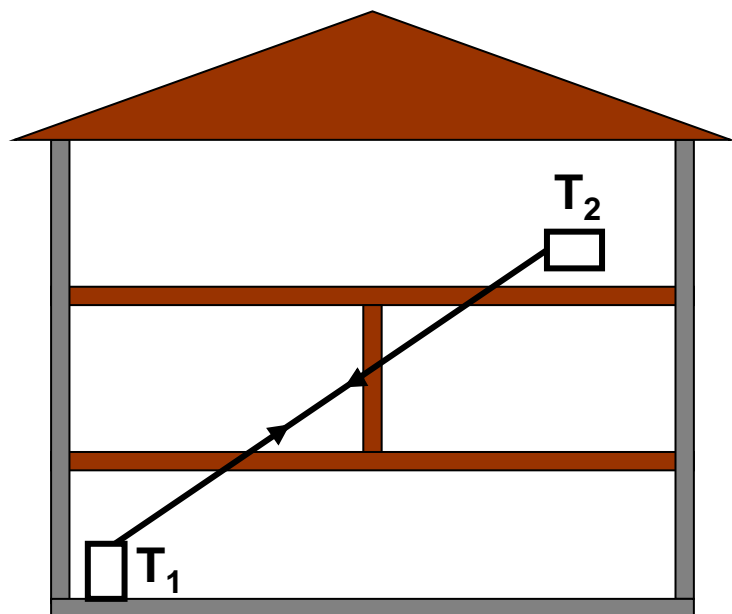
Radijske zveze v omrežjih MAN in LAN



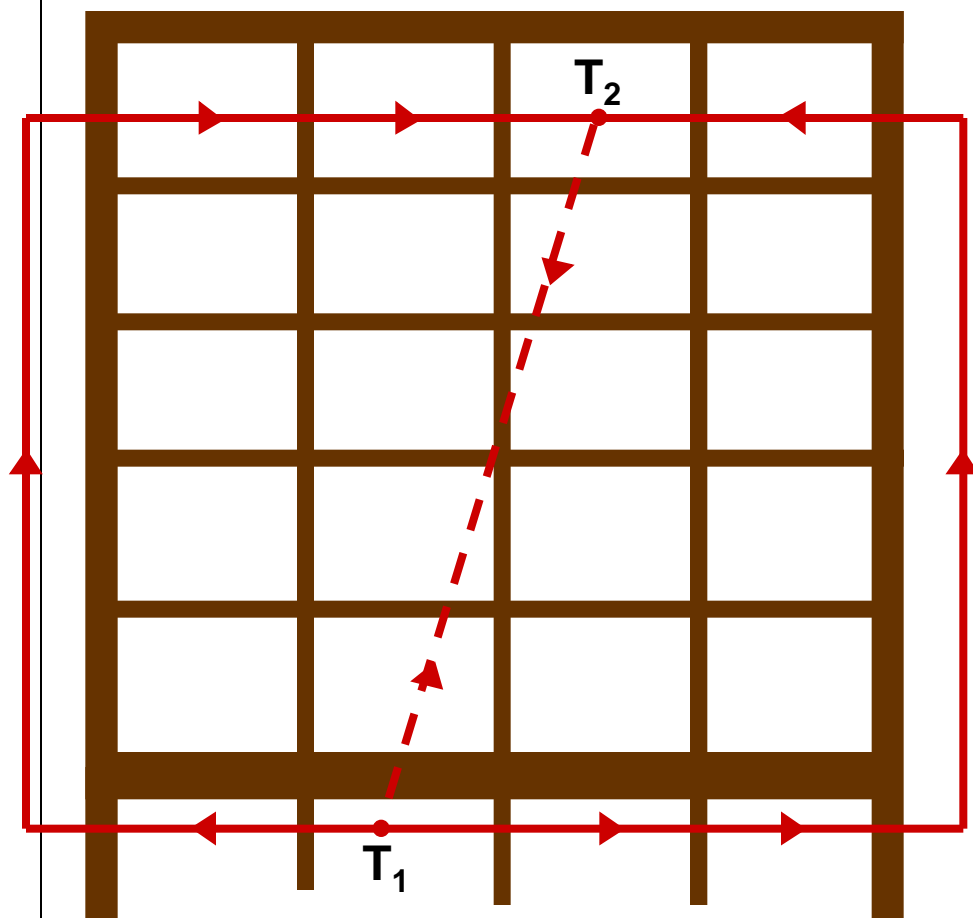
Kakšni so modeli za napoved jakosti polja v urbanem, polurbanem in ruralnem okolju?

Radijske zveze v okoljih PAN

Propagacija v notranjih prostorih



Propagacija v notranjih prostorih med več nadstropji z upoštevanjem uklona



Kakšni so modeli za napoved jakosti polja v notranjih prostorih (PAN)?

Kaj sledi?

Na obe vprašanji bomo poskušali odgovoriti v naslednjem predavanju s pregledom izkustvenih in polizkustvenih modelov, ki so danes večinsko v rabi.