

PROJEKTIRANJE MIKROVALNIH VEZA PROGRAMOM *PATHLOSS*

Temeljna svrha projektiranja mikrovalnih veza je dimenzioniranje radio-komunikacijskih parametara i elemenata opreme uporabom kojih se na zadanoj radio-trasi (ili trasama) garantira tražena raspoloživost veze. Naravno, postupci projektiranja omogućuju i obrnuto: određivanje raspoloživosti mikrovalne veze postizljive na zadanoj trasi uporabom definirane opreme i ostalih parametara.

Proces projektiranja u osnovi obuhvaća:

- određivanje i crtanje profila terena između antena radio-postaja,
- provjeru kriterija čistoće radio-trase uključujući i određivanje broja i značajki možebitnih prepreka koje bi mogle ometati propagaciju,
- određivanje prigušenja signala, uključujući i gubitke nastale na pojedinim komponentama opreme,
- određivanje dopunskih gubitaka uslijed apsorpcije u atmosferi, hidrometeora i drugog,
- određivanje degradacije raspoloživosti uslijed difrakcije i refleksije, višestruke propagacije i interferencije,
- odabir (dimenzioniranje) opreme i parametara, primjerice izlazne snage odašiljača i dobiti antena, primjene prostornog ili frekvencijskog diversity-a, te
- provjeru postizljivosti zadane raspoloživosti.

Intuitivno je jasno da nedovoljna raspoloživost nije prihvatljiva, kao ni previsoka raspoloživost. Naime, ovo drugo obično indicira nepotrební utrošak resursa, primjerice radiofrekvencijskog spektra i/ili financija.

U slučaju bitnog odstupanja, projektant mora mijenjati neke parametre kako bi postigao zadanu raspoloživost. Jasno je da se svi parametri veze gotovo nikada ne mogu slobodno mijenjati. Primjerice, često su zadani frekvencijski pojas, visine i maksimalne dimenzije antena ili drugo.

Postupak projektiranja olakšavaju brojna pomagala i preporuke i, posebice, računalni programi. Jedan od poznatijih programa je *Pathloss 4.0*¹, Slijedi opis u njemu primijenjenih kriterija i algoritma.

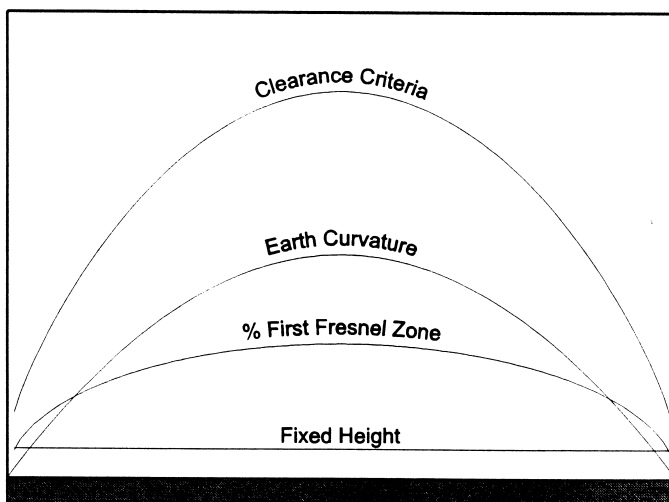
TM Komteh d.o.o. Zagreb, Trg sportova 11, lipanj 2002.
prijevod i adaptacija teksta Darko Skočir, dipl.ing.
uredio Dušan Trbojević, dipl.ing.
e-mail: radio@komteh.hr

¹ Pathloss 4.0, © 2002, Contract Telecommunication Engineering

1. KRITERIJ ČISTOĆE RADIO-TRASE

Montažom antena na odgovarajuću visinu antena ostvaruje se kriterij čistoće radio-trase. Kriterij čistoće ovisan je o slijedećem:

- zakrivljenosti Zemlje za specificirane vrijednosti faktora radijusa Zemlje, K
- postotnom dijelu prve Fresnel-ove zone
- odabranoj fiksnoj visini



Na slici 1 prikazane su navedene tri komponente na modelu "ravne Zemlje".

Slika 1 – Kriterij čistoće radio-trase

Krivulja označena sa *Kriterij čistoće* suma je triju navedenih komponenti.

Po potrebi, a cilju korektnog prikaza kriterija čistoće, u podatke profila dodaju se dodatne točke. One se određuju linearnom interpolacijom tako da je udaljenost dviju točaka profila uvijek 1% duljine trase ili manja.

Kriterij čistoće L izračunava se za svaku točku profila i dodaje visini te točke prema:

$$\begin{aligned}
 L &= L_K + L_F + L_{FH} \\
 L_K &= \frac{d_1 \cdot (d - d_1)}{12.75 \cdot K} \\
 L_{Fz} &= 17.3 \cdot Fz \sqrt{\frac{d \cdot (d - d_1)}{f_{GHz} \cdot d}}
 \end{aligned} \tag{1.1}$$

gdje je

d	duljina trase u kilometrima
d_1	udaljenost točke profila od postaje 1
K	faktor radijusa Zemlje ²
Fz	dio prve Fresnel-ove zone
L_{FH}	fiksna visina u metrima

Dakle, kriterij čistoće radio-trase zadovoljava ona visina antena za koju njihova spojnica dira ili prolazi iznad krivulje kriterija čistoće.

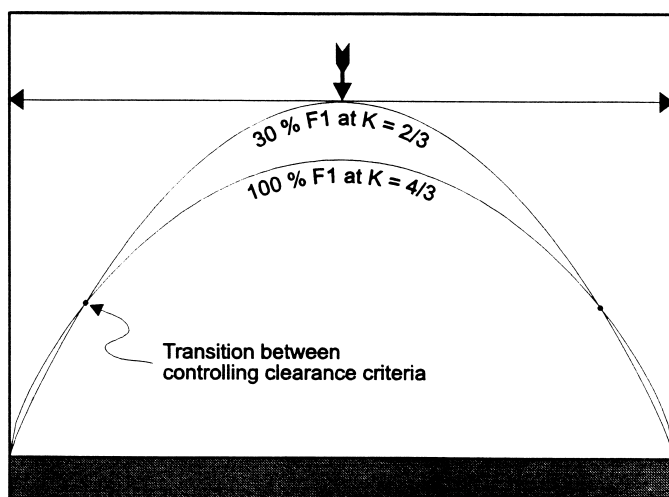
Tradicionalno, ukupni kriterij čistoće specificira se za dva neovisna skupa parametara:

skup #1	100% prve Fresnel-ove zone kod $K = 4/3$	i
skup #2	30% prve Fresnel-ove zone kod $K = 2/3$	

Za svaku točku profila prema (1.1) izračunava se kriterij čistoće i , potom, krivulja kriterija čistoće konstruira se uzimajući veću vrijednost.

² Radi uvažavanja refrakcije, za radijske frekvencije uzima se radijus Zemlje množen faktorom K . Kod normalne refrakcije faktor je $K = 4/3$.

Na slici 2 prikazan je kriterij čistoće uz navedene skupove parametara.



Slika 2 – Dualni kriterij čistoće radio-trase

Očito, kriterij čistoće na krajnjim dijelovima trase određuje skup #1, dok na srednjem dijelu prevladava kriterij određen parametrima skupa #2.

1.1 Određivanje visine antena

Općenito, kriterij čistoće bira se zbog ispunjenja dvaju ciljeva:

- Ostvarenje propagacije u slobodnom prostoru za medijanski K ($K = 4/3$).
- Kontrola dodatnih gubitaka koji se mogu pojaviti za najmanji očekivani K .

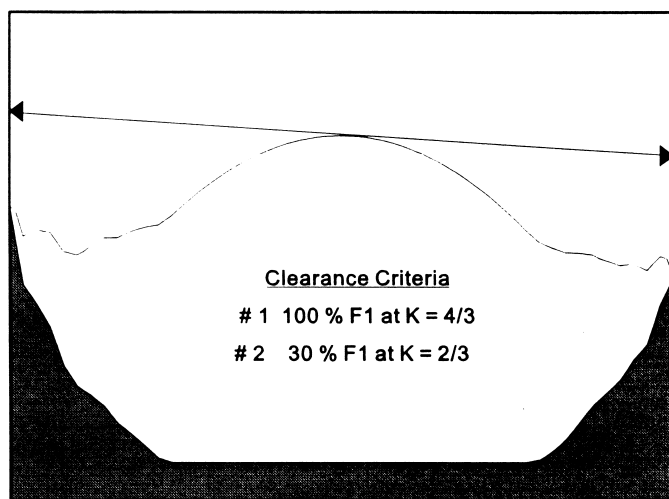
Ispunjenje prvog cilja relativno je jednostavno – 60% radijusa prve Fresnel-ove zone je minimalni kriterij čistoće kojime se osiguravaju uvjeti propagacije u slobodnom prostoru.

Realizacija drugoga nije jednostavna i može rezultirati prekomjernim visinama antenskih stupova i dubokim fading-om zbog višestruke propagacije i/ili refleksije.

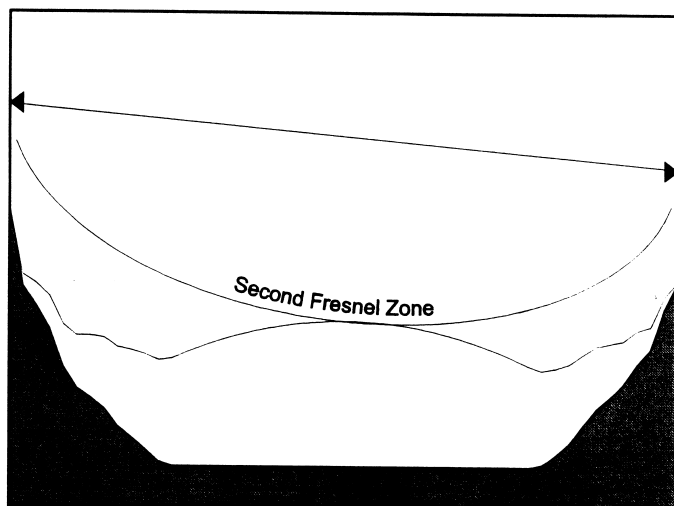
Primjerice, za trasu duljine 60 km i frekvenciju 1925 MHz uobičajeni parametri:

100% F1 kod $K = 4/3$ i 30% F1 kod $K = 2/3$

daju kriterij čistoće prikazan slikom 3.



Slika 3 – Kriterij čistoće i spojnice antena



Očito, uz specificirane kriterije čistoće, radio-trasa sigurno neće trpjeti ozbiljne difrakcijske gubitke, ali postoji li mogućnost refleksije, može se očekivati značajni fading tijekom normalnih uvjeta propagacije. Navedeno ilustrira slika 4.

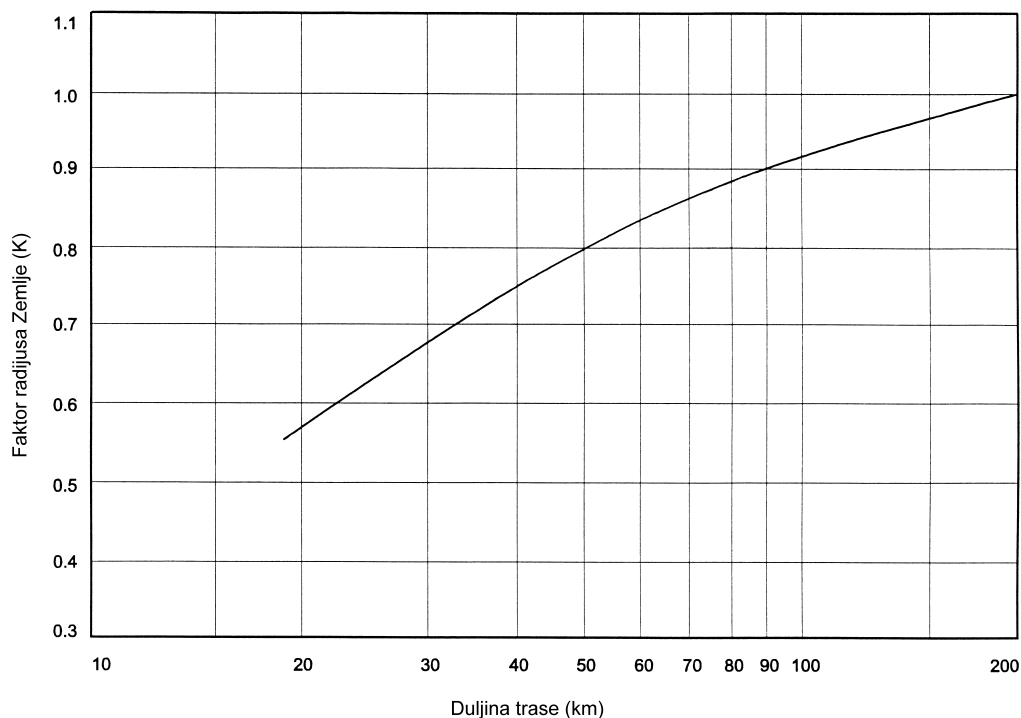
Slika 4 – Čistoća druge Fresnel-ove zone

Vidi se čista druga Fresnel-ova u srednjem području radio-trase. Ako u tom području postoje uvjeti za refleksiju, direktni i reflektirani val mogu se međusobno poništavati, barem tijekom prosječnih uvjeta propagacije.

Specificiranje čvrstog skupa kriterija čistoće za sve uvjete i sve trase nije moguće. Bolje bi bilo: "odabir minimalnih visina antena za postizanje zahtjevane pouzdanosti veze" (što je zasigurno istinito glede troškova antenskih stupova).

Zbog postizanja minimalnih visina antena dodatno treba uvažiti i sljedeće:

- Fading uslijed višestruke propagacije najdublji je tijekom velikih ili negativnih (prividno konkavna Zemlja) vrijednosti K , a zanemariv za vrijeme malih K .
- Općenito, fading višestruke propagacije raste s visinom antena i kriterijem čistoće – dakle trasa minimalne potrebne čistoće manje je podložna tom fading-u.
- Vjerojatnost pada faktora K ispod neke specificirane vrijednosti, funkcija je duljine trase. ITU Recommendation P530-7³ daje ovisnost K o duljini trase za najgori mjesec u godini (slika 5).



Slika 5 – Vrijednost K premašena 99.9% najlošijeg mjeseca

³ ITU Rec. P530-7, Propagation Data and Prediction Methods for Terrestrial Line of Sight Systems

Uvažavanjem navedenoga, minimalna visina antena uvjetovana je difrakcijskim prigušenjem koje se javlja uz najniži očekivani K i omjerom tog prigušenja sa marginom termičkog fading-a trase. U osnovi, program izvodi proceduru u slijedećim koracima:

1. Određivanje visine antena uz minimalni kriterij čistoće 60% F1 uz $K = 4/3$.
2. Izračun margine termičkog fading-a trase.
3. Određivanje vrijednosti K koja će biti premašena 99.9% vremena.
4. Uračunavajući vrijednost K određenu u koraku 3, određuje se visina antena koja uzrokuju difrakcijska prigušenja kako slijedi:
 - 50% margine termičkog fading-a za trase karakterizirane izoliranom preprekom
 - 25% margine termičkog fading-a za trase karakterizirane neravnim terenom ili višestrukim preprekama.

Veća visina antena između visina određenih koracima 1 i 4 uzima se kao konačna.

2. **POUZDANOST VEZE UZ ATMOSFERSKU VIŠESTRUKU PROPAGACIJU**

Uzroci fadinga mikrovalne veze mogu biti:

- višestruka propagacija u atmosferi,
- difrakcijsko prigušenje pri malim vrijednostima K ,
- prigušenje uzrokovano kišom,
- zrcalna refleksija,
- anomalijaska propagacija kroz atmosferske slojeve i/ili kanale.

Svaki od navedenih uzroka fadinga neovisno doprinosi ukupnoj nepouzdanosti veze pa se može posebno analizirati. Naravno, od interesa je poznavati ukupno vrijeme tijekom kojeg je razina prijemnog signala manja od praga osjetljivosti prijemnika.

Općenito se može pretpostaviti međusobno isključivanje nabrojenih uzroka fading-a. To znači da je ukupno vrijeme tijekom kojeg je prijamni signal ispod praga prijama jednostavna suma trajanja ispada za svaki od pojedinih uzroka fading-a. Primjerice, fading višestruke propagacije sigurno se ne javlja tijekom jake kiše.

Višestruka propagacija u atmosferi uzrokovana je gradijentom atmosferske refrakcije i difuznom refleksijom od tla. Zbog toga EM val put od odašiljačke do prijamne antene prevaljuje putem više zraka nejednakih duljina. Posljedica je promjena prijamne razine zbog vektorskog zbrajanja njihovih amplituda.

Vjerojatnost fading-a atmosferske višestruke propagacije reprezentira postotak vremena tijekom najgoreg mjeseca u godini u kojem dubina fading-a premašuje fading marginu, ali ne uključuje vremenski period ponovne uspostavu sinkronizacije (nužan za digitalne sustave). Za ovaj tip fadinga distribucija vjerojatnost premašivanja fading margine odgovara Raleigh-ovoj distribuciji.

Vjerojatnost fading-a atmosferske višestruke propagacije ovisi o frekvenciji, duljini radio-trase i fading margini, odnosno općenito:

$$P \propto f^b \cdot d^c \cdot 10^{-\frac{A}{10}} \quad (2.1)$$

gdje su

d	duljina trase
f	frekvencija
A	fading margina
b	empirijska konstanta
c	empirijska konstanta

Izraz (2.1) vrijedi za fading margine veće od 15 dB i primjenjiv je samo na sustave bez diversity-a.

U programu *Pathloss* raspoložive su sljedeće metode izračuna vjerojatnosti fading-a višestruke propagacije:

- Vigants – Barnett
- Preporuka ITU-R P.530-6
- Preporuka ITU-R P.530-7
- K*Q faktor
- K*Q faktor uključujući neravnost terena

Izračuni prema ITU-R P.530-6 i ITU-R P.530-7 bit će opisani kao relevantni.

Fading višestruke atmosferske propagacije javlja se samo tijekom toplog vremena. Njegovo sezonsko trajanje proporcionalno je srednjoj godišnjoj temperaturi⁴, odnosno trajanje fadinga T_0 jednako je:

$$T_0 = 0.25 \cdot \left(\frac{t}{50} \right) \quad (2.2)$$

gdje je t srednja godišnja temperatura u °F u rasponu

$$35 \text{ °F} \leq t \leq 75 \text{ °F}$$

valjanost (2.2) ograničena je u granicama

$$0.175 \leq T_0 \leq 0.375$$

2.1 Fading margina

Intuitivno je jasno da raspoloživost mikrovalne veze ovisi o fading margini. Fading marginu čine jednolika i disperzivna komponenta. Jednolika komponenta mora pokriti umanjenja razine ukupne snage signala unutar propusnog pojasa kanala, dok disperzivna komponenta pokriva promjene amplitudno – frekvencijskog odziva kanala. Ova druga ima važnost za digitalne radio-sustave – analogni (FM-FDM) sustavi nisu osjetljivi na promjene frekvencijskog odziva kanala. Dalje, jednolika margina sastavljena je od dvije komponente, margine termičkog i interferencijskog fading-a.

2.1.1 Termička fading margina

Termička fading margina je razlika između razine prijemnog signala koji bi postojao u uvjetima propagacije u slobodnom prostoru i praga prijama. Ta margina jednaka je dodatnoj atenuaciji (uz propagaciju u slobodnom prostoru) koja dovodi do ispada prijama zbog termičkog šuma prijamnika – ne računajući ikakvi smetajući signal. Jasno, veću termičku fading marginu imat će sustav sa prijamnikom boljeg šumnog broja i/ili u kojemu korespondentni odašiljač zrači veću snagu.

2.1.2 Interferencijska fading margina

Smetajući signal, ako postoji, degradira prag prijama što se pokriva interferencijskom fading marginom. Definira se kao dodatna atenuacija koja, uz atenuaciju propagacije u slobodnom prostoru, dovodi do ispada prijama uslijed interferencijskog signala – neovisno o termičkom šumu. Jasno, veću interferencijsku fading marginu imat će sustav u kojem na mjestu prijama postoji mala ili nikakva interferencija i/ili u kojemu korespondentni odašiljač zrači veću snagu.

2.1.3 Jednolika fading margina

Kao što je rečeno, jednolika fading margina sastoji se od termičke i interferencijske komponente kombinirane kako slijedi:

$$A_F = -10 \cdot \log \left(10^{\frac{A_t}{10}} + 10^{\frac{A_i}{10}} \right) \quad (2.3)$$

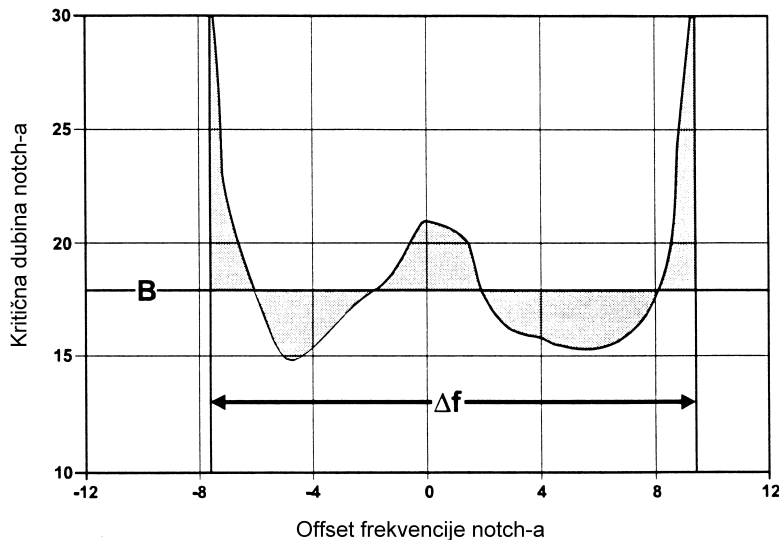
gdje su

- A_t termička fading margina u dB
- A_i interferencijska fading margina u dB

⁴ Space Diversity Engineering – A. Vigants, Bell System Technical Journal – January 1975

2.1.4 Disperzivna fading margina

Disperzivna fading margina mora biti jednaka srednjoj dubini fadanga višestruke propagacije koji uzrokuje ispad prijama, neovisno o termičkom šumu i interferenciji. Ovisna je o značajkama prijamnika – konstrukciji prijamnika i primjenjenoj ekvilizaciji, te se utvrđuje mjerenjem. Mjerenje se izvodi ubacivanjem visokoselektivnog filtera tipa pojasna brana (*notch*) u radio-frekvencijski ili među-frekvencijski propusni pojas. Frekvencija filtera mijenja se unutar propusnog pojasa prijamnika, te se za svaku frekvenciju određuje dubina *notch*-a koja uzrokuje degradaciju BER-a na 10^{-3} . Rezultat je M krivulja (ili W) koja se naziva signatura uređaja (slika 6).



Slika 6 – Mjerenje disperzivne fading margine (signature)

Srednja dubina (B) ovako simuliranog fadanga višestruke propagacije određuje se integracijom krivulje (slika 6). Disperzivna fading margina A_D jednaka je:

$$A_D = 17.6 - 10 \cdot \log \left(\frac{S}{158.4} \right) \quad (2.4)$$

$$S = 2\Delta f \cdot e^{\frac{B}{3.8}}$$

Tipične vrijednosti disperzivne fading margine za 64QAM prijamnike kreću se od 34 dB za prijamnik bez ekvilizacije do 50 dB prijamnika sa implementiranim adaptivnim transverzalnim ekvilizatorom.

2.1.5 Faktor disperzivnog fadanga

Općenito, dubina disperzivnog fadanga ovisna je o:

- tipu i neravnosti terena,
- duljini trase,
- klimatskim uvjetima,
- čistoći trase.

Uvažavanje navedenih utjecaja ostvaruje se faktorom disperzivnog fadanga. Ovisno o uvjetima propagacije *Pathloss* rabi slijedeće vrijednosti ovog faktora:

dobri	0.5 do 1
srednji	3
teški	5 do 7
ekstremni	9

2.1.6 Efektivna fading margina

Jednolika i disperzivna fading margina kombiniraju se u efektivnu fading marginu na slijedeći način:

$$A_F = -10 \cdot \log \left(10^{\frac{-A_F}{10}} + R_D \cdot 10^{\frac{-A_D}{10}} \right) \quad (2.5)$$

gdje je

A_F	fading margina jednolikog fading-a
R_D	faktor disperzivnog fading-a
A_D	fading margina disperzivnog fading-a

2.2 Neraspoloživost prema ITU – SES (*Severely Errored Seconds*)

Sve dosad navedeno ukazuje na temeljne ovisnosti između fading margine i vjerojatnosti P fading-a dubljega od neke granične razine. Izračun margine disperzivnog fading-a prema (2.4) omogućava izračun efektivne fading margine prema (2.5) i time izračun P prema (2.1). Treba uočiti da P ne određuje trajanje fading-a nego samo ukupno vrijeme, tijekom najgoreg mjeseca u godini, u kojem je prijamni signal slabiji od praga prijama. U cilju izračuna neraspoloživosti prema ITU definiciji, odnosno SES-a, vjerojatnost P razdvaja se u dvije komponente, jednoliku P_{flat} i disperzivnu P_{disp} kako slijedi:

$$\begin{aligned} P_{\text{flat}} &\propto f^b \cdot d^c \cdot 10^{\frac{-A_{\text{flat}}}{10}} \\ P_{\text{disp}} &\propto f^b \cdot d^c \cdot 10^{\frac{-A_{\text{disp}}}{10}} \end{aligned} \quad (2.6)$$

gdje je

A_{flat}	margina jednolikoga fading-a (dB)
A_{disp}	margina disperzivnoga fading-a (dB)

Vjerojatnost trajanja jednolikog fading-a dužeg od t sekundi u slijedu, dana je sa:

$$\begin{aligned} \rho_{\text{flat}}(t) &= 0.5 \cdot \operatorname{erfc} \left[\frac{\ln \left(\frac{t}{T_d} \right) + 0.673}{1.27\sqrt{2}} \right] \\ T_d &= 163 \cdot k \sqrt{\frac{d}{f}} \cdot 10^{\frac{-A_{\text{flat}}}{10}} \end{aligned} \quad (2.7)$$

pri čemu su

$\operatorname{erfc}()$	komplementarna funkcija greške
T_d	prosječno trajanje fading-a
k	faktor
	0.5 za prostorni diversity
	0.5 za frekvencijski diversity
	0.75 za N-frekvencijski diversity ($N > 1$)
	1.0 bez diversity-a
d	duljina trase u km
f	frekvencija u GHz

Vjerojatnost disperzivnoga fading-a trajanja dužeg od t sekundi u slijedu je dana sa:

$$\rho_{\text{disp}} = \left(1 + 0.85\sqrt{t} + 0.5 \cdot 0.85^2 \cdot t \right) \cdot e^{-0.85\sqrt{t}} \quad (2.8)$$

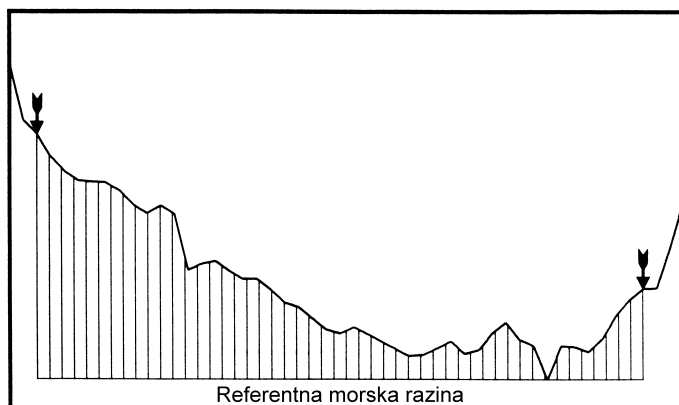
Prema ITU definiciji neraspoloživost uslijed višestruke propagacije je vjerojatnost fading-a ispod praga $\text{BER} = 10^{-3}$ u kontinuiranog trajanja 10 ili više sekundi. Vjerojatnost svih ostalih fading-a koji

umanjuju prijamnu razinu ispod praga $BER = 10^{-3}$, odnosno fading-a kraćih od 10 sekundi predstavlja SES (*Severely Errored Seconds*). Nerazpoloživost i SES određuju se prema:

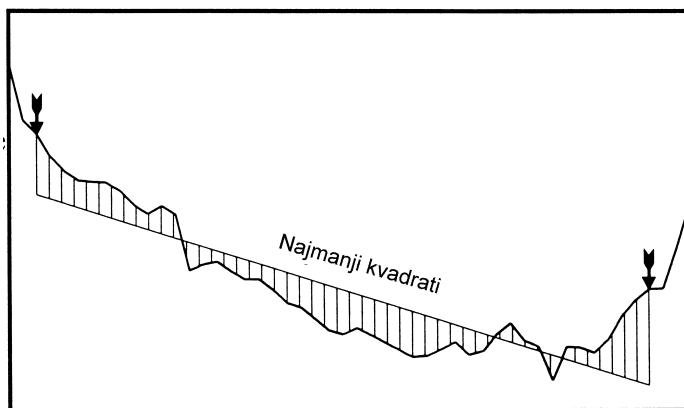
$$\begin{aligned} U_{ITU} &= \rho_{\text{flat}} \cdot P_{\text{flat}} + \rho_{\text{disp}} \cdot P_{\text{disp}} \\ SES_{ITU} &= (1 - \rho_{\text{flat}}) \cdot P_{\text{flat}} + (1 - \rho_{\text{disp}}) \cdot P_{\text{disp}} \end{aligned} \quad (2.9)$$

2.2.1 Neravnost terena

Mjera neravnosti terena je standardna devijacija visina profila terena (kvadratni korijen srednjaka kvadrata odstupanja od srednje visine). Program *Pathloss* izračunava neravnost terena uvažavajući visine 50 jednoliko raspoređenih točaka na relevantnom dijelu profila (slično kao kod izračuna prigušenja refleksije). Izračun neravnosti može biti u odnosu na razinu mora (slika 7) ili u odnosu na pravac najmanjeg kvadratnog odstupanja (slika 8).



Slika 7 – Neravnost terena u odnosu na razinu mora



Slika 8 – Neravnost terena u odnosu na pravac najmanjeg kvadratnog odstupanja

Program limitira vrijednost neravnosti terena u opseg od 6 do 42 metra. Isto tako, ako je razlika visina krajnjih točaka manja od 42 m, program visine referencira na razinu mora, a u protivnom se visine referenciraju na pravac najmanjeg kvadratnog odstupanja.

Program *Pathloss* izračunava neravnost terena na slijedeći način:

$$\begin{aligned} S &= \sqrt{\frac{1}{50} \sum_{i=1}^{50} (x_i - M)^2} \\ M &= \frac{1}{50} \sum_{i=1}^{50} x_i \end{aligned} \quad (2.10)$$

2.3 Preporuka ITU-R P.530-6

Ova preporuka u odjeljku 2.3.2 daje vjerojatnost P da će dubina fading-a A (dB) biti premašena u najgorem mjesecu⁵:

$$P = K \cdot d^{3.3} \cdot f^{0.93} \cdot (1 + \varepsilon_p)^{-1.1} \Theta^{1.2} \cdot 10^{-\frac{A}{10}} \quad (2.11)$$

gdje je

K	geoklimatski faktor za najgori mjesec
d	duljina trase u km
f	frekvencija u GHz
ε_p	inklinacija trase u miliradijanim
Θ	srednji upadni kut pri 4/3 radijusa Zemlje
A	efektivna fading margina u dB

2.3.1 Geoklimatski faktor

Geoklimatski faktor K procjenjuje se iz podataka o fading-u za prosječni najgori mjesec za postojeće mikrovalne veze na predmetnom geografskom području. Ako takvi podaci nisu raspoloživi, procjena K temelji se na postotku vremena P_L tijekom kojeg je gradijent refrakcije unutar 100 najnižih metara atmosfere manji od -100 N jedinica / km. Zemljovid⁶ na kraju ovog odjeljka (slike 9, 10, 11, 12) mogu poslužiti za određivanje P_L , pri čemu se uzima vrijednost za najgori mjesec između veljače, svibnja, kolovoza i studenog, uz iznimku za zemljopisne širine veće od 60° za koje se uvažavaju samo topliji mjeseci.

Nakon određivanja P_L moguće je odrediti geoklimatski faktor:

- za mikrovalne veze iznad kopna (opaska 1), kod kojih je nadmorska visina niže postaje manja od 700 m, geoklimatski faktor je

$$K = 10^{-(5.4 - C_{Lat} - C_{Lon})} \cdot P_L^{1.5} \quad (2.12)$$

- za mikrovalne veze iznad kopna (opaska 1 i 2 za veze iznad manjih rijeka i jezera), kod kojih je nadmorska visina niže postaje veća od 700 m, geoklimatski faktor je

$$K = 10^{-(6.0 - C_{Lat} - C_{Lon})} \cdot P_L^{1.5} \quad (2.13)$$

- za mikrovalne veze iznad srednje velikih površina voda (opaska 3), obalna područja pored takvih voda (opaska 4) ili područja sa mnogo jezera (opaska 5) geoklimatski faktor je

$$K = 10^{-(4.8 - C_{Lat} - C_{Lon})} \cdot P_L^{1.5} \quad (2.14)$$

- za mikrovalne veze iznad velikih površina voda (opaska 3), obalna područja pored takvih voda (opaska 4) geoklimatski faktor je

$$K = 10^{-(4.4 - C_{Lat} - C_{Lon})} \cdot P_L^{1.5} \quad (2.15)$$

gdje je C_{Lat} eksponent zemljopisne širine ξ dan sa

$C_{Lat} = 0$	za	$53^\circ S \geq \xi \leq 53^\circ N$	
$C_{Lat} = -5.3 + \xi/10$	za	$53^\circ N < \xi < 60^\circ N$	ili $53^\circ S < \xi < 60^\circ S$
$C_{Lat} = 0.7$	za	$\xi > 60^\circ N$	ili $\xi > 60^\circ S$

⁵ Vrijedi samo za uskopojasne sustave i za dubine fading-a veće od cca 15 dB ili vrijednosti koje premašuju 0.1% najgoreg mjeseca. (2.11) je izvedeno iz podataka za trase od 7 do 95 km u frekvenzijskim pojasevima od 2 do 37 GHz, inklinacije 0 do 24 mrad i upadne kuteve 1 do 12 mrad. Testiranja na trasama do 198 km i frekvencijama od 500 MHz na više, ukazuju na širu primjenjivost.

⁶ Rec. ITU-R P.453

dok je eksponent zemljopisne duljine C_{Lon} jednak

$C_{Lon} = 0.3$ za zemljopisne širine Europe i Afrike

$C_{Lon} = -0.3$ za zemljopisne širine Sjeverne i Južne Amerike

$C_{Lon} = 0$ za ostale širine

OPASKE

- 1 Za neka planinska područja na zemljovidima nema detalja jer nema dovoljno raspoloživih podataka. Vrijednosti geoklimatskog faktora za ta područja tendiraju biti veće od optimalnih. Za takva područja, uključujući i Alpe, bolje je računati K prema (2.13).
- 2 Mikrovalne veze koje prolaze iznad manjih jezera ili rijeka normalno se klasificiraju kao kopnene. U slučaju nesigurne klasifikacije član eksponenta od 5.4 u (2.12) treba zamjeniti sa 5.1, vidi i opasku 4.
- 3 Srednje velike vodene površine obuhvaćaju Finski zaljev, područje obje obale Kanade i slične. Velike vodene površine uključuju Mediteran, Engleski kanal, Sjeverno more, veće protege Baltika i slično. U slučaju nesigurne klasifikacije prvi član eksponenta u (2.14) i (2.15) treba zamjeniti sa 4.6.
- 4 Ako je dio trase niži od 100 metara nadmorske visine i nalazi se bliže od 50 km od obale srednje ili velike vodene površine, te ne postoje, između trase i obale, područja terena sa nadmorskom visinom iznad 100 m, smatra se da mikrovalna veza prolazi obalnim područjem. U slučaju cjelokupne trase niže od 100 m nadmorske visine geoklimatski faktor izračunava se iz (2.14) odnosno (2.15). U slučaju kada je samo r_c dio trase ispod 100 m i bliže od 50 km od obalne linije, član eksponenta veličine 4.8 u (2.14) zamjenjuje se sa $4.8 - r_c$ odnosno član eksponenta veličine 4.4 u (2.15) zamjenjuje se sa $5.4 - r_c$.

2.3.2 Inklinacija trase

Program *Pathloss* inklinaciju trase ε_p u miliradijanima izračunava prema:

$$\varepsilon_p = 1000 \tan^{-1} \left(\frac{|h_t - h_r|}{1000 \cdot d} \right) \quad (2.16)$$

gdje su

h_t	nadmorska visina jedne postaje
h_r	nadmorska visina druge postaje
d	duljina trase u km

Izračun je valjan za inklinacije od 0 do 24 miliradijana.

2.3.3 Upadni kut

Kut upada je kut, u točki refleksije, između ravnine refleksije i dolazne ili reflektirane zrake pri faktoru radijusa Zemlje od 4/3. Srednji upadni kut Θ određuje se definiranjem dominantne refleksijske ravnine profila trase. Na profilu tu razinu prikazuje pravac $y = ax + b$. To je pravac koji, uz najmanju kvadratnu grešku, aproksimira za refleksiju relevantni dio profila radio-trase. Po utvrđivanju dominantne refleksijske ravnine izračunavaju se efektivne visine prema:

$$\begin{aligned} h_1 &= h_t - b \\ h_2 &= h_r - a \cdot d - b \end{aligned} \quad (2.17)$$

gdje su h_t i h_r visine antena jedne i druge postaje, te d duljina trase.

Srednji upadni kut Θ izračunava se prema slijedećem:

$$\begin{aligned}\Theta &= \frac{h_1 + h_2}{d} \cdot \left[1 - m \cdot (1 + b^2) \right] \\ m &= \frac{d^2}{4 \cdot a_e \cdot (h_1 + h_2)} \\ c &= \frac{|h_1 - h_2|}{h_1 + h_2} \\ b &= 2 \cdot \sqrt{\frac{m+1}{3 \cdot m}} \cdot \cos \left[\frac{\pi}{3} + \frac{1}{3} \cos^{-1} \left(\frac{3 \cdot c}{2} \cdot \sqrt{\frac{3 \cdot m}{(m+1)^3}} \right) \right]\end{aligned}\quad (2.18)$$

gdje je

- h_1 efektivna visina antene jedne postaje
- h_2 efektivna visina antene druge postaje
- a_e efektivni radijus Zemlje (8500 km za $K = 4/3$)

Izračun srednjega upadnog kuta Θ valjan je za kuteve od 1 do 12 miliradiana.

2.4 Preporuka ITU-R P.530-7

Ova preporuka u odjeljku 2.3.1 daje vjerojatnost P premašivanja dubina fading-a A (dB) u prosječnom najgorem mjesecu:

$$P = K \cdot d^{3.6} \cdot f^{0.89} \cdot (1 + \varepsilon_p)^{-1.4} \cdot 10^{\frac{A}{10}} \quad (2.19)$$

gdje su

- K geoklimatski faktor za najgori mjesec
- d duljina trase u km
- f frekvencija u GHz
- ε_p inklinacija trase u miliradianima
- Θ srednji upadni kut pri 4/3 radijusa Zemlje
- A efektivna fading margina u dB

2.4.1 Geoklimatski faktor

Geoklimatski faktor procjenjuje se iz podataka o fading-u za prosječni najgori mjesec za postojeće mikrovalne veze na predmetnom geografskom području, ako takvih podataka ima.

Zemaljske mikrovalne veze

Ako nema mjerenih podataka za određivanje K , njegova je procjena za zemaljske veze (vidi opasku 1) moguća iz empirijske veze sa klimatskom varijablom P_L (odnosno postotkom vremena tijekom kojeg je gradijent refrakcije u donjih 100 m atmosfere niži od -100 N jedinica/km u procijenjenom najgorem mjesecu):

$$K = 5.0 \cdot 10^{-7} \cdot 10^{-0.1(C_0 - C_{Lat} - C_{Lon})} \cdot P_L^{1.5} \quad (2.20)$$

Tabela 1 daje vrijednosti C_0 za razne visine antena i tipove terena.

Tabela 1 – Vrijednosti C_0 u ovisnosti o tipu terena i nadmorskoj visini antena

Značajke terena	C_0 (dB)
Antene na malim nadmorskim visinama (0 do 400 m) – ravnice Veze iznad tla ili uglavnom iznad tla, locirane u pretežito ravničarskom području, antena niže postaje na nadmorskoj visini manjoj od 400 m.	0.0
Antene na malim nadmorskim visinama (0 do 400 m) – brdoviti predio Veze iznad tla ili uglavnom iznad tla, locirane u pretežito brdovitom području, antena niže postaje na nadmorskoj visini manjoj od 400 m.	3.5
Antene na srednjim nadmorskim visinama (400 do 700 m) – visoravan Veze iznad tla ili uglavnom iznad tla, locirane u pretežito ravničarskom području, antena niže postaje na nadmorskoj visini od 400 do 700 m.	2.5
Antene na srednjim nadmorskim visinama (400 do 700 m) – brdoviti predio Veze iznad tla ili uglavnom iznad tla, locirane u pretežito brdovitom području, antena niže postaje na nadmorskoj visini manjoj od 400 do 700 m.	6.0
Antene na velikim nadmorskim visinama (> 700 m) – visoravan Veze iznad tla ili uglavnom iznad tla, locirane u pretežito ravničarskom području, antena niže postaje na nadmorskoj visini većoj od 700 m.	5.5
Antene na velikim nadmorskim visinama (> 700 m) – brdoviti predio Veze iznad tla ili uglavnom iznad tla, locirane u pretežito brdovitom području, antena niže postaje na nadmorskoj visini većoj od 700 m.	8.0
Antene na velikim nadmorskim visinama (> 700 m) – planine Veze iznad tla ili uglavnom iznad tla, locirane u pretežito planinskom području, antena niže postaje na nadmorskoj visini većoj od 700 m.	10.5

U slučaju nesigurnosti klasifikacije tipa terena (primjerice: brdoviti / planinski) primjenjuje se sred-njak C_0 za sporna dva tipa terena. Veze koje na jednom kraju prolaze iznad visoravni, a drugim krajem planinskim predjelom klasificiraju se kao veze u brdovitom području. U slučaju da trasa dijelom prela-zi iznad vodene površine ista se smatra ravnicom.

Eksponent C_{Lat} zemljopisne širine ξ dan sa

$$\begin{array}{llll}
 C_{Lat} = 0 & \text{za} & 53^\circ\text{S} \geq \xi \leq 53^\circ\text{N} & \\
 C_{Lat} = -53 + \xi & \text{za} & 53^\circ\text{N} < \xi < 60^\circ\text{N} & \text{ili} \quad 53^\circ\text{S} < \xi < 60^\circ\text{S} \\
 C_{Lat} = 7 & \text{za} & \xi \geq 60^\circ\text{N} & \text{ili} \quad \xi \geq 60^\circ\text{S}
 \end{array}$$

dok je eksponent zemljopisne duljine C_{Lon} jednak

$$\begin{array}{l}
 C_{Lon} = 3 \text{ za zemljopisne širine Europe i Afrike} \\
 C_{Lon} = -3 \text{ za zemljopisne širine Sjeverne i Južne Amerike} \\
 C_{Lon} = 0 \text{ za ostale širine}
 \end{array}$$

Za veličinu klimatske varijable P_L u (2.20) uzima se najveća vrijednost premašaja gradijenta refrakcije od -100 N jedinca / km prema kartama⁷ na kraju ovog odjeljka. Uzima se vrijednost za najgori mjesec između veljače, svibnja, kolovoza i studenog, uz iznimku za zemljopisne širine veće od 60° za koje se uvažavaju samo topliji mjeseci.

⁷ Rec. ITU-R P.453

Mikrovalne veze u blizini / iznad velikih vodenih površina

Ako mjereni geoklimatski faktor nije raspoloživ za ovakve slučajeve (vidi opasku 2) procjena K je sljedeća:

$$\begin{aligned}
 K_{cl} &= 2.3 \cdot 10^{-4} \cdot 10^{-0.1 \cdot C_0 - 0.01 |e|} \\
 \text{za } \dots K_{cl} &\geq K_i \\
 K &= 10^{(1-r_c) \cdot \log_{10}(K_i) + r_c \cdot \log_{10}(K_{cl})} \\
 \text{za } \dots K_{cl} &< K_i \\
 K &= K_i
 \end{aligned} \tag{2.21}$$

gdje je r_c dio trase visine manje od 100 m iznad vodene površine i bliže od 50 km od obalne crte, ako nema uzvisina viših od 100 m između trase i obalne crte. Veličine C_0 dane su u tabeli 1.

Mikrovalne veze u blizini / iznad srednje velikih vodenih površina

Ako mjereni geoklimatski faktor nije raspoloživ (vidi opasku 2) procjena K je sljedeća:

$$\begin{aligned}
 K_{cm} &= 10^{0.5 \cdot (\log_{10}(K_i) + \log_{10}(K_{cl}))} \\
 \text{za } \dots K_{cm} &\geq K_i \\
 K &= 10^{(1-r_c) \cdot \log_{10}(K_i) + r_c \cdot \log_{10}(K_{cm})} \\
 \text{za } \dots K_{cl} &< K_i \\
 K &= K_i
 \end{aligned} \tag{2.22}$$

gdje je K_{cl} određen u (2.21).

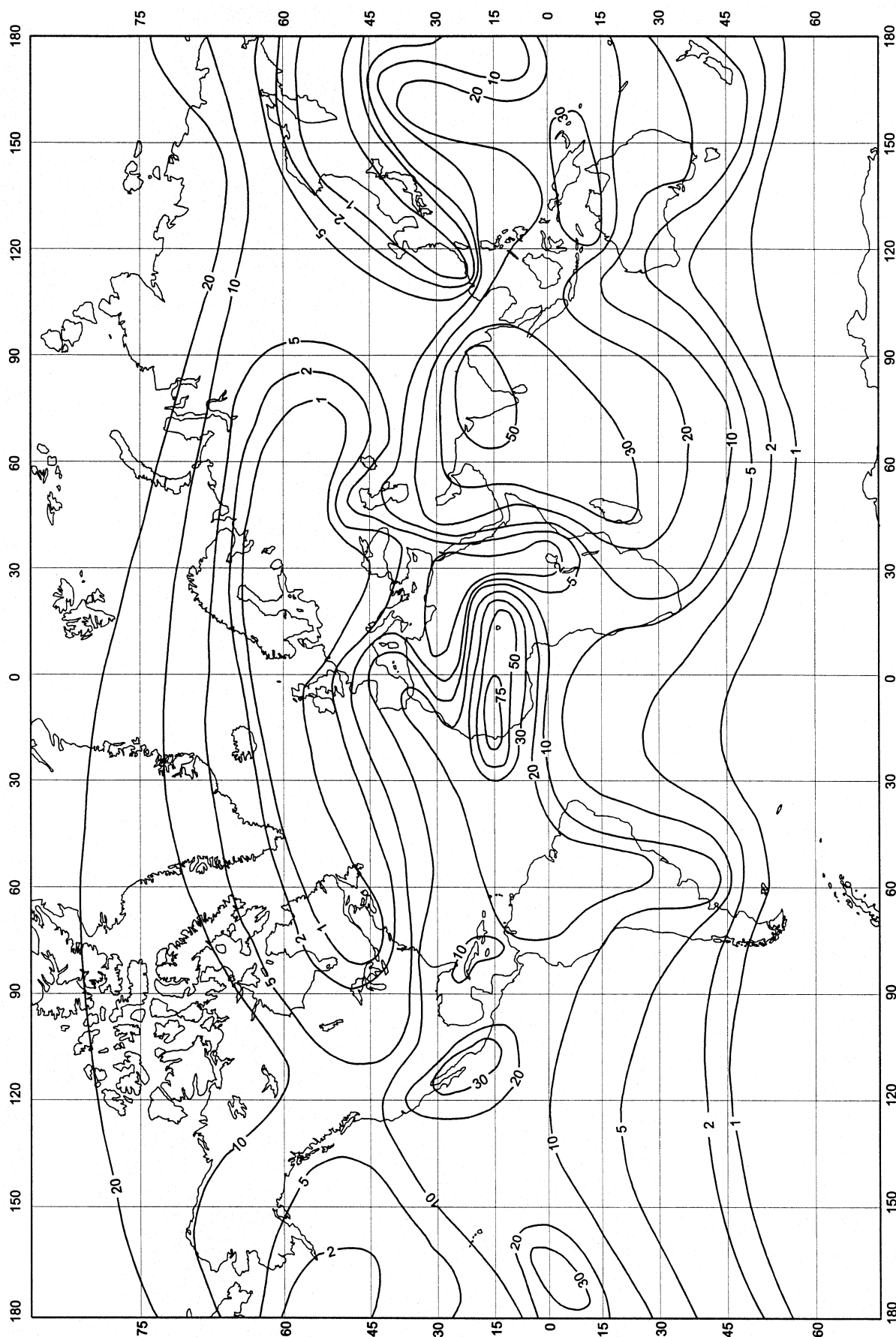
OPASKE

1. Zemaljske mikrovalne veze su one čija je trasa iznad 100 m nadmorske visine ili 50 ili više kilometara udaljena od najbliže obale, te veze na majoj visini ili bliže obali, ali uz postojanje područja terena višeg od 100 m između trase i obale. Veze iznad rijeka i manjih jezera smatraju se zemaljskim. Za veze u područjima sa mnogo manjih jezera vrijedi opaska 4.
2. Veza kojoj je r_c dio trase visine manje od 100 m iznad srednje velike vodene površine i bliže od 50 km od obalne crte, ako nema uzvisina viših od 100 m između trase i obalne crte, smatra se vezom iznad vodene površine.
3. Srednje velike vodene površine obuhvaćaju Finski zaljev, područje obje obale Kanade i slične. Velike vodene površine uključuju Mediteran, Engleski kanal, Sjeverno more, veće protege Baltika i slično. U slučaju nesigurne klasifikacije K se izračunava iz:

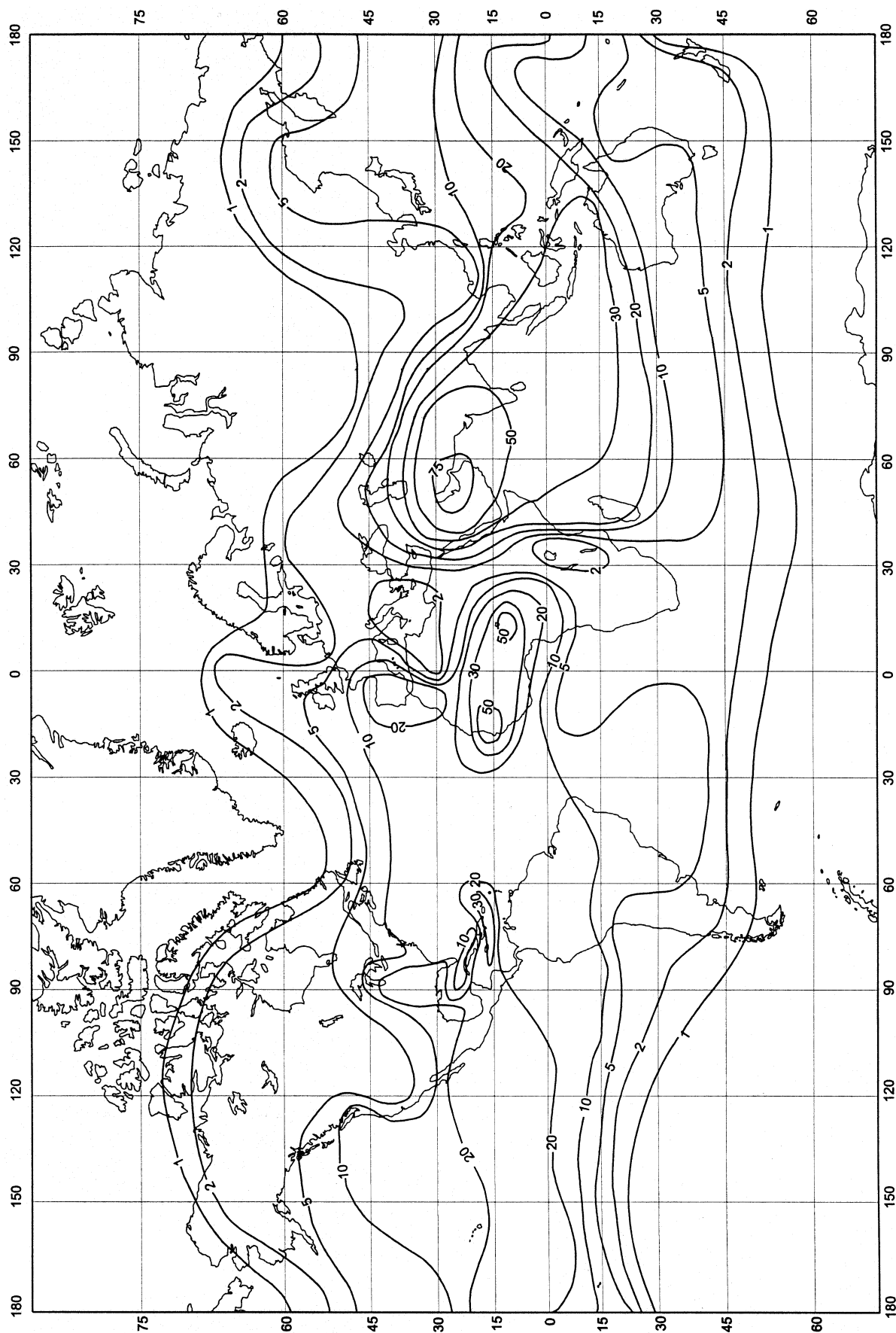
$$K = 10^{(1-r_c) \cdot \log_{10}(K_i) + 0.5 \cdot r_c \cdot (\log_{10}(K_{cm}) + \log_{10}(K_{cl}))} \tag{2.23}$$

4. Vjeruje se da se veze u područjima sa mnogo manjih jezera ponašaju slično kao i u obalnim područjima.

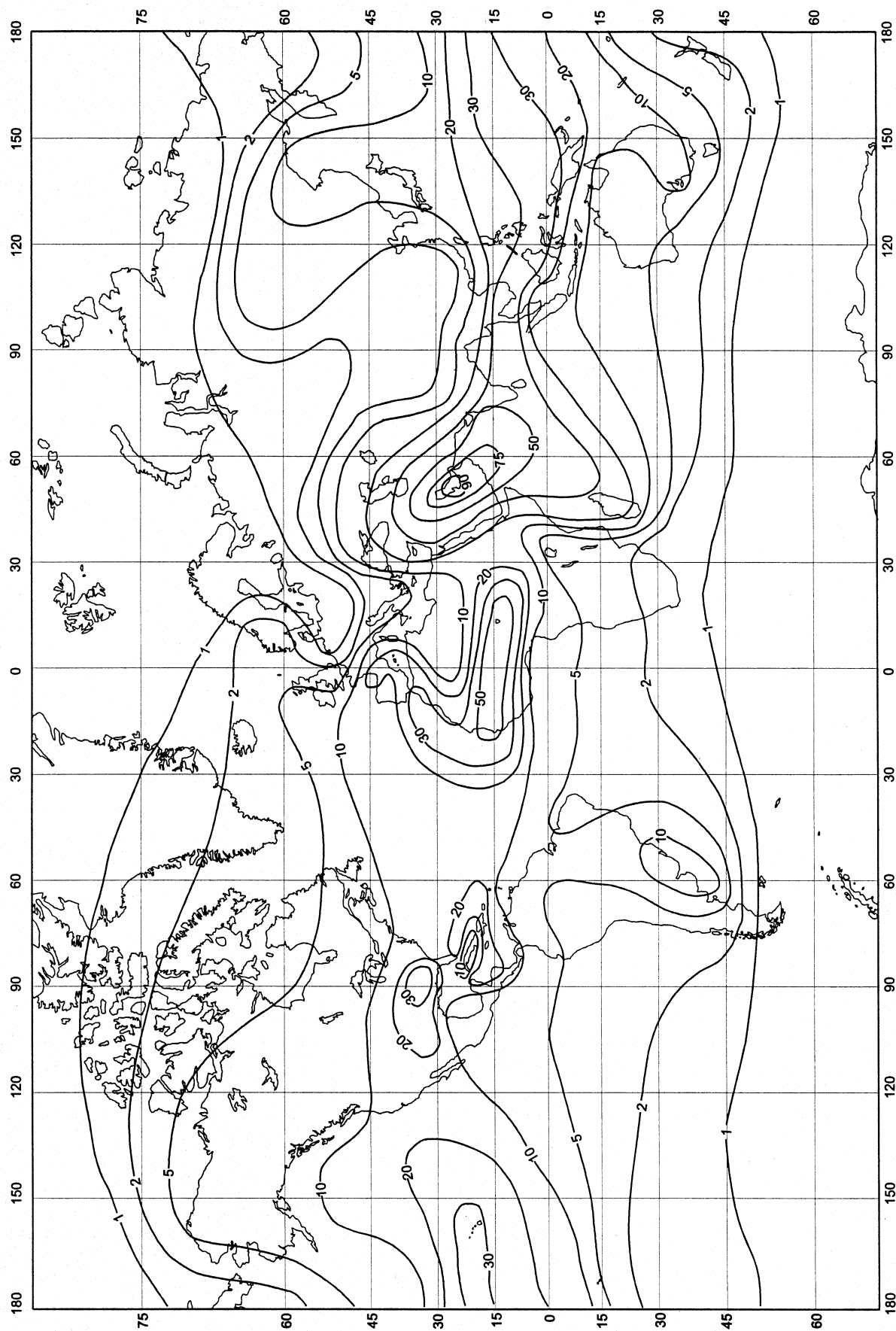
Jednadžba (2.19) izvedena je temeljem podataka o fadingu na trasama duljina od 7 do 95 km i u frekvencijskim pojasevima od 2 do 37 GHz, sa inklinacijama trase od 0 do 24 mrad i upadnim kutevima od 1 do 12 mrad. Provjere na većim skupovima podataka za trase duljine do 237 km i nižim frekvencijama (500 MHz) ukazuju na valjanost i za duže trase, odnosno niže frekvencije.



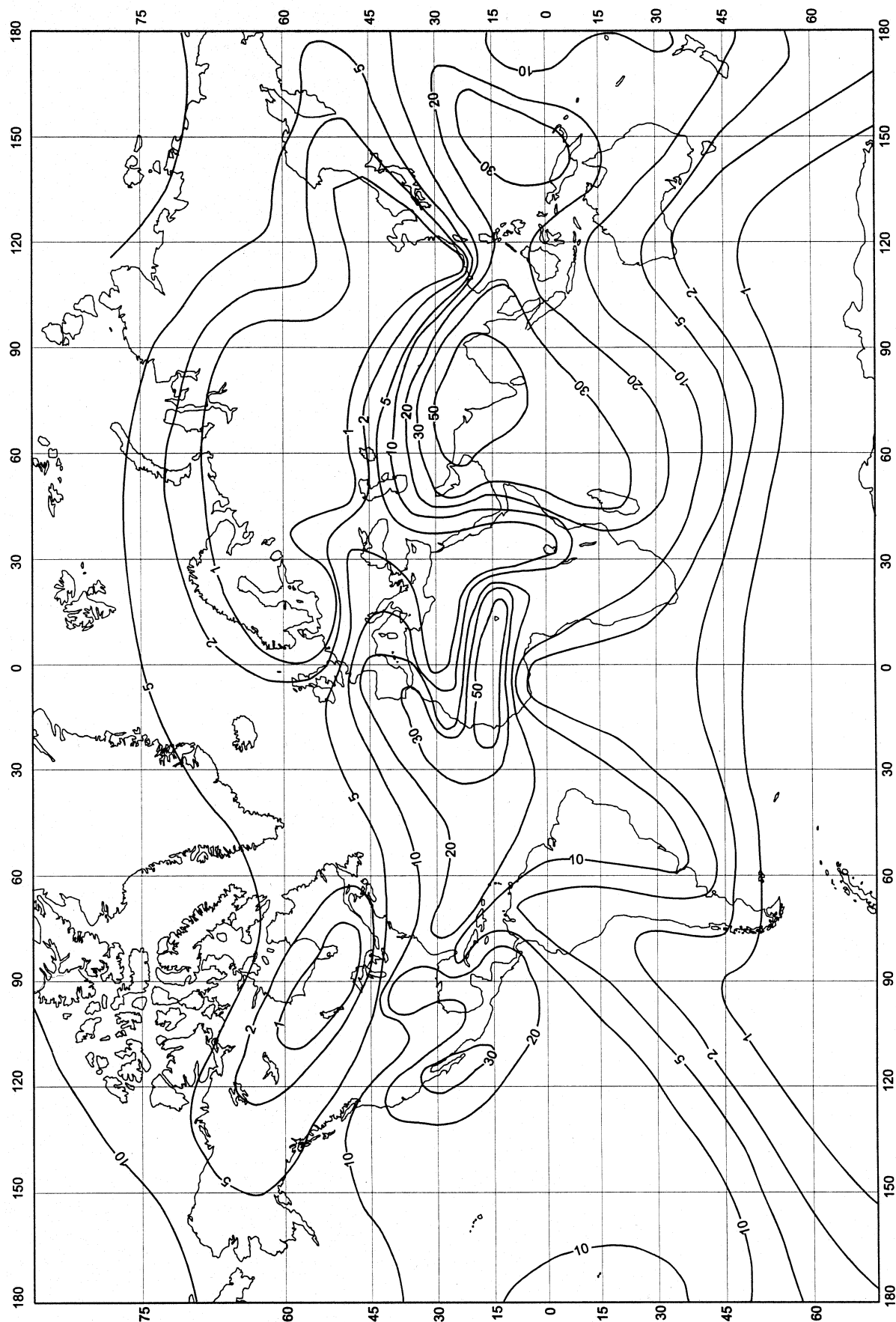
Slika 9 – Postotak vremena u kojemu je gradijent refraktivnosti manji od 100 N/km – veljača



Slika 10 – Postotak vremena u kojemu je gradijent refraktivnosti manji od 100 N/km – svibanj



Slika 11 – Postotak vremena u kojemu je gradijent refraktivnosti manji od 100 N/km – kolovoz



Slika 12 – Postotak vremena u kojemu je gradijent refraktivnosti manji od 100 N/km – studeni

2.5 Frekvencijski diversity

Faktor poboljšanja za frekvencijski diversity dan je sa:

$$I_{fd} = 80.5 \cdot \frac{\Delta f}{f^2 \cdot d} \cdot 10^{\frac{A}{10}} \quad (2.24)$$

gdje je

Δf	efektivni razmak frekvencija u GHz
f	frekvencija u GHz
d	duljina trase
A	efektivna fading margina

Pretpostavlja se da je faktor poboljšanja jednak za jednoliki i disperzivni fading pa (2.24) vrijedi za sve tipove sustava (analogni, uskopojasni i širokopojasni digitalni).

Vjerojatnost fading-a za frekvencijski diversity sustave je:

$$P_{fd} = \frac{P}{I_{fd}} \quad (2.25)$$

N-frekvencijski diversity ima efektivni razmak frekvencija jednak:

$$\Delta f = \frac{N}{\sum_k \frac{1}{\Delta f_k}}$$

2.6 Prostorni diversity

2.6.1 Prostorni diversity sa prekapćanjem u temeljnom pojasu

Faktor poboljšanja za ovaj prostorni diversity je:

$$I_{sd} = 1.2 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{f}{d} \cdot s^2 \cdot v^2 \cdot 10^{\frac{A}{10}} \quad (2.27)$$

$$v_{dB} = 20 \cdot \log(v)$$

gdje su

s	vertikalni razmak antena u m
f	frekvencija u GHz
d	duljina trase u km
v_{dB}	razlika između glavnog i sporednog prijamnog signala u dB

Vjerojatnost fading-a za prostorni diversity prijam je:

$$P_{sd} = \frac{P}{I_{sd}} \quad (2.28)$$

2.6.2 Prostorni diversity sa kombiniranjem u MF pojasu

Kod ovog sustava glavni i sporedni prijamni signal kombiniraju se MF kombinacijskim sklopom. Ovdje je kombinirana termička fading margina jednaka:

$$A_c = A_i + 2.6 + 20 \cdot \log\left(\frac{1+v}{2}\right) \quad (2.29)$$

$$v_{dB} = 20 \cdot \log(v)$$

gdje su

A_t	veća između glavne i sporedne termičke fading margine
v_{dB}	razlika između glavnog i sporednog prijamnog signala u dB

Kod ovog prostornog diversity-ja margina jednolikog fading-a postaje:

$$A = -10 \cdot \log \left(10^{\frac{A_t}{10}} + 10^{\frac{A_{sc}}{10}} + 10^{\frac{A_{ex}}{10}} \right) \quad (2.30)$$

Faktor poboljšanja iz (2.27) sada se mijenja i postaje:

$$I_{sd} = 1.2 \cdot 10^{-3} \cdot \frac{f}{d} \cdot s^2 \cdot \frac{16 \cdot v^2}{(1+v)^4} \cdot 10^{\frac{A}{10}} \quad (2.31)$$

gdje je

s	vertikalni razmak antena
f	frekvencija u GHz
d	duljina trase
v_{dB}	razlika između glavnog i sporednog prijamnog signala u dB

2.6.4 Kutni diversity

Kutni diversity temelji se na slijedećim opservacijama:

- Pri udaljenosti antena 3 ili više metara faktor poboljšanja za disperzivni fading neovisan o razmaku. Smanjivanje razmaka ispod 3 m uvećava faktor poboljšanja.
- Najveći faktori poboljšanja za disperzivni fading dobijaju se montažom antene uz antenu s malim horizontalnim offsetom.
- Antene u kutnom diversity-ju aproksimiraju opisanu konfiguraciju čime se postiže značajni faktor poboljšanja za disperzivni fading.
- Postojanje poboljšanja za jednoliki fading još nije dokazano.

Faktor poboljšanja za kutni diversity izračunava se jednako kao za prostorni vertikalnog razmaka 9.1 m. Faktor poboljšanja jednolike fading margine je tada 10% faktora poboljšanja za konvencionalni prostorni diversity, a za disperzivnu fading marginu jednak je onoj kod konvencionalnoga prostornog diversity-a.

3. PRIGUŠENJE SLOBODNOG PROSTORA

Prigušenje u dB na trasi između dva izotropna radijatora u slobodnom prostoru jednako je:

$$A = 92.4 + 20 \cdot \log(f) + 20 \cdot \log(d) \quad (3.1)$$

gdje je

f	frekvencija u GHz
d	duljina trase u km

4. APSORPCIJA U ATMOSFERI

Prigušenje zbog propagacije u atmosferi suma je prigušenja uslijed specifičnih apsorpcija na kisiku i vodenoj pari.

4.1 Apsorpcija molekulama kisika

Specifična atenuacija γ_0 u dB/km za kisik dana je jednačbom:

za $f < 57$ GHz

$$\gamma_0 = \left[7.19 \cdot 10^{-3} + \frac{6.09}{f^2 + 0.227} + \frac{4.81}{(f - 57)^2 + 1.50} \right] \cdot f^2 \cdot 10^{-3}$$

za $f > 63$ GHz

$$\gamma_0 = \left[3.79 \cdot 10^{-7} + \frac{0.265}{(f - 63)^2 + 1.59} + \frac{0.028}{(f - 118)^2 + 1.47} \right] \cdot (f + 198)^2 \cdot 10^{-3} \quad (4.1)$$

gdje je f frekvencija u GHz.

4.2 Apsorpcija molekulama vodene pare

Specifična atenuacija γ_w u dB/km za vodenu paru za frekvencije $f < 350$ GHz i koncentraciju $\rho < 12$ g/m³, dana je jednačbom:

$$\gamma_w = \left[0.067 + \frac{3}{(f - 22.3)^2 + 7.3} + \frac{9}{(f - 183.3)^2 + 6} + \frac{4.3}{(f - 323.8)^2 + 10} \right] \cdot f^2 \cdot \rho \cdot 10^{-4} \quad (4.2)$$

gdje je

f frekvencija u GHz,

ρ koncentracija vodene pare u g/m³ na razini zemlje kod temperature 15°C.

5. PRIGUŠENJE KIŠOM – ITU PREPORUKA 530-7

Trajanje nerazpoloživosti zbog kiše računa se temeljem premašivanja intenziteta kiše $R_{0.01}$ tijekom 0.01% vremena. Koraci izračuna su kako slijedi:

Specifična atenuacija kiše γ računa se prema:

$$\gamma = \alpha \cdot R_{0.01}^\beta \quad (5.1)$$

gdje su α i β regresijski koeficijenti dani u tabeli 2.

Tabela 2 – regresijski koeficijenti za horizontalnu i vertikalnu polarizaciju

Frekvencija (GHz)	α_h	α_v	β_h	β_v
1.0	3.870e-05	3.870e-05	0.912	0.880
2.0	1.540e-04	1.380e-04	0.963	0.923
4.0	6.500e-04	5.910e-04	1.121	1.075
6.0	1.750e-04	1.550e-03	1.308	1.265
7.0	3.010e-03	2.650e-03	1.332	1.312
8.0	4.540e-03	3.950e-03	1.327	1.310
10.0	1.010e-02	8.870e-03	1.276	1.264
12.0	1.880e-02	1.680e-02	1.217	1.200
15.0	3.670e-02	3.350e-02	1.154	1.128
20.0	7.510e-02	6.910e-02	2.099	1.065
25.0	0.124	0.113	1.061	1.030
30.0	0.187	0.167	1.021	1.000
35.0	0.263	0.233	0.979	0.963
40.0	0.350	0.310	0.939	0.929
45.0	0.442	0.393	0.903	0.897
50.0	0.536	0.479	0.873	0.868
60.0	0.707	0.642	0.826	0.824
70.0	0.851	0.784	0.793	0.793
80.0	0.975	0.906	0.769	0.769
90.0	1.060	0.999	0.753	0.754
100.0	1.120	1.060	0.743	0.744

Specifična atenuacija pojavljuje se na efektivnoj dužini trase d_e koja se računa prema:

$$d_e = \frac{d}{1 + \frac{d}{d_0}} \quad (5.2)$$

$$d_0 = 35 \cdot e^{-0.015 R_{0.01}}$$

gdje je d duljina trase u km.

Gornju granicu intenziteta kiše $R_{0.01}$ u (5.2) postavljena je na 100 mm/h.

Atenuacija kišom $A_{0.01}$ koja je na trasi premašena 0.01% vremena jednaka je:

$$A_{0.01} = \gamma \cdot d_e \quad (5.3)$$

Atenuacija A premašena tijekom postotka vremena P u granicama⁸ od 0.001% do 1% je:

$$\frac{A}{A_{0.01}} = 0.12 \cdot P^{-(0.546 + 0.043 \cdot \log_{10} P)} \quad (5.4)$$

Program iznalazi P postavljanjem A na veličinu fading margine i iterativnim rješavanjem (5.4) radi iznalaženja postotka vremena.

⁸ ITU-530 jasno navodi valjanost samo u ovim granicama.

5.1 Neraspoloživost zbog kiše u najgorem mjesecu

Rješavanjem (5.4) određuje se godišnja vjerojatnost ispada zbog kiše. Trajanje ispada tijekom najgoreg mjeseca dano je sa:

$$\begin{aligned} T_{wm} &= 1.22 \cdot T_{an}^{0.87} \\ P_{wm} &= \left(\frac{P_{an}}{0.3} \right)^{0.87} \end{aligned} \quad (5.5)$$

gdje su

T_{wm}	broj sekundi ispada zbog kiše u najgorem mjesecu
T_{an}	broj sekundi ispada zbog kiše u godini
P_{wm}	vjerojatnost ispada zbog kiše u najgorem mjesecu
P_{an}	godišnja vjerojatnost ispada zbog kiše

6. PASIVNI REPETITORI

Projektiranje mikrovalnih veza koje uključuju pasivne repetitore program *Pathloss* omogućava za sljedeće slučajeve:

- veza preko jednog pravokutnog pasivnog repetitora
- veza preko dvaju pravokutnih repetitora u bliskoj sprezi
- veza preko antena spojenih leđa u leđa

Projektiranje zahtjeva profile zemljišta za svaki dio trase, primjerice projektiranje veze preko dva pasivna repetitora iziskuje crtanje tri profila zemljišta.

6.1 Izračun raspoloživosti veze preko pasivnih repetitora

Vjerojatnost P fading-a kao funkcija frekvencije f , duljine trase d i fading margine A je:

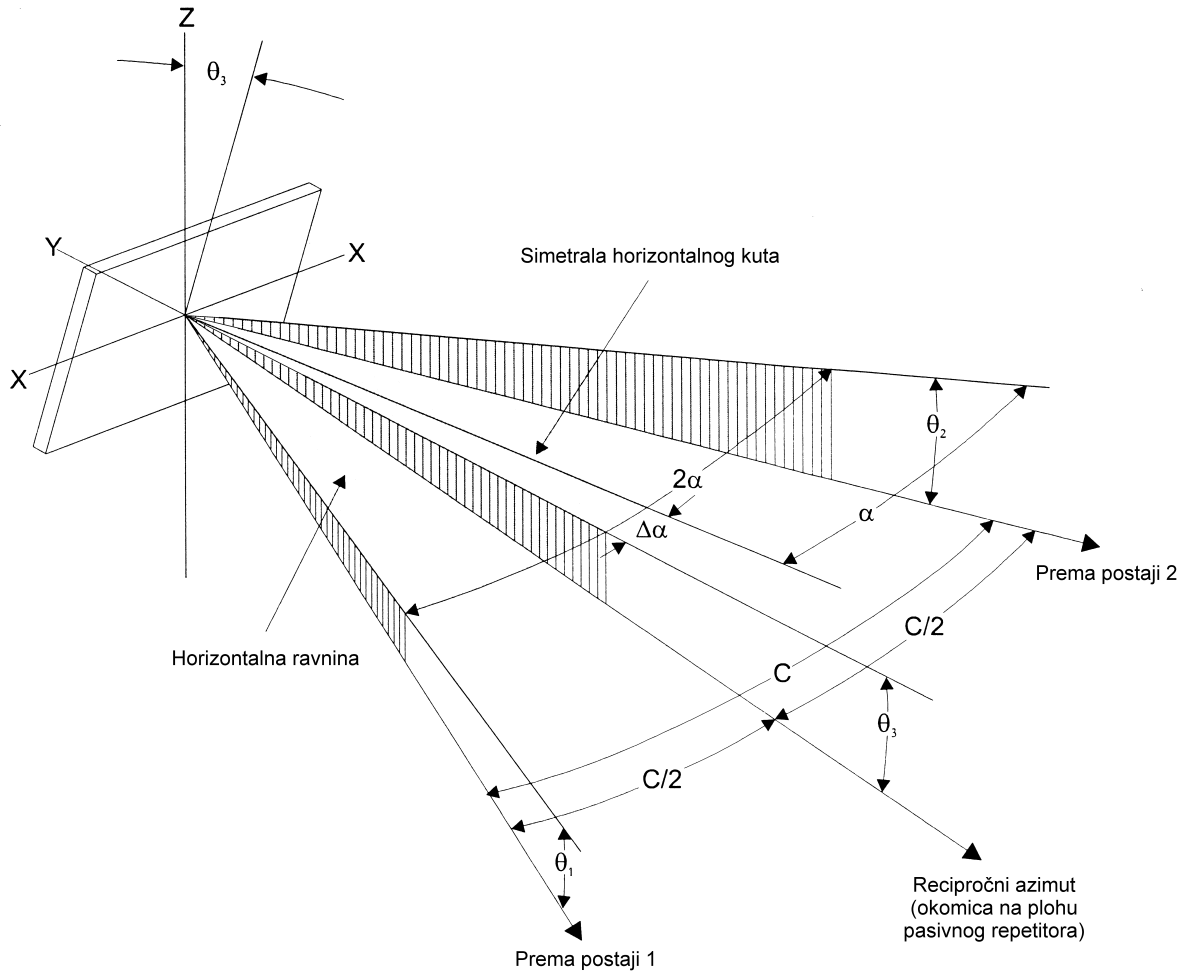
$$P = C \cdot f^a \cdot d^b \cdot 10^{\frac{A}{10}} \quad (6.1)$$

gdje su C , a i b konstante. Budući da pasivni repetitor trasu dijeli u dva segmenta, vjerojatnost fading-a za cijelu trasu je suma vjerojatnosti fading-a za svaki segment. Za jednu mikrovalnu vezu sa pasivnim repetitorom na udaljenosti d_1 od prve, odnosno d_2 od druge antene, vjerojatnost fading-a je:

$$P = \left(C_1 \cdot f^a \cdot d_1^b + C_2 \cdot f^a \cdot d_2^b \right) \cdot 10^{\frac{A}{10}} \quad (6.2)$$

Jednadžba (6.2) može se proširiti na bilo koji broj pasivnih repetitora, pri čemu se za svaki segment trase odrede pripadajući faktori $C_1 \dots C_n$, kao i neravnost terena te upadni kutevi.

Slika 13. prikazuje geometriju pasivnoga pravokutnog repetitora.



Slika 13 – Geometrija pasivnog repetitora

Teorijski je dobit pasivnog repetitora prikazanog na slici 13 sljedeća:

$$G = 20 \cdot \log_{10} \left[\frac{4 \cdot \pi \cdot \alpha \cdot \cos\left(\frac{C}{2}\right)}{\lambda^2} \right] \quad (6.3)$$

$$\cos\left(\frac{C}{2}\right) = \frac{\sin(\theta_1) + \sin(\theta_2)}{2 \cdot \sin(\theta_3)}$$

gdje su:

- θ_1 najmanji vertikalni kut između spojnica centra pasivnog repetitora i antena postaje 1, odnosno antene postaje 2
- θ_2 najveći vertikalni kut između spojnica centra pasivnog repetitora i antena postaje 1, odnosno antene postaje 2
- θ_3 vertikalni kut fronte pasivnog repetitora izračunat prema:

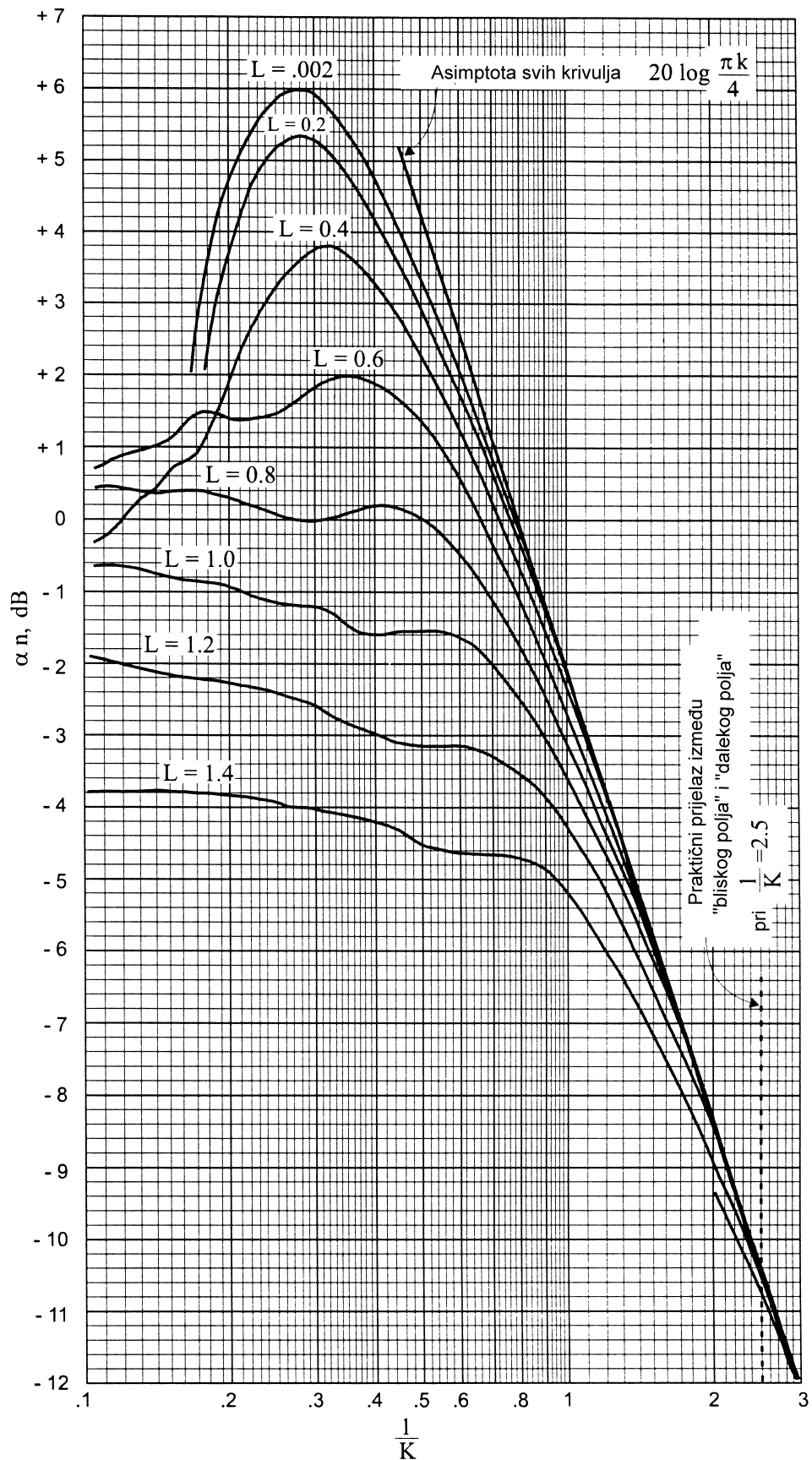
$$\tan(\Delta\alpha) = \frac{\tan(\alpha) \cdot [\cos(\theta_1) - \cos(\theta_2)]}{\cos(\theta_1) + \cos(\theta_2)} \quad (6.4)$$

$$\tan(\theta_3) = \frac{\cos(\Delta\alpha) \cdot [\sin(\theta_1) + \sin(\theta_2)]}{\cos(\alpha) \cdot [\cos(\theta_1) + \cos(\theta_2)]}$$

gdje je α horizontalni kut prema slici 13.

6.2 Dobit ili gubitak unutar bliskog polja

Ako se pasivni repetitor nalazi u bliskom polju antene dobit ili gubitak određuje se dijagramom na slici 14.



Slika 14 – Dobit ili gubitak pasivnog repetitora u bliskom polju

Vrijednost $1/K$ na ordinati izračunava se na slijedeći način:

$$\frac{1}{K} = \frac{\pi \cdot \lambda \cdot d}{4 \cdot a^2} \quad (6.5)$$

gdje su:

- d udaljenost između antene i pasivnog repetitora
 λ valna duljina
 a^2 efektivna površina pasivnog repetitora

Ako je $1/K > 3$, pasivni repetitor nije u bliskom polju te se dobit ili gubitak ne izračunavaju. Parametar L krivulja na slici 14 izračunava se kako slijedi:

$$L = D \cdot \sqrt{\frac{\pi}{4 \cdot a^2}} \quad (6.6)$$

gdje je

- D promjer antene
 a^2 efektivna površina pasivnog repetitora

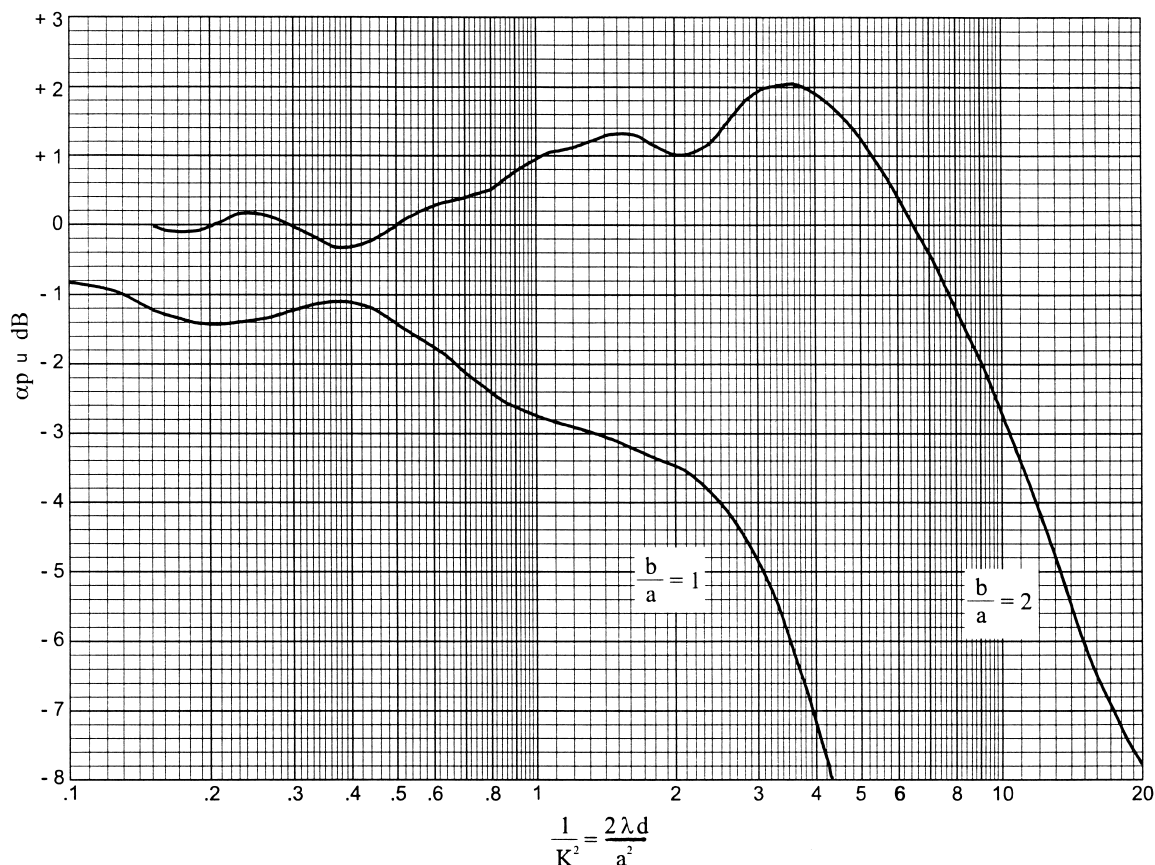
6.3 Prigušenje dvaju blisko spregnutih pasivnih repetitora.

Prigušenje sprege dvaju bliskih pasivnih repetitora αp određuje se temeljem dijagrama na slici 15, parametri na dijagramu su:

$$\begin{aligned} a &= \sqrt{a^2} \\ b &= \sqrt{b^2} \end{aligned} \quad (6.7)$$

gdje je:

- a^2 efektivna površina manjega od pasivnih repetitora
 b^2 efektivna površina većega od pasivnih repetitora



Slika 15 – Prigušenje sprege dvaju blisko spregnutih pasivnih repetitora

Vrijednost $1/K^2$ na ordinati definirane su na slijedeći način:

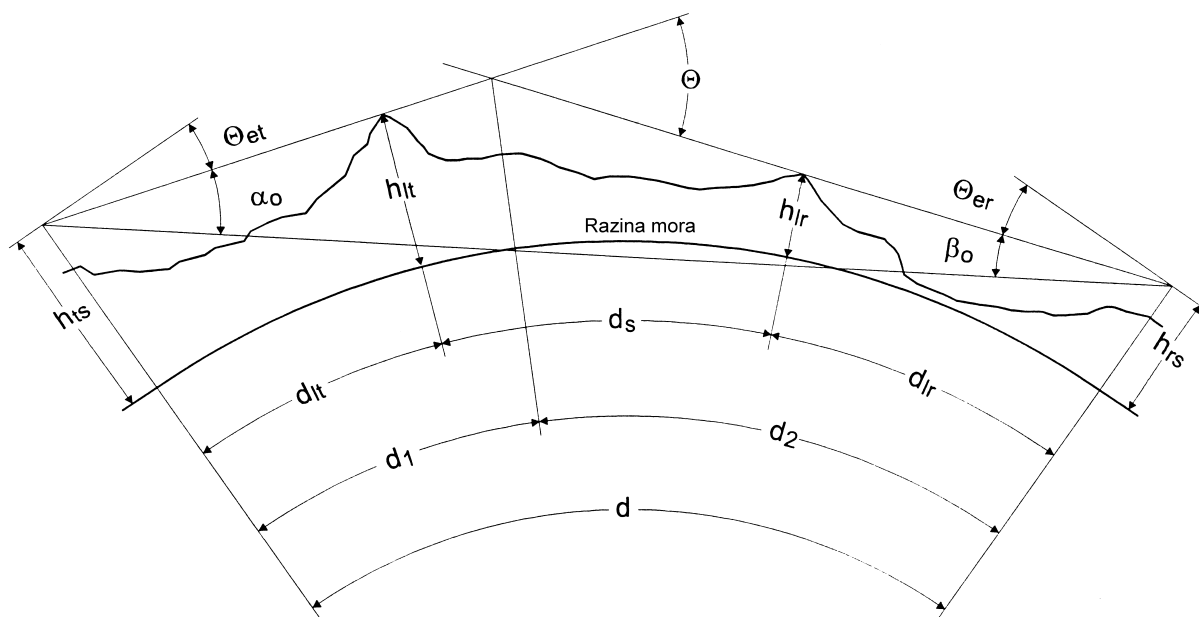
$$\frac{1}{K^2} = \frac{1 \cdot \lambda \cdot d}{a^2} \quad (6.8)$$

gdje je:

d udaljenost blisko spregnutih pasivnih repetitora
 λ valna duljina

7. PRIGUŠENJE DIFRAKCIJE

Izračun prigušenja difrakcije u slučaju zasjenjenja preprekama temelji se na geometriji preko-horizontne propagacije ilustrirane slikom 16.



Slika 16 – Geometrija preko-horizontne propagacije

h_{ts}	nadmorska visina antene prve postaje
h_{rs}	nadmorska visina antene druge postaje
d_{lt}	udaljenost od prve antene do horizonta
h_{lt}	nadmorska visina horizonta za prvu postaju
θ_{et}	kut elevacije horizonta za antenu prve postaje
d_{lr}	udaljenost od druge antene do horizonta
h_{lr}	nadmorska visina horizonta za drugu postaju
θ_{er}	kut elevacije horizonta za antenu druge postaje
d	duljina trase
θ	kut sjecišta zrâka koje tangiraju horizont (kut raspršenja)
d_1	udaljenost od prve antene do sjecišta zrâka
d_2	udaljenost od druge antene do sjecišta zrâka
d_s	udaljenost između horizonta prve i druge antene

Iz geometrijskih odnosa na slici 16 određuju se slijedeće:

Kutevi, u radijanima, elevacije Θ_{et} horizonta prve i elevacije Θ_{er} horizonta druge antene su:

$$\begin{aligned}\Theta_{et} &= \frac{h_{lt} - h_{ts}}{d_{lt}} - \frac{d_{lt}}{2 \cdot a} \\ \Theta_{er} &= \frac{h_{lr} - h_{rs}}{d_{lr}} - \frac{d_{lr}}{2 \cdot a}\end{aligned}\quad (7.1)$$

gdje je efektivni radijus Zemlje a produkt stvarnog radijusa ($a_0 = 6370$ km) i faktora radijusa Zemlje K . Alternativno, ovisnost o prizemnoj refraktivnosti N_s efektivni radijus Zemlje je:

$$a = \frac{a_0}{1 - 0.04665 \cdot e^{0.005577 \cdot N_s}} \quad (7.2)$$

Kutevi α i β izračunavaju se prema:

$$\begin{aligned}\alpha_0 &= \Theta_{et} + \frac{d}{2 \cdot a} + \frac{h_{ts} - h_{rs}}{d} \\ \beta_0 &= \Theta_{er} + \frac{d}{2 \cdot a} + \frac{h_{rs} - h_{ts}}{d}\end{aligned}\quad (7.3)$$

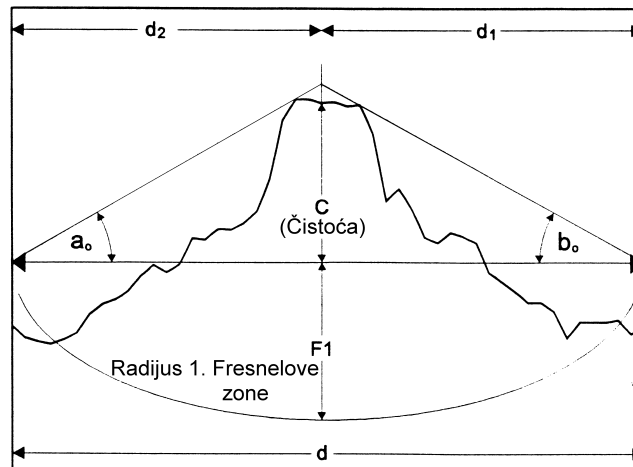
7.1 Kut raspršenja

Kut raspršenja Θ (*scatter angle, angular distance*) izračunava se prema:

$$\begin{aligned}\Theta &= \Theta_{et} + \Theta_{er} + \frac{d}{a} \\ \text{ili} \\ \Theta &= \alpha_0 + \beta_0\end{aligned}\quad (7.4)$$

Udaljenosti d_1 i d_2 od sjecišta zraka do prve, odnosno druge antene mogu se izračunati na slijedeći način:

$$\begin{aligned}d_1 &= \frac{d\beta}{\Theta} \\ d_2 &= \frac{d\alpha}{\Theta}\end{aligned}\quad (7.5)$$



Slika 16 – Definicija čistoće trase C

Ako su antene međusobno vidljive, C je pozitivan; u protivnom, C je negativan. Normalizirana čistoća trase je omjer C i radijusa prve Fresnel-ove zone:

$$\frac{C}{F1} = \frac{C}{17.3} \cdot \sqrt{\frac{f_{\text{GHz}} \cdot d}{d_1 \cdot d_2}} \quad (7.6)$$

C je u metrima, d , d_1 i d_2 su u km, definirani kao na slici 16.

Pored C , alternativno, kao mjera čistoće trase rabi se i V :

$$V = \sqrt{\frac{2 \cdot \tan(\alpha_0) \cdot \tan(\beta_0)}{\lambda}} \quad (7.7)$$

Za razliku od C , V je negativan za trase kod kojih su antene u međusobnoj vidljivosti. Vezu između V i C daje jednažba:

$$V = -\frac{C}{F1} \cdot \sqrt{2} \quad (7.8)$$

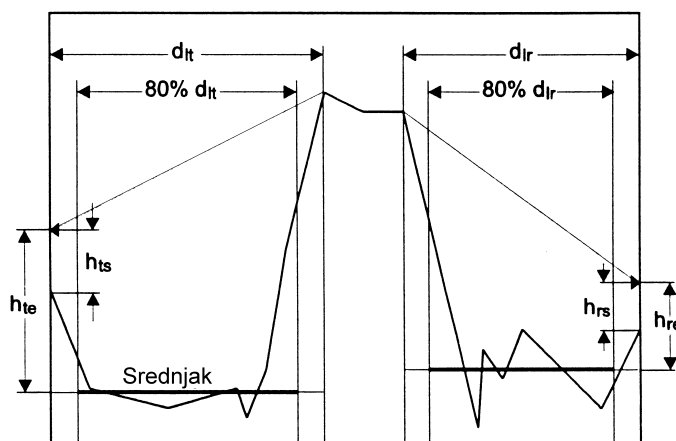
Treba uočiti da (7.8) vrijedi za trase sa jednom preprekom – u tom slučaju je horizont za obje antene na istome mjestu.

7.2 Efektivne visine antena

U programu se rabe dvije metode određivanja efektivne visine antena; efektivna visina u odnosu na srednju visinu antena i u odnosu na pravac najmanjeg kvadratnog odstupanja visina terena (LSQ – *Least Square Fit*).

7.2.1 Efektivna visina antene iznad srednje visine terena

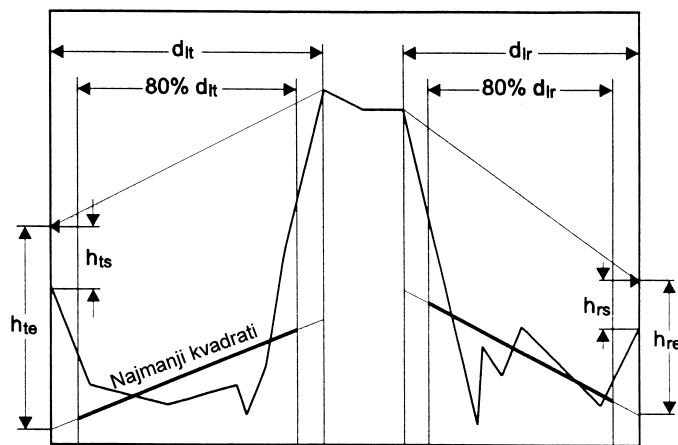
Na slici 17. vidljiva je definicija efektivne visine h_{te} prve i h_{re} druge antene iznad srednje visine terena 80% centralnog dijela trase između antene i pripadnog horizonta.



Slika 17 – Efektivna visina antene iznad srednje visine terena

7.2.2 LSQ efektivna visina antene

LSQ (*Least Squares Fit*) efektivna visina antene je visina iznad pravca najmanjeg kvadratnog odstupanja od stvarne visine terena na srednjih 80% udaljenosti od antene do njezinog horizonta – slika 18.



Slika 18 – LSQ efektivna visina antene

Dimenzije na slikama 17 i 18 su kako slijedi:

d_{lt}	udaljenost od prve antene do horizonta
d_{lr}	udaljenost od druge antene do horizonta
h_{ts}	visina prve antene nad tlom
h_{rs}	visina druge antene nad tlom
h_{te}	efektivna visina prve antene
h_{re}	efektivna visina druge antene

7.3 Fresnel-Kirchhoff difrakcija na oštrici (SKE)

Prigušenje Fresnel-Kirchhoff difrakcije $A(V,0)$ izračunava se iz:

$$\text{za } \dots -0.8 \leq V \leq 0$$

$$A(V,0) = 6.02 + 9.0 \cdot V + 1.65 \cdot V^2$$

$$\text{za } \dots 0 < V \leq 2.4$$

$$A(V,0) = 6.02 + 9.11 \cdot V - 1.27 \cdot V^2$$

$$\text{za } \dots V > 2.4$$

$$A(V,0) = 12.953 + 20 \cdot \log(V)$$

(7.9)

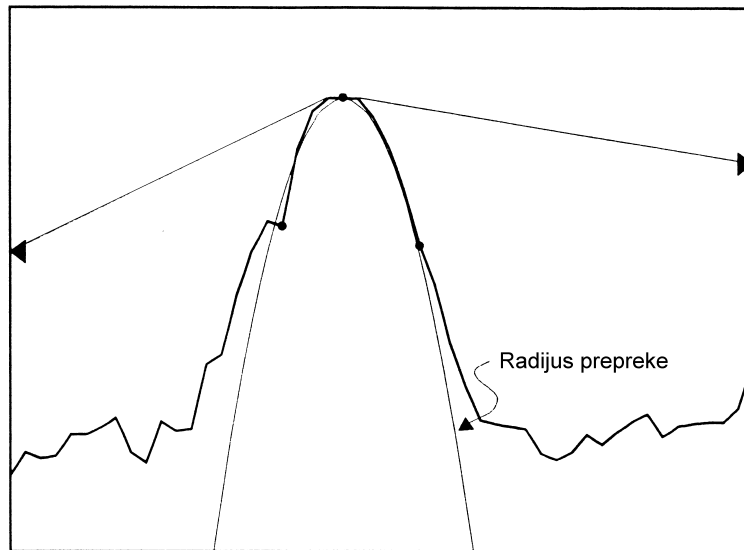
Iz (7.9) je vidljivo da je za $V < -0.8$ prigušenje 0. Odgovarajuća vrijednost C/F1 iz (7.8) je 56.57%. Taj postotak se često zokružuje na 60% kao minimalni kriterij za postizanje uvjeta propagacije u slobodnom prostoru.

7.4 Prigušenje difrakcije na samostalno prepreci (ISOL)

Prepreka oblika oštrice ne susreće se u praksi, te se za slučaj jedne samostalne prepreke (ISOL – *Isolated Obstacle Diffraction Loss*) prigušenje (7.9) modificira zbog konačnog radijusa R njezina vrha:

$$\begin{aligned}
 A(V, \rho) &= A(V, 0) + A(0, \rho) + U(V \cdot \rho) \\
 A(0, \rho) &= 6.02 + 5.556 \cdot \rho + 3.148 \cdot \rho^2 + 0.256 \cdot \rho^3 \\
 \text{za } \dots V \cdot \rho &\leq 3 \\
 U(V \cdot \rho) &= 11.45 \cdot V \cdot \rho + 2.19 \cdot (V \cdot \rho)^2 - 0.206 \cdot (V \cdot \rho)^3 - 6.02 \\
 \text{za } \dots 3 < V \cdot \rho &\leq 5 \\
 U(V \cdot \rho) &= 13.47 \cdot V \cdot \rho + 1.058 \cdot (V \cdot \rho)^2 - 0.048 \cdot (V \cdot \rho)^3 - 6.02 \\
 \text{za } \dots V \cdot \rho &> 5 \\
 U(V \cdot \rho) &= 20 \cdot V \cdot \rho - 18.2 \\
 \rho &= 0.676 \cdot R^{\frac{1}{3}} \cdot f_{\text{MHz}}^{-\frac{1}{6}} \sqrt{\frac{d}{d_1 \cdot d_2}}
 \end{aligned} \tag{7.10}$$

R radijus zakrivljenosti prepreke može se odrediti prema slici 19.



Slika 19 – Radijus zakrivljenosti prepreke

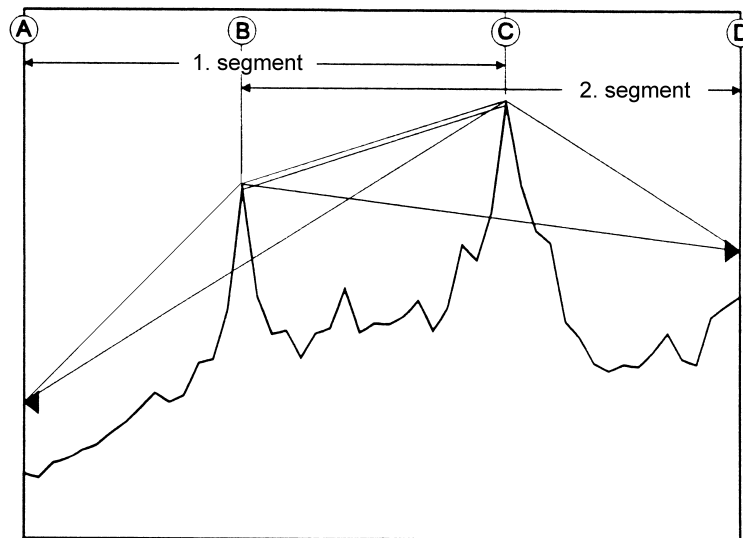
Centralna točka za određivanje radijusa uzima se na sjecištu zraka od svake od antena i horizonta. Preostale dvije točke određuje nagib terena.

Izračun prigušenja prema (7.10) valjan je samo za prepreku u dalekom polju antene. To se, za prepreku na udaljenosti d_{lt} ili d_{lr} , provjerava prema:

$$\begin{aligned}
 h \cdot \frac{2 \cdot \pi}{\lambda} \cdot \left(\frac{\lambda}{\pi \cdot R} \right)^{\frac{1}{3}} &\ll 1 \\
 h &= \sqrt{d_1^2 + R^2} - R
 \end{aligned} \tag{7.11}$$

7.5 Prigušenje difrakcije na višestrukim oštrim preprekama

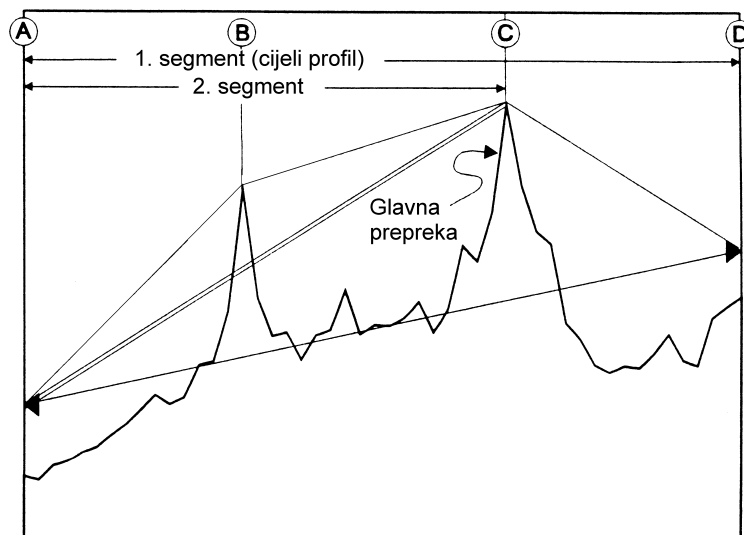
Nepravilni profil zemljišta može se analizirati kao serija oštih prepreka (MKE – *Multiple Knife Edge*). Koriste se Epstein-Peterson i Deygout metoda. Primjena Epstein-Peterson metode na dvostruku oštru prepreku (DKE – *Double Knife Edge*) prikazana je slikom 20.



Slika 20 – Epstein-Peterson metoda

Difrakcijsko prigušenje za svaku prepreku određuje se za segment profila određen njezinim horizontom. Prigušenje prepreke na mjestu "B" na slici 20 računa se za trasu od "A" do "C" i prigušenje prepreke na mjestu "C" računa se za trasu od "B" do "D". Ukupni broj oštih prepreka nije ograničen, ali se najbolji rezultati postižu za široko razmaknute oštre prepreke.

Metoda Deygout ograničena je na trase sa dvije oštre prepreke. Primjer je na slici 21.



Slika 21 – Deygout metoda

Prvo se prema (7.8) izračunava parametar V za obje prepreke računato za cjelokupnu trasu. Temeljem toga određuje se kao dominantna prepreka ona koja ima veći tako određeni V – prepreka na mjestu "C" na slici 21. Nakon toga se računa prigušenje difrakcije za glavnu prepreku za cijelu trasu, te za sporednu prepreku za segment trase od "A" do "C". Najbolji rezultati postižu se za relativno bliske prepreke.

7.6 Difrakcija na efektivnoj oštroj prepreci (EFFKE)

Difrakcijsko prigušenje na iregularnom profilu može se odrediti prema slici 18. Na mjestu sjecišta zraka koje idu od svake od antena i pripadajućih horizonata locira se fiktivna oštra prepreka za koju se izračuna prigušenje prema (7.9).

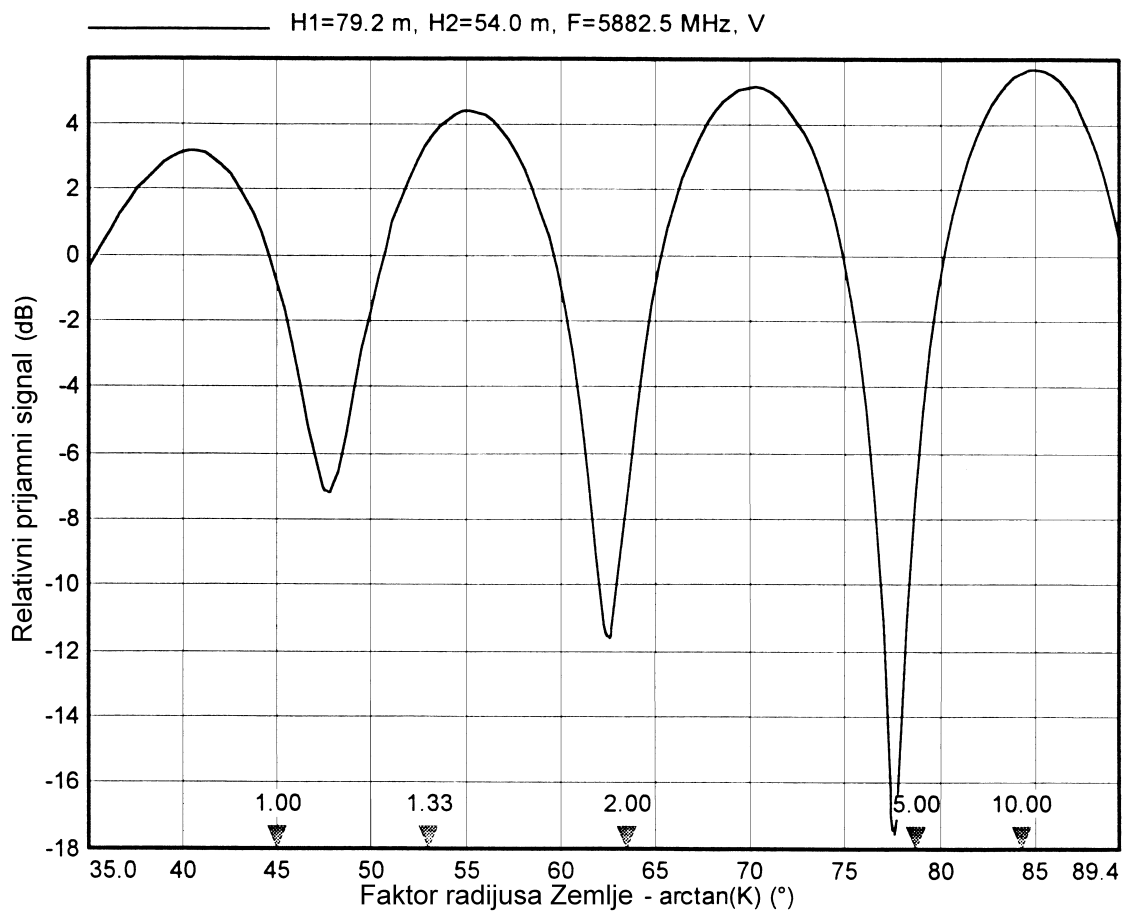
7.7 Prosječna difrakcija

Difrakcijsko prigušenje tipičnog brda prekrivenog šumom ovisi jedino o omjeru $C/F1$. Izračunava se na slijedeći način:

$$A = 90 - 19.7 \cdot \left(\frac{C}{F1} + 4 \right) \quad (7.12)$$

8. PRIGUŠENJE USLIJED REFLEKSIJE

Ravna površina na profilu radio-trase može uzrokovati refleksiju EM vala u kojem slučaju do prijamne antene dopijevaju i direktna i reflektirana zraka. Budući da se amplitude zbrajaju vektorski, prijamni signal može biti jači ili slabiji u odnosu na situaciju u kojoj nema refleksije. Na slici 22 može se vidjeti, za trasu sa refleksijom, ovisnost razine prijamnog signala o faktoru radijusa Zemlje.



Slika 22 – Prijamna razina uz refleksiju

Očito, neke veličine faktora radijusa Zemlje mogu uzrokovati znatno prigušenje ili gubitak prijamnog signala.

8.1 Optika dvije zrake

Proračun prigušenja uslijed refleksije temelji se na zakonima optike – prijamni signal rezultat je vektorskog zbrajanja direktnoga i reflektiranog signala.

Amplituda reflektiranog signala ovisi o:

- teorijskom koeficijentu refleksije,
- neravnosti terena,
- divergenciji uslijed zakrivljenosti Zemlje,
- pokrovu refleksijske površine,
- dopunskom prigušenju između točke refleksije i antene,
- diskriminaciji reflektiranog signala dijagramom zračenja antene.

Fazna razlika direktnog i reflektiranog signala ovisna je o:

- razlici prevaljenih puteva direktne i reflektirane zrake
- faznom pomaku kod refleksije

Prijamni signal, ovisno o koeficijentu refleksije R , razlici puteva i faznoj razlici direktne i reflektirane zrake, biva prigušen za A (dB):

$$A = 10 \cdot \log \left[1 + R^2 - 2 \cdot R \cos \left(\frac{2\pi\Delta r}{\lambda} - C_{h,v} \right) \right] \quad (8.1)$$

gdje je

R	koeficijent refleksije
λ	valna duljina
Δr	razlika prevaljenih puteva direktne i reflektirane zrake
$\pi - C_{v,h}$	fazni pomak kod refleksije (za horizontalnu ili vertikalnu polarizaciju)

Jednadžba (8.1) valjana je za frekvencije iznad 30 MHz, uz dovoljnu čistoću trase. U protivnom daje nerealno velika prigušenja.

8.1.1 Teorijski koeficijent refleksije

Teorijski koeficijent refleksije je kompleksni broj ovisan o:

- frekvenciji,
- polarizaciji,
- upadnom kutu,
- relativnoj dielektričnoj konstanti refleksijske površine,
- površinskoj vodljivosti refleksijske površine.

Magnituda koeficijenta refleksije R_h za horizontalnu i R_v za vertikalnu polarizaciju, te fazni pomak $(\pi - C_v)$ i $(\pi - C_h)$, izračunavaju se na slijedeći način:

$$x = 1.80 \cdot 10^4 \cdot \frac{\sigma}{f_{\text{MHz}}}$$

$$q = \frac{x}{2 \cdot p}$$

$$2p^2 = \sqrt{(\epsilon - \cos^2 \Psi)^2 + x^2} + (\epsilon - \cos^2 \Psi)$$

$$b_v = \frac{\epsilon^2 + x^2}{p^2 + q^2}$$

$$\begin{aligned}
b_h &= \frac{1}{p^2 + q^2} \\
m_v &= \frac{2(p\varepsilon + qx)}{p^2 + q^2} \\
m_h &= \frac{2p}{p^2 + q^2} \\
R_v^2 &= \frac{1 + b_v \sin^2 \Psi - m_v \sin^2 \Psi}{1 + b_v \sin^2 \Psi + m_v \sin^2 \Psi} \\
R_h^2 &= \frac{1 + b_h \sin^2 \Psi - m_h \sin^2 \Psi}{1 + b_h \sin^2 \Psi + m_h \sin^2 \Psi} \\
\pi - C_v &= \tan^{-1} \left(\frac{x \sin \Psi - q}{\varepsilon \sin \Psi - p} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{x \sin \Psi + q}{\varepsilon \sin \Psi + p} \right) \\
\pi - C_h &= \tan^{-1} \left(\frac{-q}{\sin \Psi - p} \right) - \tan^{-1} \left(\frac{q}{\sin \Psi + p} \right)
\end{aligned} \tag{8.2}$$

gdje su

ε relativna dielektrička konstanta
 ρ površinska vodljivost
 Ψ upadni kut u radijanima

Fazni pomak pri refleksiji kod većine realnih trasa je 180° , ako se upadni kut približi Brewster-ovom kutu u području 5° do 11° fazni pomak skokovito mijenja predznak. Značajke nekih tipova tla daje tabela 3.

Tabela 3 – značajke tla

Tip tla	vodljivost σ (mS/m)	Relativna dielektrička konstanta ε
siromašna suha zemlja	0.001	4
prosječno tlo	0.005	15
bogato, vlažno tlo	0.020	25
morska voda	5.000	81
slatka voda	0.010	81

8.2 Utjecaj neravnosti terena

Magnituda teorijskog koeficijenta refleksije prema (8.2) određena je uz pretpostavku ravne površine u području refleksije, u kojem je slučaju tipični $R_{h,v}$ u granicama od 0.9 do 0.99. Refleksija na takvoj površini rezultira dubinama nula (slika 22) od 20 do 40 dB. Naravno, osim u slučaju vodene površine, površina Zemlje nije glatka, pa se iz (8.2) određuje efektivni koeficijent refleksije:

$$R_e = R_{h,v} \cdot e^{-\left(0.6 \cdot \sin \Psi \cdot \frac{\Delta h}{\lambda}\right)} \tag{8.3}$$

gdje je

R_e efektivni koeficijent refleksije
 λ valna duljina
 Δh neravnost terena
 Ψ upadni kut u radijanima

Treba zamjetiti da utjecaj neravnosti terene ovisi o sinusu upadnog kuta. Neravnost terena definirana je u (2.10). Za trase iznad vodene površine neravnost je nula.

8.3 Divergencija

Divergencija je definirana kao raspršenje reflektiranih zraka zbog zakrivljenosti Zemlje. Učinak divergencije je umjerena redukcija magnitude koeficijenta refleksije pri malim veličinama faktora radijusa Zemlje K . Ako K postane negativan, divergencija postaje konvergencija i magnituda koeficijenta refleksije se uvećava.

Faktor divergencije množi magnitudu faktora refleksije – $R = DR_e$.

Faktor divergencije izračunava se prema:

$$D = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{2 \cdot d_1 \cdot d_2}{K \cdot a \cdot d \cdot \tan \Psi}}} \quad (8.4)$$

gdje je

d_1	udaljenost prve antene do točke refleksije
d_2	udaljenost druge antene do točke refleksije
d	duljina trase
a	radijus Zemlje
K	faktor radijusa Zemlje
Ψ	upadni kut

8.4 Utjecaj pokrova tla

Drveće i vegetacija na području refleksije mogu znatno reducirati amplitudu reflektiranog signala i time umanjiti varijacije razine prijemnog signala. U tabeli su navedene približna prigušenja različitih tipova vegetacije.

Pokrov tla	Prigušenje
voda, pustinja	0 do 1 dB
polja sa niskom vegetacijom ili travom	1 do 3 dB
visoka trava ili više grmlje	3 do 6 dB
šumovita područja, uključujući i drveće uz ceste okomite na radio-trasu	8 do 15 dB

8.5 Čistoća trase za reflektiranu zraku

U slučaju prepreka unutar 60% prve Fresnel-ove zone radio-trase reflektiranog signala pojavljuje se dodatno difrakcijsko prigušenje tog signala. Veličina prigušenja određuje se prije opisanim postupcima.

8.6 Diskriminacija dijagramom zračenja

Ako postoji dovoljna usmjerenost antene, odnosno dovoljno velika razlika kuteva direktne i reflektirane zrake, može se računati na dopunsko prigušenje reflektiranog signala. Diskriminacija dijagramom zračenja može se odrediti prema:

$$\text{za } \dots \Theta \leq bw$$

$$u = \sqrt{\frac{1.0 + \cos\left(\frac{\pi \cdot \Theta}{bw}\right)}{2}}$$

za ... $\Theta > bw$

$$u = \frac{\sin\left(\frac{bw}{2}\right)}{\sqrt{2} \cdot \sin(\Theta)} \quad (8.5)$$

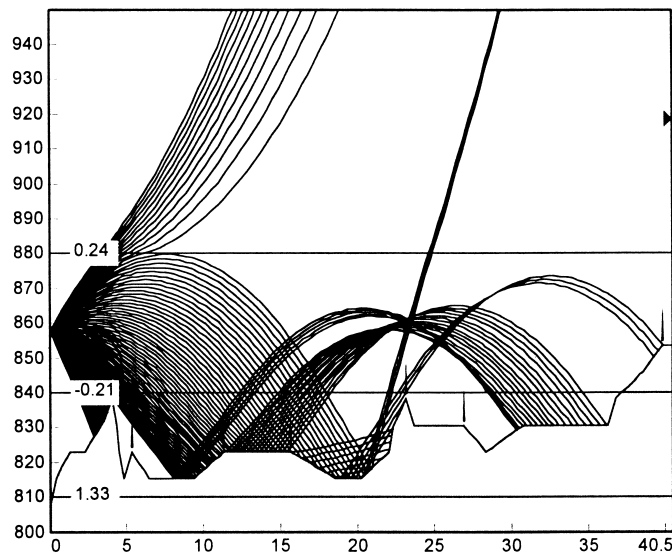
gdje je

- u diskriminacija dijagramom zračenja ($U_{dB} = 20 \log u$)
- Θ kut u radijanima između direktne i reflektirane zrake
- bw širina snopa zračenja između točaka -3 dB

Pretpostavlja se optimalna orijentacija antena, poglavito po elevaciji, za faktor radijusa Zemlje $K = 4/3$. Kod većih vrijednosti K , snop će biti spušten što dovodi do umanjenja diskriminacije dijagramom zračenja.

9. VIŠESTRUKA PROPAGACIJA

Jedan od uzroka znakovitog fading-a može biti postojanje, u atmosferi, vertikalnog gradijenta indeksa refrakcije. Tada, uslijed anomalijске propagacije, do prijamne antene uopće ne mora dospjeti signal ili može dospjeti nekoliko reflektiranih signala (slika 23).



Slika 23 – Anomalijска propagacija uslijed gradijenta refrakcije

9.1 Reprezentacija radijusa Zemlje

U slučaju kratke radio-trase (u odnosu na radijus Zemlje), koristi se reprezentacija zakrivljenosti Zemlje parabolom:

$$h = -\frac{\gamma}{2} \cdot d^2 \quad (9.1)$$

$$\gamma = \frac{1}{a}$$

gdje je

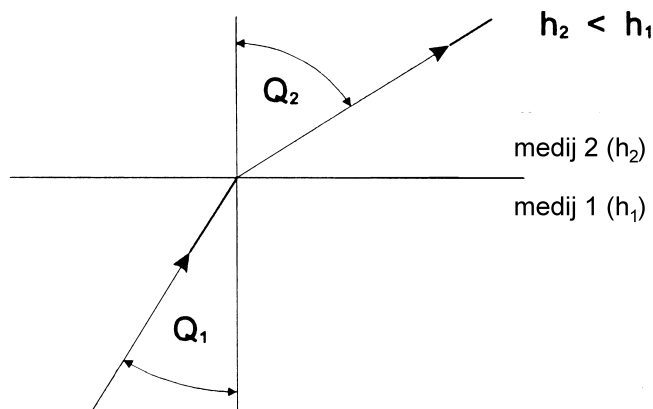
- h nadmorska visina
- d udaljenost antena
- γ zakrivljenost Zemlje
- a radijus Zemlje (6375 km)

Putanja elektromagnetskog vala u atmosferi određena je, pored ostalog, vertikalnim gradijentom indeksa refrakcije. U normalnim uvjetima propagacije gustoća atmosfere jednoliko opada sa visinom, pa se zrake radio-valova "savijaju" prema gušćem mediju. To znači da je u normalnim uvjetima radijus Zemlje za elektromagnetsko zračenje veći od stvarnog. Ako se u (9.1), radijus a zamijeni efektivnim radijusom Zemlje Ka , putanja radio-valova može se prikazati ravnom crtom. Naravno, ovo je valjano samo uz konstantni vertikalni gradijent indeksa refrakcije i za radio trase do 1000 metara iznad Zemljine površine.

Koncept efektivnog radijusa Zemlje pojednostavljuje temeljnu geometriju radio-trase. Parametri poput upadnog kuta i čistoće trase izračunavaju se metodama planarne geometrije. Program *Pathloss* rabi slijedeće parametre zasnovane na modelu efektivnog radijusa Zemlje.

9.1.1 Refrakcija

U skladu sa Snell-ovim zakonom, EM val se pri prolasku granice dva medija različitih indeksa refrakcije lomi u smjeru medija većeg indeksa (slika 24).



Slika 24 – Lom na granici dva medija

Snell-ov zakon daje kutove loma:

$$\eta_1 \cdot \sin(\Theta_1) = \eta_2 \cdot \sin(\Theta_2) \quad (9.2)$$

gdje je indeks refrakcije η omjer brzine svjetlosti u vakumu i u predmetnom mediju. Indeks refrakcije atmosfere ne prelazi 1.00045 na razini mora. Zbog praktičnosti, često se rabi refraktivnost izražena u "N" jedinicama, definirana kao:

$$N = (\eta - 1) \cdot 10^6 \quad (9.3)$$

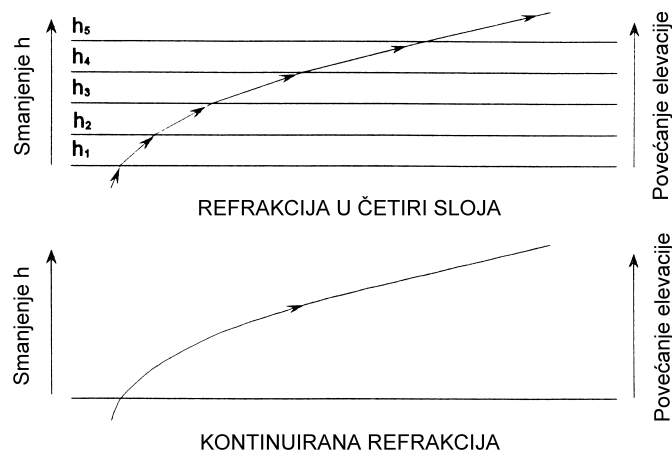
Refraktivnost u atmosferi za radio-frekvencije do 30 GHz dana je sa:

$$N = 77.6 \cdot \frac{\rho}{T} + 3.73 \cdot 10^5 \frac{\varepsilon}{T^2} \quad (9.4)$$

gdje je

ρ	atmosferski tlak u milibarima
ε	parcijalni tlak vodene pare u milibarima
T	apsolutna temperatura u K

Normalno, sve tri veličine padaju sa porastom visine. Propagacija EM vala kroz horizontalno stratificirani sloj atmosfere indeksa refrakcije η_1 do η_2 , može se vidjeti na slici 25.

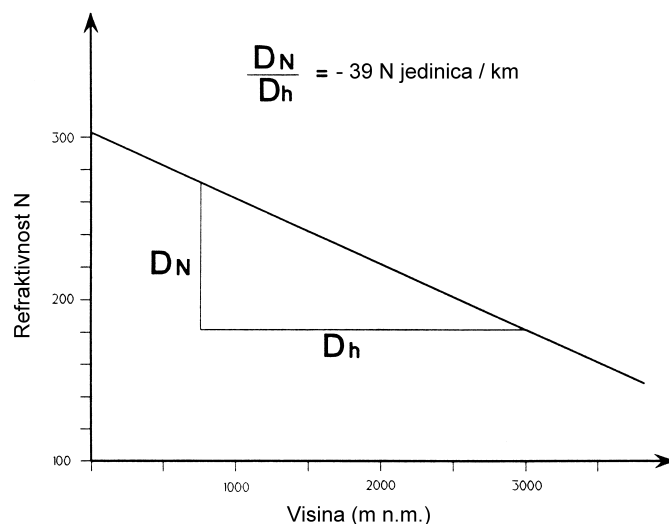


Slika 25 – Refrakcija u atmosferi

9.1.2 Gradijent refrakcije

Gradijent refrakcije je nagib krivulje ovisnosti refraktivnosti o visini:

$$\text{GRADIJENT REFRAKCIJE} = \frac{\Delta N}{\Delta h} \quad (9.5)$$



Primjer konstantnog gradijenta refraktivnosti kod kojeg vladaju normalni uvjeti propagacije može se vidjeti na slici 26.

Slika 26 – Konstantni gradijent refraktivnosti

9.2 Algoritam praćenja zrâka

Program *Pathloss* izračun prigušenja višestruke propagacije izvodi algoritmom praćenja zrâka, bazirano na slijedećim pretpostavkama:

- Atmosfera se, po visini, može podjeliti u horizontalne slojeve. Gradijent refraktivnosti unutar svakog sloja je konstantan.
- Varijacije refraktivnosti duž i poprijeko na trasu su zanemarive.

Unutar svakog sloja EM val slijedi paraboličnu putanju prema:

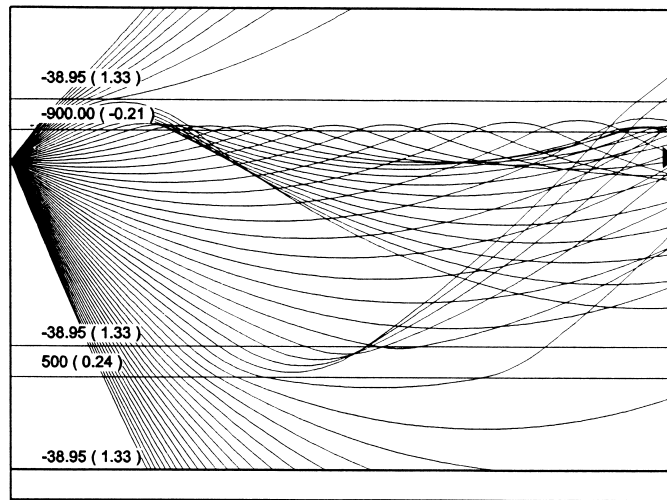
$$y = a + m \cdot x - \frac{\gamma}{2} \cdot x^2 \quad (9.6)$$

$$\gamma = \frac{\Delta N}{\Delta h} + 157$$

Konstante a i m u (9.6) određene su početnim uvjetima: a je jednako visini antene, dok je nagib m određen elevacijskim kutom antene.

9.2.1 Fading višestruke propagacije

Utjecaj refrakcije na radio-trasi duljine 65 km, uz zanemarenje možebitnih refleksija, može se vidjeti na slici 27.

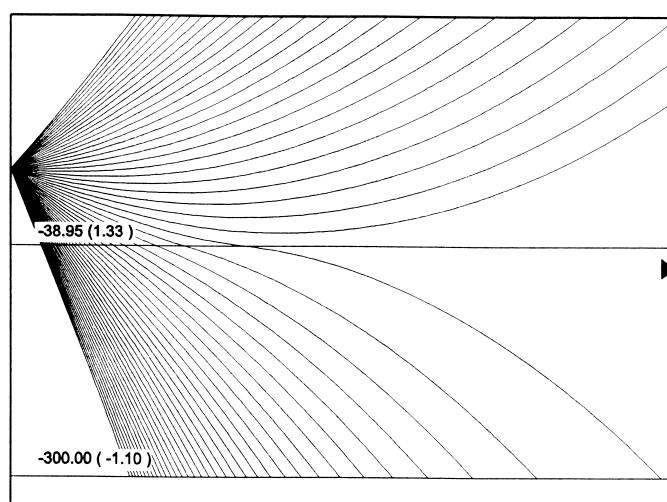


Slika 27 – višestruka propagacija

Vidljivo je da se odašiljačka antena nalazi iznad sloja umanjene refrakcije i ispod sloja uvećane refraktivnosti. Direktna zraka prolazi između tih slojeva i do prijamne antene dolazi pravocrtno. Zrake izračene s pozitivnim elevacijskim kutom dosižu gornji sloj povećane refraktivnosti i bivaju savinute prema dolje. U nižim slojevima te zrake bivaju savinute prema gore, tako da neke od njih dopijevaju do mjesta prijama. Zrake izračene pod negativnim kutovima elevacije dopijevaju u sloj umanjene refraktivnosti tako da bivaju savinute prema gore. To ima za posljedicu dolazak do prijamne antene najmanje tri signala (i više ako se uvažava i refleksije). Budući da pojedine zrake prelaze putove raličitih duljina, na mjestu prijama mogu se zbrajati konstruktivno ili destruktivno. Već i manje promjene atmosferskih uvjeta uzrokuje drastične promjene razine prijamnog signala – pojavljuje se duboki kratkotrajni fading višestruke propagacije.

9.2.2 Inverzija

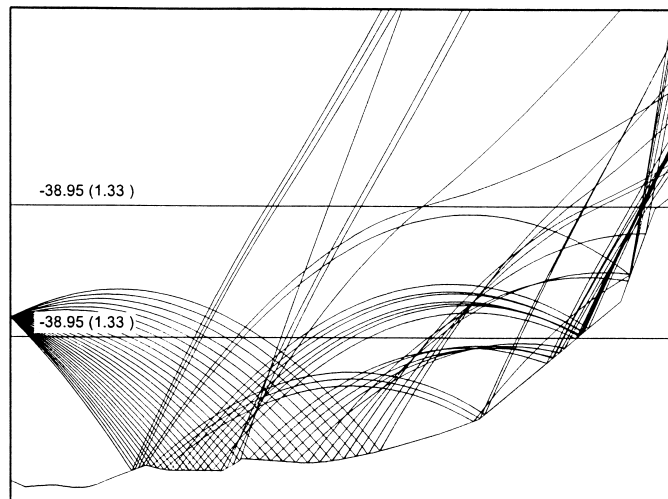
Na slici 28 vidljiv je primjer propagacije u uvjetima atmosferske inverzije.



Slika 28 – Atmosferska inverzija

U primjeru na slici zrake izračene u jednom segmentu elevacijskih kuteva bivaju savinute prema gore, dok preostale se savijaju prema dolje, tako da do prijamne antene signal ne dolazi. Ovaj tip fading-a naziva se radio-rupa (*radio hole*).

Na slici 29 vidljiv je utjecaj inverzije uz postojanje refleksije.



Slika 29 – Refleksija uz postojanje inverzijskog sloja

U pretpostavku inicijalne orijentacije antene za prosječne uvjete propagacije ($K = 4/3$), tijekom inverzije do antene prijarnika će dospjeti samo zrake jednom ili više puta reflektirane od tla.