

ORGANIZACIJA RADIJSKIH ZVEZ V PREDORIH

Organization of radio communications in tunnels

Boštjan Tavčar*, Alenka Švab Tavčar** UDK 621.396.945

Povzetek Abstract

Članek opisuje problematiko radijskih zvez v predorih. Na začetku so opisane osnovne značilnosti razširjanja radijskega signala s poudarkom na slabljenju, presihu in istokanalnem motenju. Opisana je uporaba neposrednih radijskih zvez z vsemi pastmi, ki jih prinaša. Na koncu je opisan sistem predorskega radia.

The article describes problems of radio communications in tunnels. The basic features of the propagations of radio signals are described. The stress is on path-losses, multipath fading and co-channel interference. The use of direct radio communication with all traps is described. The system of tunnel radio is described at the end of the article.

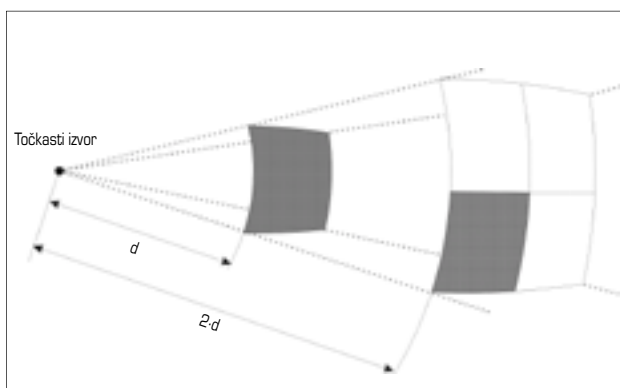
Splošno o radijskih zvezah

Razširjanje radijskega valovanja v praznem in neomejenem prostoru

Radijsko valovanje se v praznem in neomejenem prostoru širi v obliki krogelnega vala, ki se enakomerno razširja od izvora v vse smeri. Moč radijskega valovanja pada s kvadratom oddaljenosti od izvora, kar je simbolično prikazano na sliki 1.

Slabljenje valovanja ponavadi izrazimo v decibelih [dB]. V našem primeru narašča slabljenje z dvajsetimi decibeli na dekado razdalje (20 dB/dec), kar ponazarja spodnja enačba.

$$a_0(d) = -147.56 + 20 \cdot \log(d) + 20 \cdot \log(f) \quad (\text{dB})$$



Slika 1. Razširjanje radijskega valovanja v praznem in neomejenem prostoru

Figure 1. Propagation of radio waves in an empty, unrestricted space

Prostor okoli nas večinoma ni prazen, tako da na razširjanje radijskega valovanja vplivajo tudi drugi dejavniki, predvsem odboj, lom, razpršitev, absorpcija in drugo. Vsi ti dejavniki povzročajo izrazitejšo padanje moči radijskega signala z razdaljo in presih.

Razširjanje radijskega valovanja v predorih

Razširjanje radijskega valovanja v predorih lahko opišemo z determinističnimi ali empiričnimi matematičnimi modeli.

Deterministični modeli temeljijo na osnovnih fizikalnih mehanizmih razširjanja radijskega vala. Najpogosteje temeljijo na tako imenovanem žarkovnem modelu, po katerem izračunamo vse možne poti radijskega valovanja med oddajnikom in sprejemnikom. Moč signala pri sprejemniku je superpozicija vseh radijskih valovanj, ki pridejo do sprejemnika. Deterministični modeli so teoretično uporabni v različnih okoljih. Njihova največja težava je v tem, da potrebujemo natančne podatke o geometriji prostorov in elektromagnetnih lastnostih sten v prostoru. To in dejstvo, da prostori običajno niso prazni, na splošno močno zmanjšuje njihovo uporabno vrednost.



Slika 2. Oblike prerezov predorov in odboji v predorih (Didascalu, 2000)

Figure 2. Forms of cross-section of tunnels and reflection in tunnels (Didascalu, 2000)

* Ministrstvo za obrambo, Uprava Republike Slovenije za zaščito in reševanje, Vojkova 61, Ljubljana, bostjan.tavcar@urszr.si

** Ministrstvo za notranje zadeve, Policija, Štefanova 2, Ljubljana, alenka.svab@policija.si

Vendar so v predorih uporabni zaradi relativno dobro predvidljive in poznane geometrije predorov in poznanih lastnosti sten v njih.

Empirični modeli temeljijo na izkušnjah in meritvah radijskega signala v konkretnih prostorih. Model za konkretni prostor določimo tako, da se čim bolj prilega izmerjenim rezultatom. Primer empiričnega modela je »Log-Distance Path Loss Model«. Model lahko zapišemo z naslednjo enačbo:

$$a(d) = a_0(d_0) + N \cdot 10 \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X\sigma \quad (dB)$$

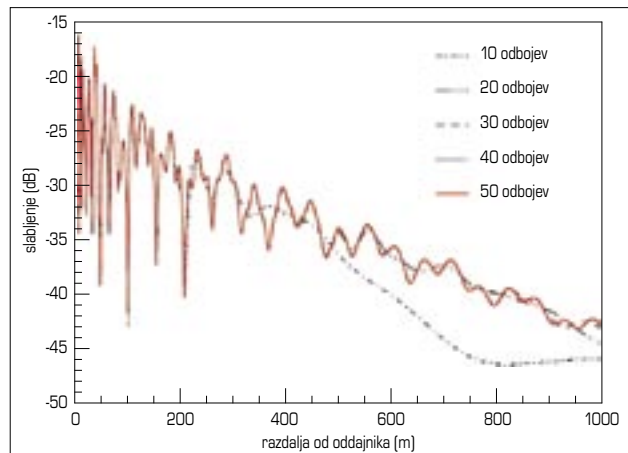
$a_0(d_0)$ so izgube na referenčni oddaljenosti, ponavadi so to izgube v praznem prostoru na razdalji 1 m, N je eksponent naraščanja izgub z razdaljo, $X\sigma$ zvezna slučajna spremenljivka Gausove gostote verjetnosti [dB].

Presih radijskega valovanja

Presih je posledica različnih poti in odbojev radijskega vala na poti. Na sprejemniku se zato namesto enega samega radijskega vala pojavi več različic istega vala, ki so potovale po različnih poteh. Radijski valovi se v sprejemniku združijo tako, da se v najboljšem primeru med seboj seštejejo, v najslabšem odštejejo. Vse skupaj se ponavadi dogaja zelo dinamično in ima za posledico nihanje moči signala, kar imenujemo presih.

Stene predorov zaradi svoje oblike in kovinske armature omogočajo raznovrstne odboje, zato je v predorih presih še posebej izrazit. Poleg direktnega radijskega vala med dvema postajama se pojavlja še množica odbitih valov, ki se med seboj in z direktnim valom ponavadi delno seštevajo in odštejejo. To povzroči nihanje moči radijskega signala.

Ob predpostavki, da je stena predora idealna in pravilnih oblik, lahko matematično določimo vse možne odbite valove in simuliramo primer radijske zveze v predoru.



Slika 3. Nihanje moči signala v predoru zaradi presiha (Didascalu, 2000)
Figure 3. Signal strength variation in a tunnel because of fading (Didascalu, 2000)

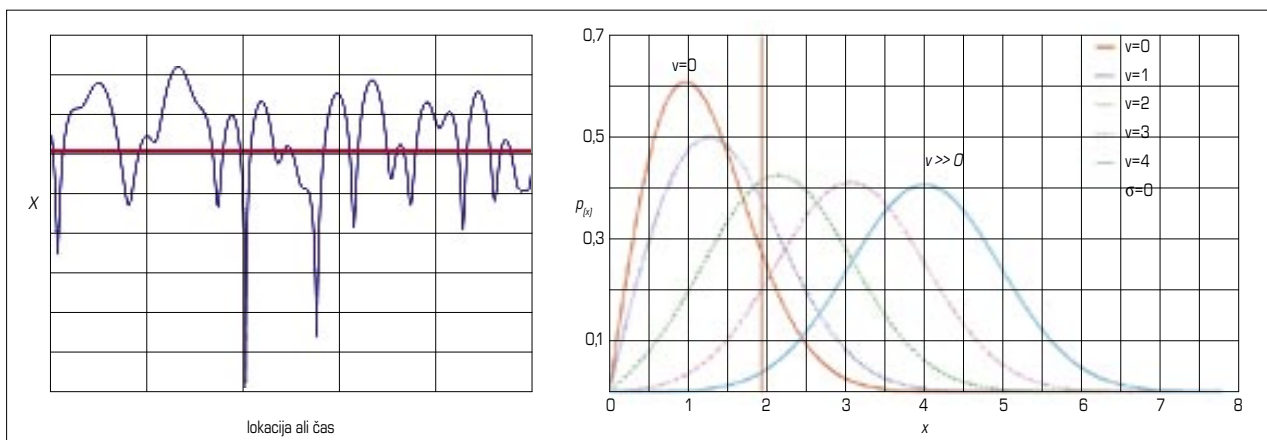
Simulacija presiha z od deset do petdeset odboji je prikazana na sliki 3.

Presih lahko določamo tudi statistično. Kadar imamo poleg neposrednega vala prisotnih še veliko odbitih valov, sledi moč radijskega signala tako imenovani Ricianovi statistični porazdelitvi gostote verjetnosti. Kadar je neposredni val še posebej izrazit, $v \gg 1$ preide Ricianova statistična porazdelitev gostote verjetnosti v Gaussovo. To je v primeru bližnjih zvez. V zakrivljenih delih predora, ko sprejemamo samo odbite valove $v = 0$, preide v Rayleighovo statistično porazdelitev gostote verjetnosti.

Tipično se presih giblje v mejah od 10 do 20 dB.

Bilanca radijske zveze

Signal, ki ga oddaja radijska postaja, doživi na svoji poti različna slabljenja. V predorih lahko za izračun slabljenja signala na krajših razdaljah uporabimo model za slabljenje v praznem in neomejenem prostoru kar pomeni,



Slika 4. Presih in Ricianova statistična porazdelitev gostote verjetnosti moči signala
Figure 4. Rician's probability density function of signal strength

da moč signala pada z -20 dB/dec, na večjih razdaljah pa »Log-Distance Path Loss Model« model. K temu slabljenju je potrebno dodati še slabljenje zaradi presiha in slabljenja pri uporabi radijskih postaj. Poleg najmanjšega predvidenega presiha -10 dB moramo upoštevati še:

- dobitok antene ročne radijske postaje, ki je -13 dB,
- izgube pri uporabi radijske postaje v višini glave pri navpični anteni, ki so -6 dB,
- izgube pri uporabi radijske postaje v višini glave pri poševni anteni, ki so -10 dB,
- izgube pri uporabi radijske postaje za pasom, ki so -17 dB.

Ob upoštevanju občutljivosti analognih radijskih postaj, ki je značilno -117 dBm, in oddajno moč, ki je značilno 30 dBm, lahko izračunamo zahtevano raven radijskega signala pri običajni uporabi radijske postaje, ki je okoli 40 dB μ V/m.

Uporaba neposrednih radijskih zvez v predorih

Pri uporabi radijskih zvez v predorih moramo upoštevati dve posebnosti, ki bistveno vplivata na uporabo radijskih zvez:

- uporabniki radijskih postaj so praviloma blizu skupaj,
- poleg prevladujočega neposrednega radijskega signala imamo še veliko število odbitih radijskih signalov.

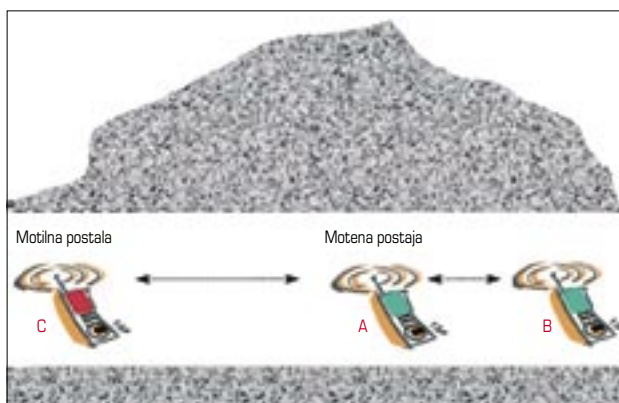
Na kratkih razdaljah do približno 100 m lahko uporabimo model za širjenje radijskega signala v praznem prostoru. Zato lahko pričakujemo padaje moči signala z 20 dB/dec. Poleg neposrednega radijskega signala prihaja še do velikega števila odbitih radijskih signalov, ki jih praktično ne moremo natančno napovedati. Tako nastali presih sledi Ricianovi porazdelitvi in se giblje v mejah od 10 do 20 dB.

Poleg slabljenja in presiha radijskega signala moramo upoštevati tudi medsebojno istokanalno motenje radijskih postaj. Medsebojno motenje je posebej izrazito takrat, ko so radijske postaje relativno blizu. Kadar oddajata dve radijski postaji na istem kanalu, bomo sprejemali tisto, katere signal bo močnejši. Za koliko mora biti koristni signal močnejši od motilnega, je odvisno od vrste radijskega sistema. Za posamezne sisteme velja:

Vrsta radijskega sistema	C/Ic [dB]
Analogne rad. postaje FM, 25kHz širina kanala	8 dB
Analogne rad. postaje FM, 12,5kHz širina kanala	12 dB
Digitalne rad. postaje FDMA (TETRAPOL)	15 dB
Digitalne rad. postaje TDMA (TETRA)	19 dB

Preglednica 1. Zahtevane razlike v moči koristnega in motilnega radijskega signala

Table 1. Required differences in strength of useful and jammed radio signal



Slika 5. Medsebojno motenje analognih radijskih postaj FM, 25 kHz pri neposrednih radijskih zvezah

Figure 5. Co-channel interference of analogue radio stations FM and 25 kHz in direct radio communications

Iz preglednice 1 vidimo, da so v najslabšem položaju sistemi TETRA, pri katerih mora biti razlika med koristnim radijskim signalom in motilnim radijskim signalom najmanj 19 dB v prid koristnega radijskega signala. Radijske postaje TETRA so zato bolj podvržene istokanalnemu motenju kakor analogne radijske postaje.

Predpostavimo, da se prek radijskih postaj v predoru pogovarjata reševalec A in reševalec B, ki sta si 16 m vsak sebi. Med njunim pogovorom tretji reševalec C po pomoti prične oddajati s svojo radijsko postajo. Ob upoštevanju slabljenja, ki je enako slabljenju v praznem prostoru, nam izračun pokaže, da bo začel motiti pogovor reševalca A, če bo od njega oddaljen manj kakor 40 m. Z zmanjševanjem razdalje med reševalcem A in reševalcem C bo motenje postajalo vse izrazitejše. Pri določeni razdalji pride celo do popolne blokade postaje A. Kolikšna je ta razdalja, je odvisno od presiha radijskega signala. Pri presihu -10 dB se to zgodilo pri razdalji, manjši od 12 m.

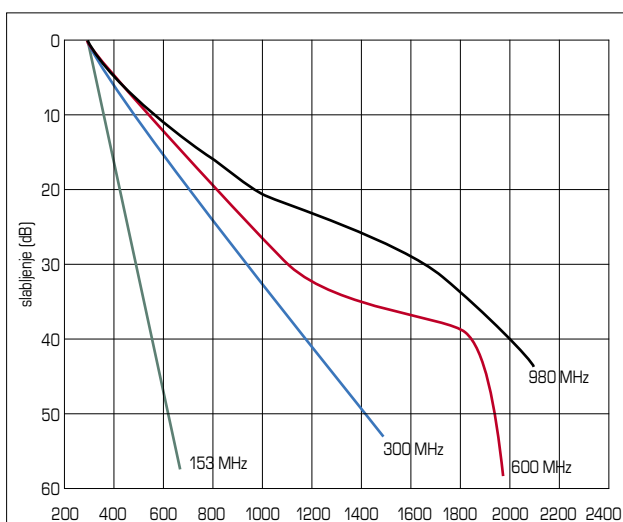
Iz primera vidimo, da lahko samo ena radijska postaja v predoru z nekontroliranim oddajanjem lahko blokira vse druge postaje in s tem prepreči radijske zveze med reševalci. To je nevarno predvsem glede varnosti posameznih reševalcev in glede reševanja.

Uporaba neposrednih radijskih zvez v predoru ni priporočljiva. Namesto neposrednih radijskih zvez je v predorih treba uporabljati sistem predorskega radia.

Predorski radio

Razširjanje zunanjih radijskih signalov v predore

Radijski signali v VHF in spodnjem UHF frekvenčnem področju, kjer delujejo profesionalni sistemi radijskih zvez, se relativno slabo širijo v predore. To je še posebej izrazito v VHF frekvenčnem področju. Slika 6 prikazuje



Slika 6. Meritve slabljenja radijskih signalov v predoru (Parsons, 1992-2000)

Figure 6. Signal loss in a tunnel (Parsons, 1992-2000)

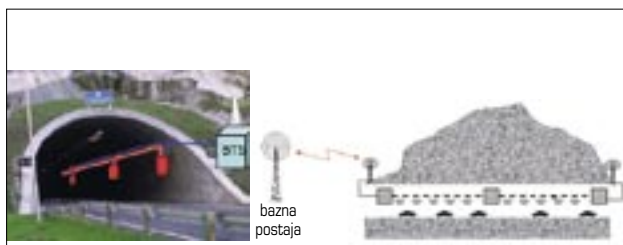
krivulje izmerjenega slabljenja radijskega signala v predoru pravokotnega preseka 7,5 m × 4 m, dolžine 2425 m. Testni oddajnik je bil postavljen v globini 305 m od začetka predora. Meritve so bile opravljene v dveh frekvenčnih področjih, VHF in UHF, pri treh frekvencah. Slabljenje je bilo najizrazitejše pri frekvenci 150 MHz, saj je po dobrih 300 m doseglo približno 50 dB. Pri frekvenci 300 MHz je šele na razdalji dobrih 1100 m doseglo slabljenje 50 dB.

Doseg neposredne radijske zveze na frekvenci 150 MHz v predoru bi bil okoli 1500 m ali nekaj več kakor do polovice predora.

Za nemoteno delovanje radijskih postaj je v predorih treba namestiti predorski radio. Naloga predorskega radia je zagotavljanje stalne ravni radijskega signala v predoru in prenos radijskih komunikacij v zunanje radijsko omrežje.

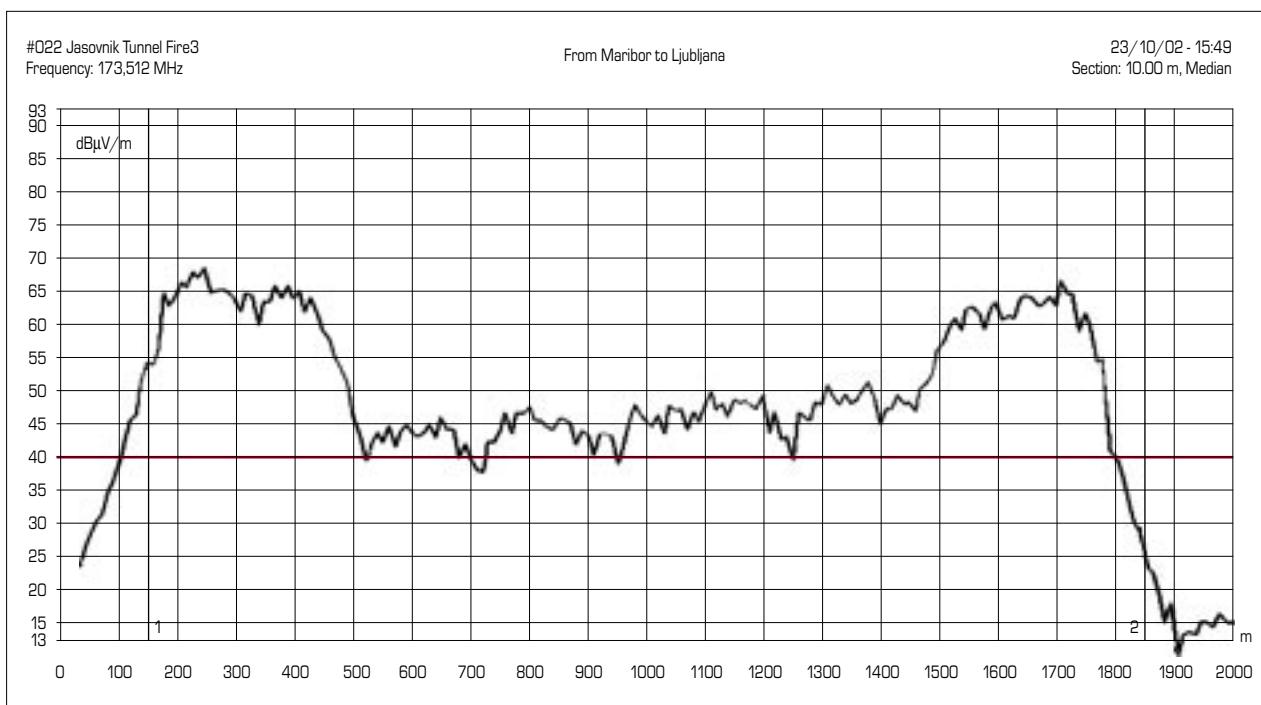
Predorski radio je omrežje medsebojno povezanih baznih postaj, enakomerno razporejenih po predoru. Bazne postaje so medsebojno povezane prek optičnega kabla. Za oddajne antene baznih postaj se uporablja sevalni kabel, razpet po stropu predora. Vse bazne postaje morajo biti medsebojno sinhronizirane.

Pri načrtovanju predorskega radia je treba paziti, da na vhodu predora ne pride do mešanja radijskega signala zunanjega omrežja z radijskim signalom predorskega radia. Sevalni kabel v predoru mora biti umaknjen v notranjost predora do meje, kjer moč zunanjega signala v najslabšem primeru pade pod raven sprejema radijskih postaj. Pri določanju te meje je treba poleg drugega upoštevati tudi največji možni presih polja.



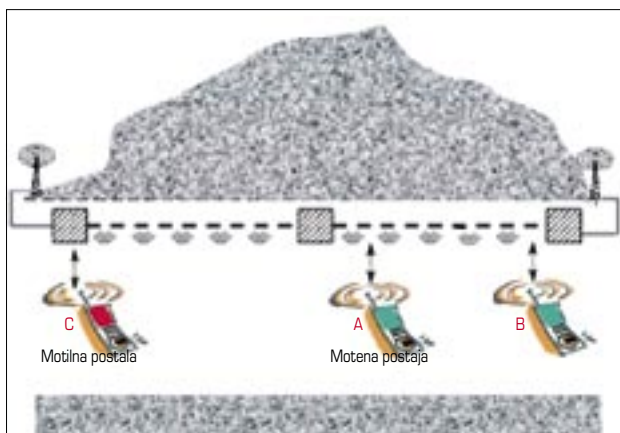
Slika 7. Predorski radio

Figure 7. Tunnel radio



Slika 8. Ravni elektromagnetnega polja v predoru Jasovnik (ETR 300-3 ...)

Figure 8. Levels of electro-magnetic field in Jasovnik tunnel (ETR 300-3 ...)



Slika 9. Medsebojno motenje analognih radijskih postaj FM, 25 kHz pri zvezah prek predorskega radia

Figure 9. Mutual interference of analogue radio stations FM and 25 kHz in communications through tunnel radio

Raven radijskega signala v predoru mora zadoščati tako za uporabo mobilnih in ročnih radijskih postaj. Pri ročnih radijskih postajah, ob upoštevanju največje možne izgube, raven radijskega signala na 90 % lokacije in 90 % časa ne sme pasti pod 40 dB μ V/m. Na sliki 8 je graf izmerjenih ravni radijskega signala sistema zvez ZARE v predoru Jasovnik, ki jih je izmerilo podjetje SkyLine.

Predpostavimo, da se prek sistema predorskega radia v predoru pogovarjata reševalec A in reševalec B, ki sta si 16 m narazen. Med njunim pogovorom tretji reševalec C po pomoti prične oddajati s svojo radijsko postajo. Z oddajanjem bo začel motiti pogovor obeh reševalcev. Z zmanjševanjem razdalje med reševalcem A in reše-

valcem C se motenje ne bo povečevalo, prav tako pa tudi ne bo prišlo do blokade postaje A ali postaje B.

Sklepne misli

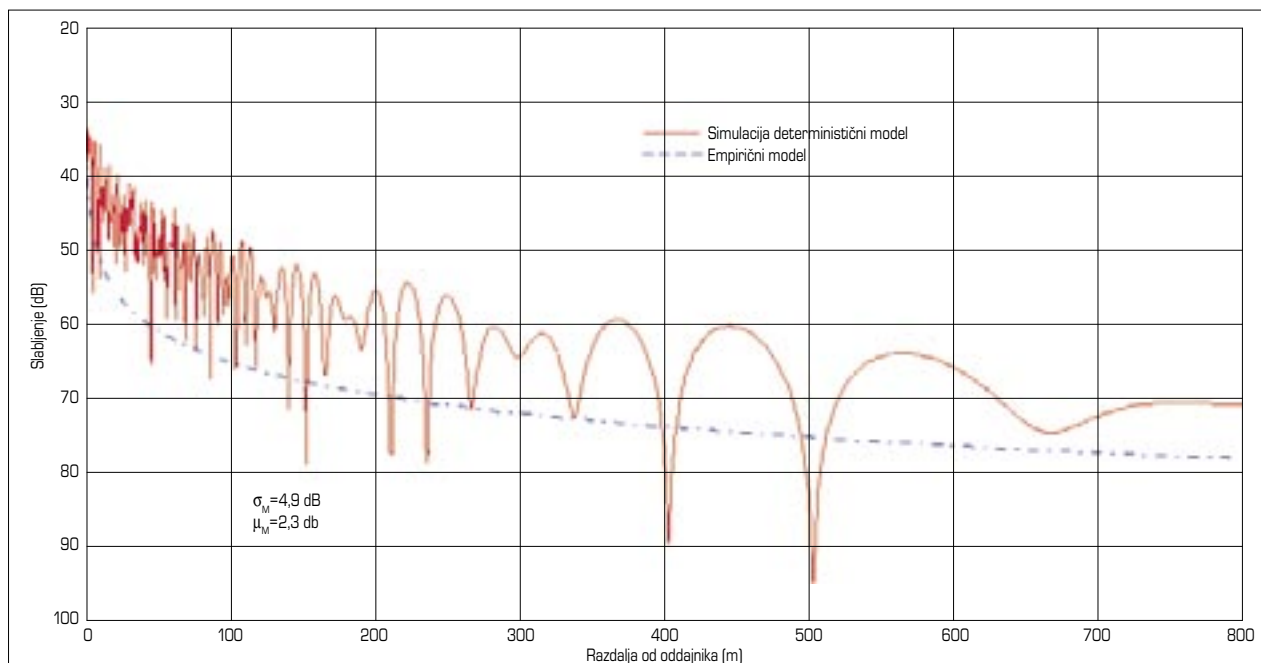
Napovedovanje razširjanja radijskega valovanja je na splošno zelo nevhvaležno. Celoteni fizikalni mehanizem radijskega valovanja je zelo dobro opisan z Maxwellovimi diferencialnimi enačbami. Zdi se, da je možno vedno natančno napovedati širjenje radijskega valovanja. Žal to drži zgolj teoretično, saj v praksi nikoli ne poznamo vseh dejavnikov, ki vplivajo na radijsko valovanje ali so ti preveč spremenljivi in mnogoštevilni. Radijsko valovanje v predorih je zaradi znane geometrije in zgradbe predorov dokaj dobro predvidljivo in ga lahko simuliramo z ustreznimi matematičnimi modeli. Primer empiričnega modela »Log-Distance Path Loss Model«, ki je prikazan na sliki 10, lahko zapišemo s spodnjo enačbo.

$$a(d) = a_0(d_0) + N \cdot 10 \cdot \log\left(\frac{d}{d_0}\right) + X\sigma =$$

$$= 11,5 + 1,45 \cdot 10 \log\left(\frac{d}{0,1}\right) + 10 \quad (dB)$$

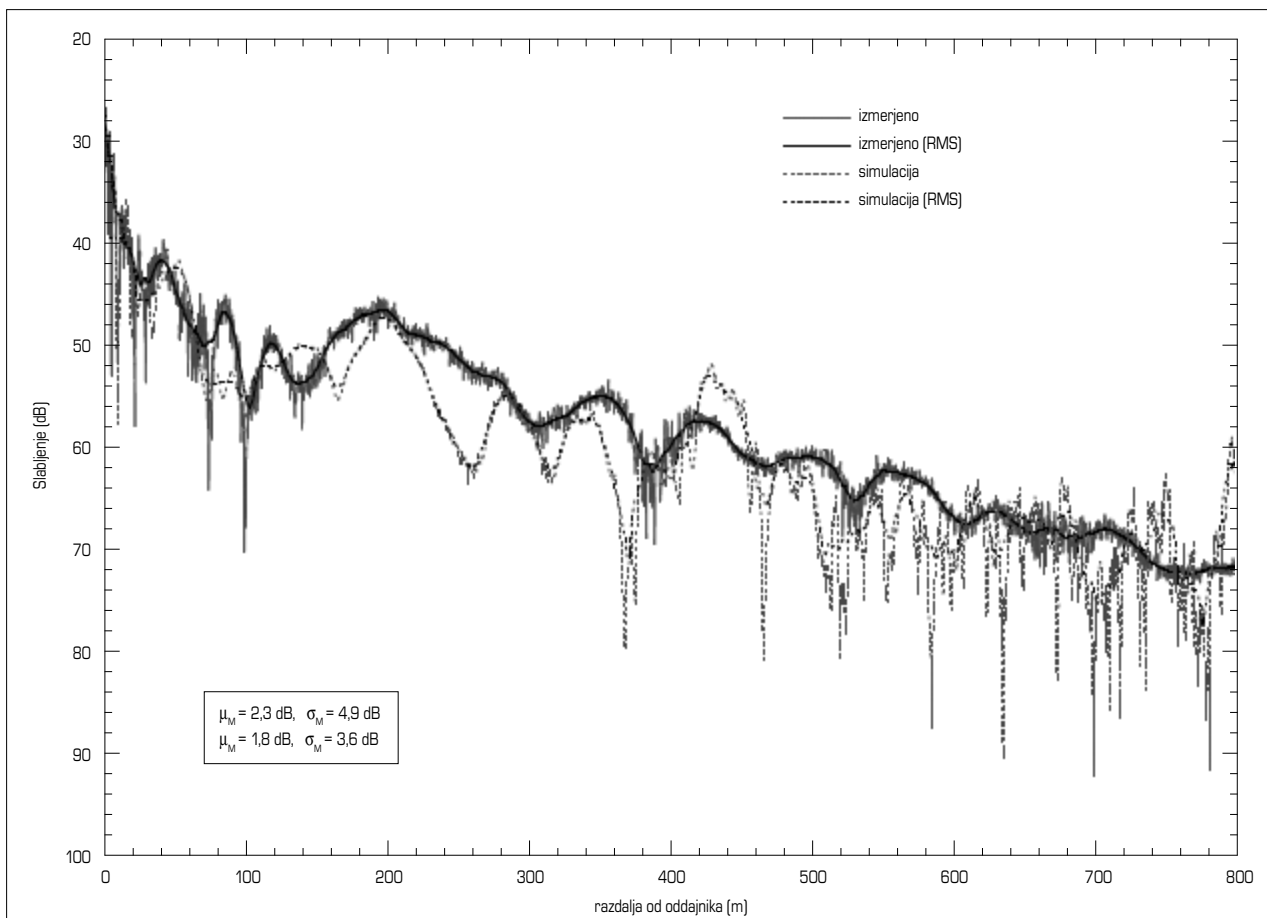
Model velja za $0,1 < d < 800$ m.

Na sliki 10 je, poleg omenjenega modela, prikazana simulacija slabljenja signala v hipotetičnem predoru z več žarkovnim modelom, pri katerem je poleg glavnega žarka upoštevanih še 16 različnih odbitih žarkov. Upoštevana je 95 % pokritost predora.



Slika 10. Simulirano slabljenje v predoru pri frekvenci 900 MHz

Figure 10. Simulating signal loss in a tunnel at a frequency of 900 MHz



Slika 11. Izmerjeno in simulirano slabljenje v predoru pri frekvenci 900 MHz (Didascalu, 2000)
 Figure 11. Measuring and simulating signal loss in a tunnel at a frequency of 900 MHz (Didascalu, 2000)

$X\sigma$ izračunamo iz Gaussove statistična porazdelitev gostote verjetnosti, upoštevajoč σ_M , μ_M in zahtevanega odstotka pokritosti predora z radijskim signalom (Seybold, 2005).

Na sliki 11 je prikazano izmerjeno slabljenje v predoru, pri frekvenci 900 MHz. Prikazano je tudi simulirano slabljenje signala z determinističnim več žarkovnim modelom, ki je bil za simulacijo prirejen na konkreten predor.

Predlagani empirični model se dokaj dobro prilega obema determinističnima modeloma in izmerjenim vrednostim signala.

Modele lahko koristno uporabimo pri analizi radijskih zvez v predorih ter načrtovanju predorskega radia. Pri neposrednih radijskih zvezah v predoru lahko pride do medsebojnega motenja ali blokiranja posameznih uporabnikov. Zato je potrebna pri uporabi velika previdnost in disciplina. Splošno veljavno načelo je, da se v predorih, če je to le mogoče, izogibamo neposrednim radijskim zvezam. V predorih, kjer je na voljo sistem predorskega radia, obvezno uporabimo slednjega namesto neposrednih radijskih zvez. To velja za vse daljše predore v Sloveniji.

Viri in literatura

1. Didascalu, D., 2000. Ray-Optical Wave Propagation Modelling in Arbitrarily Shaped Tunnels. ISSN: 0942-2935.
2. ETR 300-3 Terrestrial Trunked Radio (TETRA); Voice plus Data (V+D); Designers' guide Part 3: Direct Mode Operation (DMO).
3. Odsek za komunikacijske sisteme, Institut »Jožef Stefan«, Laboratorij za telekomunikacije, Fakulteta za elektrotehniko v Ljubljani, 2006. Končno poročilo o delu na projektu TETRA MORS. Interni dokument.
4. Parsons, J. D., 1992–2000. The Mobile Radio Propagation Channel. ISBN 0-471-98857-X, 210–211.
5. Seybold, J. S., 2005. Introduction to RF propagations. ISBN-13 978-0-471-65596-1, ISBN-10 0-471-65596-1, 208–217.
6. SkyLine, 2002. Meritve radijskega signala v predoru Jasovnik.
7. Tavčar, B., 2007. Načrtovanje radijskih zvez na področju varstva pred naravnimi in drugimi nesrečami. Seminar »Radiokomunikacije 2007«.
8. Tavčar, B., Podberšič, M., Švab Tavčar, A., 2006. Gradniki telekomunikacijskih sistemov 1. COBIS.SI-ID:512150125, 218–238.
9. Wikipedia, Rice distribution, http://en.wikipedia.org/wiki/Rician_distribution.