

Empirijski propagacioni model radio-kanala za tunele

Jovana S. Palibrk, Aleksandar M. Nešković

Sadržaj — Predložen je empirijski (statistički) model radio-kanala za tunele. Dat je opis procedure merenja koja je sprovedena u cilju prikupljanja podataka na osnovu kojih je model formiran i proveren. Prvo je izvršena statistička analiza rezultata merenja. Zatim su, uz objašnjenje načina formiranja modela prikazane predikcione karakteristike propagacionog modela. Na kraju su, u cilju provere modela, rezultati upoređeni sa rezultatima merenja.

Cljučne reči — Električno polje, merenje, propagacija talasa, statistički model, tunel.

I. UVOD

U mobilnim mrežama radio-pokrivanje određuje kvalitet servisa. Za visok kvalitet neophodno je da pokrivanje mrežom bude kontinualno. Stoga su mobilni operatori primorani da pokrivaju i metroe, drumske i železničke tunele kako bi korisnicima obezbedili potrebne servise. Pokrivanje ovakvih konstrukcija neophodno je i iz bezbednosnih razloga, naročito ako se uzmu u obzir i tuneli u različitim rudnicima. Osim toga, u razvoju su i sistemi za kontrolu i komandovanje vozilima u železničkim i podzemnim tunelima, tzv. CBTC (*communication-based train control*) sistemi.

Tunel predstavlja specifično propagaciono okruženje, a njegova glavna karakteristika jeste vođenje talasa. Ako je frekvencija radio-signalna niža od kritične frekvencije tunela, signal trpi značajno slabljenje. S druge strane, ako je frekvencija signala mnogo veća od kritične frekvencije tunela, signal će biti oslabljen manje nego u slobodnom prostoru. Zbog ovakvih karakteristika, u tunelima se ne mogu primenjivati modeli predikcije koji se koriste u *outdoor* okruženjima, već je potrebno primeniti drugačiji pristup.

Na propagaciju signala u tunelima utiču mnogi faktori kao što su oblik i dimenzije poprečnog preseka tunela, radna frekvencija, rastojanje između predajnika i prijemnika, električni parametri materijala i oblik zidova tunela, prepreke u tunelu itd. Ukupno polje na strani prijemnika predstavlja zbir polja direktnog i svih signala nastalih usled refleksije, rasejanja i difrakcije. Ovaj

fenomen se naziva višestruka propagacija i dovodi do velikih promena nivoa signala na prijemu, kao i do pojave intersimbolske interferencije u digitalnim komunikacionim sistemima. Sve ovo dosta usložnjava formiranje modela propagacionog kanala za tunele.

U ovom radu predložen je jednostavan statistički propagacioni model radio-kanala za tunele jednostavne geometrije. Dat je opis procedure merenja koja je sprovedena u cilju prikupljanja podataka na osnovu kojih je model formiran i proveren. Prvo je izvršena statistička analiza rezultata merenja. Zatim su, uz objašnjenje načina formiranja modela prikazani rezultati simulacije. Na kraju su, u cilju provere modela, ti rezultati upoređeni sa rezultatima merenja.

II. POSTOJEĆI MODELI RADIO-KANALA ZA TUNELE

Veliki broj istraživačkih timova bavio se analizom prostiranja radio-signalu u tunelima, teorijski i eksperimentalno. Svi razvijeni modeli uglavnom polaze od osnovnih zakona prostiranja i mogu se podeliti u tri velike grupe: 1) modeli bazirani na analizi modova, 2) modeli bazirani na teoriji geometrijske optike (GO modeli) i 3) modeli zasnovani na direktnoj numeričkoj integraciji Maksvelovih jednačina. Analiza modova, [1]-[7], predstavlja analitički pristup koji koristi analogiju između tunela i talasovoda. Naime, tunel se posmatra kao prazan, nesavršen talasovod velikih dimenzija kroz koji se prostire osnovni tip talasa (osnovni mod) i beskonačan broj modova višeg reda. Primenom osnovnih jednačina kojima se opisuje propagacija talasa u talasovodima različitih oblika, dolazi se do slabljenja koje signal pretrpi na svojoj putanji kroz tunel. GO modeli zidove tunela tretiraju kao refleksione površi. Talas se prostire direktnom putanjom (ukoliko postoji) i svim mogućim putanjama refleksije koje se prate, pri čemu se na prijemu sabiraju doprinosi svih pristiglih zraka i na taj način se dobija ukupno polje. Postoje tri velike podele ovih modela na *imaging* modele, [8]-[10], u okviru kojih se primenjuje teorija likova, *ray launching* modele, [11]-[17], kod kojih se emituje veliki broj zraka (tipično nekoliko desetina hiljada), a zatim se prate duž cele putanje, i kombinovane modele [18]. Treću veliku grupu determinističkih modela čine FDTD (*finite-difference time-domain*) modeli, [19]-[21], i njihova aproksimacija, model vektorskih paraboličnih jednačina (*vector parabolic equation* – VPE) [22]-[24]. Takođe, razvijeni su i modeli koji u cilju dobijanja što boljih rezultata sa velikom efikasnošću kombinuju osobine nekih od predstavljenih tehnika [25]-[26].

J. Palibrk, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija (telefon: 381-64-5758807, e-mail: jovanapalibrk@gmail.com)

A. Nešković, Elektrotehnički fakultet u Beogradu, Bulevar kralja Aleksandra 73, 11120 Beograd, Srbija (telefon: 381-64-1115983; faks: 381-11-3218399; e-mail: neshko@etf.rs)

III. MERENA METODOLOGIJA

Kao i u slučaju razvoja bilo kog drugog statističkog modela potrebno je najpre izvršiti intenzivna merenja radi prikupljanja podataka čijom daljom obradom se formira model. Merenja su sprovedena u Terazijском tunelu u Beogradu. Tunel je širine 13 m, visine 5,5 m i dužine 223 m. Zidovi tunela su napravljeni od betona, a svod od aluminijuma.

Za merenje je korišćen uskopojasni merni prijemnik *Anritsu ML521B* koji pokriva opseg od 300 MHz do 1000 MHz, sa omnidirekcionom antenom *TS95A16 (Drive test antenna UMTS, AMPS, GSM900/1800, magnetic mount)* dobitka 0 dBi i impedanse 50Ω , koji je bio povezan sa personalnim računaru koji je korišćen za prikupljanje podataka. Na računaru je bio instaliran softverski paket *WTb - RF EAGLE (ETF)*, sistem za automatsko merenje nivoa električnog polja, napona i snage. Tokom merenja beležene su vrednosti nivoa snage signala. Meren je signal GSM baznih stanica Telekoma Srbija. Za određivanje servisnih GSM kanala korišćen je *Nokia NetMonitor* na osnovu koga su dobijeni odgovarajući parametri servisne ćelije (*CI - Cell ID* i *LAC - Location Area Code*). Odabrani su oni kanali sa kojih je primljen najjači signal na ulazu, sa jedne i druge strane tunela. Prijemnikom podešenim na učestanost izabranog kanala sprovedena su merenja. Ova procedura je izvršena za različite bazne stanice sa jedne i druge strane tunela. Konkretno, u pitanju su bili kanali 66 i 55 Telekoma Srbije, kojima odgovaraju centralne učestanosti 948,2 MHz i 946,0 MHz, respektivno.

Predajne antene baznih stanica u oba slučaja su bile izvan tunela. Predajna antena bazne stanice za kanal 66 Telekoma Srbije, *Kathrein738446*, (Brankova ulica) se nalazi na rastojanju 267 m od otvora tunela, i u pravcu tunela njen dobitak iznosi 11,9 dBi. Ovu antenu napaja predajnik snage 47 dBmW. Druga antena, *Kathrein742271_T9*, (Trg Nikole Pašića), koju napaja predajnik snage 33 dBm, postavljena je na 140 m od otvora tunela, i pravcu tog otvora ima dobitak od -5,4 dBi.

Između predajne antene bazne stanice za kanal 55 i ulaza u tunel ne postoji linija optičke vidljivosti, naročito ako se u obzir uzme da je antena postavljena na visini od 6 m, što nije slučaj sa antenom bazne stanice za kanal 66 koja se nalazi na visini 23 m i gde postoji linija optičke vidljivosti u odnosu na otvor tunela. Iz ovog razloga formirana su dva modela.

Izvršeno je 5 serija merenja na kanalu 55 i 6 serija merenja na kanalu 66. Merna oprema je postavljena u vozilo koje se duž tunela kretalo ravnomernom brzinom od 30 km/h. Odbirci su uzimani u vremenu na svakih 100 ms. U trenutcima ulaska i izlaska iz tunela u softveru su označeni markeri, za svako merenje, tako da su se podaci između tih markera koristili za dalju obradu i formiranje modela. Na ovaj način, broj odbiraka uzet između dva markera je u proseku iznosio 179 što je, kada se u obzir uzme brzina kretanja vozila, ekvivalentno dužini puta od 163 m. Ova dužina je kraća od stvarne dužine tunela, ali u obzir treba uzeti nepreciznost procene mesta ulaska u tunel

i izlaska iz tunela (što je rađeno manuelno), kao i činjenicu da idealno ravnomerno kretanje vozila pomenutom brzinom nije u potpunosti moguće.

Bitno je naglasiti da se dok je merenje vršeno u tunelu odvijao saobraćaj smanjenog intenziteta.

IV. MODEL

Radi dobijanja rezultata veće pouzdanosti za svaki smer tunela vršeno je nekoliko merenja pod istim uslovima. Nakon statističke obrade podataka formiran je model.

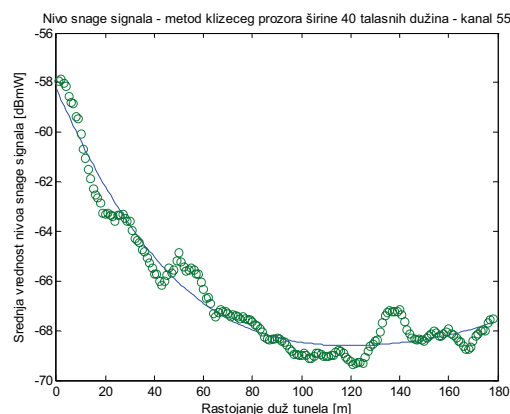
A. Formiranje modela

Kako je merna nesigurnost velika, da bi se eliminisao uticaj fedinga, rezultati dobijeni ponovljenim merenjima svakog kanala usrednjeni su, a zatim je kriva srednjih vrednosti dodatno usrednjena primenom tehnike klizećeg prozora širine 40 talasnih dužina.

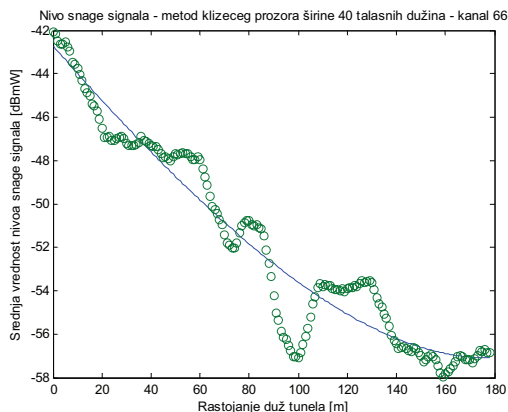
Za svaku usrednjenu krivu izračunate su srednje vrednosti standardne devijacije odstupanja od izmerenih vrednosti koje iznose za kanal 55 - 2,8 dB, a za kanal 66 - 4,6 dB.

Da bi se formirao model za usrednjenu krivu određena je aproksimativna kriva opadanja primenom regresije zasnovane na SVM (*Support Vector Machine*) algoritmu, koji se zasniva na teoriji statističkog učenja, teoriji generalizacije i teoriji optimizacije. SVM algoritam se, u osnovi, može posmatrati kao algoritam za klasifikaciju podataka, ali se malim izmenama i reformulacijom problema može svesti na algoritam za regresiju. U ovom slučaju korišćena je Gausova RBF (*Radial Basis Function*) funkcija, kao jedna od najčešće primenjivanih kernel funkcija.

Rezultati su prikazani na slikama 1 i 2.



Sl. 1. Aproximativna kriva opadanja za nivo snage signala na prijemu, na kanalu 55.



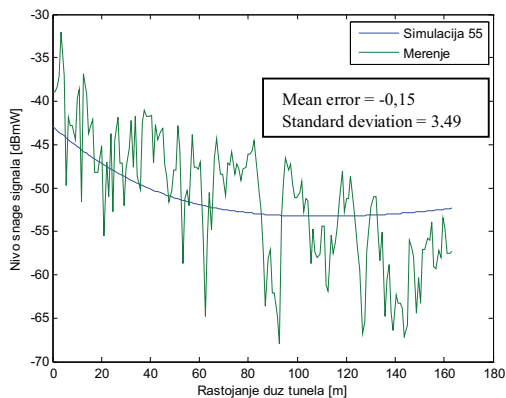
Sl. 2. Aproximativna kriva opadanja za nivo snage signala na prijemu, na kanalu 66. Predloženi model je, prema tome, dat jednačinom

$$p(x) = p_0 + \sum_{j=1}^{179} \beta_j \frac{A^2 \|x_j - x\|^2}{2\sigma^2} - \alpha \quad (1)$$

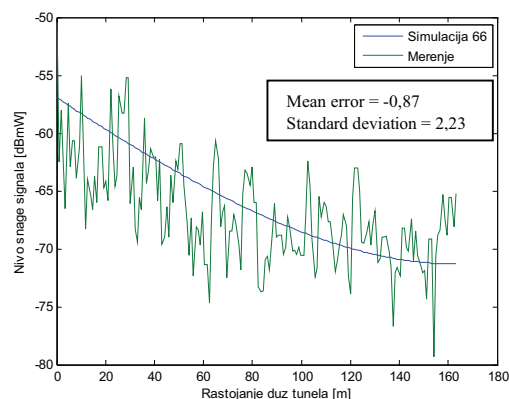
gde je $p(x)$ nivo snage signala u zavisnosti od rastojanja od ulaza u tunel, x . Vrednost konstante σ je 1,41, $x_j = 0,1,\dots,178$ za $j=1,2,\dots,179$, a β , α i A su slobodni koeficijenti koje imaju različite vrednosti za model 55 (dobijen na osnovu rezultata merenja na kanalu 55) i model 66. β je matrica kolone koja se sastoji od 179 elemenata određenih vrednosti. A u oba slučaja iznosi 0,112, dok koeficijent α za model 55 ima vrednost -58,25, a za model 66 vrednost -42,71. Veličina p_0 predstavlja nivo snage signala na ulazu u tunel. Kao što je već napomenuto, propagaciona okruženja ispred jednog i drugog ulaza u tunel se znatno razlikuju što se odrazilo i na nivo snage signala na tom mestu. Zato je, prilikom primene predloženog modela, potrebno uzeti u obzir ovu veličinu, jer se samim modelom ne vrši predikcija nivoa snage signala na ulazu u tunel.

B. Verifikacija modela

Nakon određivanja modela, izvršena je njegova provera, što je prikazano na slikama 3 i 4.



Sl. 3. Snaga signala na prijemu dobijena modelovanjem i izmerena na 948,2 MHz (kanal 66 Telekoma Srbija)



Sl. 4. Snaga signala na prijemu dobijena modelovanjem i izmerena na 946,0 MHz (kanal 55 Telekoma Srbija)

Naime, rezultati primene modela 55 na Terazijki tunel upoređeni su sa rezultatima dobijenim merenjem na kanalu 66, što je prikazano na slici 3. Takođe, rezultati primene modela dobijenog obradom izmerenih podataka na kanalu 66, upoređeni su sa rezultatima merenja na kanalu 55, slika 4.

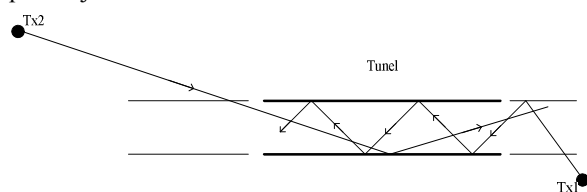
Na osnovu slika 3 i 4, i datih vrednosti za srednju vrednost greške i standardne devijacije, može se zaključiti da postoji dobro slaganje između podataka dobijenih primenom modela i izmerenih podataka. Pri tome treba imati u vidu i uslove u kojima je merenje izvršeno, odnosno, nepreciznost procene mesta ulaska u tunel i izlaska iz tunela, kao i činjenicu da idealno ravnomerno kretanje vozila nije u potpunosti moguće.

C. Kvalitativna analiza

U pitanju je situacija kada signal iz spoljašnjosti prodire u tunel. Pri tom, treba uzeti u obzir da je sredina pre ulaska u tunel urbana, signal trpi posledice *shadowing*-a, apsorpcije, rasejanja, refleksije i difrakcije, što je naročito značajno jer se radi o visokim frekvencijama. Između predajnika i prijemnika u ovakvim uslovima signal formira veliki broj propagacionih putanja, javlja se *multipath* interferencija koja dovodi do brzih i dubokih padova nivoa signala, odnosno brzog *feeding*. Maksimalna dubina *feeding* signala dobijenog merenjem na kanalu 66 (slika 3) iznosi 15 dB, a na kanalu 55 (slika 4) 12 dB. Ako se tunel posmatra kao talasovod velikih dimenzija sa gubicima, sa kritičnom frekvencijom nekoliko desetina MHz, onda se može reći da se UHF radio signal (300 MHz - 3GHz) u tunelu sastoji od vektorske sume mnogih elektromagnetnih modova. Pri ulasku signala u tunel, zbog prirode propagacije dolazi do formiranja tipova talasa višeg reda. Promene signala koje se dešavaju duž tunela se javljaju zbog različitih faza ovih modova.

Okruženje neposredno pre otvora tunela je bitno zbog putanje koju signal prati prilikom ulaska u tunel. Na primer, ako signal uđe u tunel formirajući mali upadni ugao sa površinom zida tunela (u odnosu na normalu na tu površinu), broj refleksija tog signala može biti veliki, što znači i veliko slabljenje. Ako je upadni ugao mali, zbog malog broja refleksija signal trpi i manje slabljenje. Ovaj

primer je ilustrovan na slici 5.



Sl. 5. Zavisnost propagacije signala od upadnog ugla

Osim refleksije, na signal u tunelu utiče i difrakcija koja se dešava na ivicama otvora tunela. Kako je u pitanju kratak tunel, svi ovi efekti su značajni duž celog tunela. To je razlog zbog kog su brze i duboke promene signala prisutne celom njegovom putanjom duž tunela, što se jasno vidi na osnovu izmerenih krivih sa slika 3 i 4.

V. ZAKLJUČAK

Ovaj rad se bavi problematikom propagacije radio-signala u tunelima. Predložen je jednostavan statistički propagacioni model radio-kanala za tunele jednostavne geometrije. Uzimajući u obzir veliku varijabilnost nivoa signala na prijemu, može se zaključiti da predloženi model daje dobre rezultate.

S obzirom da se predloženim modelom ne vrši predikcija nivoa snage signala na samom ulazu u tunel, pri čemu u obzir treba uzeti propagaciono okruženje između bazne stanice i tunela, u tom smeru treba vršiti dalja istraživanja na ovu temu.

LITERATURA

- [1] A. G. Emslie, R. L. Lagace, and P. F. Strong, "Theory of the propagation of UHF radio waves in coal mine tunnels," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. AP-23, pp. 192–205, Mar. 1975.
- [2] L. Deryck, "Natural propagation of electromagnetic waves in tunnels," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 27, no. 3, pp. 145–150, 1978.
- [3] S. Wang and X. Han, "Influence of transmitter position and dielectric constant on electromagnetic waves propagation in mine tunnel", *IEEE International Conference on MultiMedia and Information Technology*, pp.744–747, 2008.
- [4] H. D. Zheng, Z. Xu and Y. Hou, "Research on characteristics of the loss of UHF propagation in rectangular tunnels", *IEEE*, pp. 1–4, 2008.
- [5] H. D. Zheng, Z. Xu and Y. Hou, "The effect of the wall roughness on the electromagnetic wave propagation in coal mine underground", *IEEE*, pp. 482–485, 2008.
- [6] Y. P. Zhang and Y. Hwang, "Theory of the radio-wave propagation in railway tunnels," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 47, pp. 1027–1036, Aug. 1998.
- [7] D. W. Feng and J. R. Lan, "Transmission line method for propagation characteristic of electromagnetic wave in rectangular tunnel," *IEEE*, pp. 822–825, 2008.
- [8] H. Saghir, M. Heddebaut, F. Elbahhar and J. M. Rouvaen, "Evaluation of a tunnel ground to train UWB communication", *IEEE*, 2006.
- [9] P. Mariage, M. Lienard, and P. Degauque, "Theoretical and experimental approach of the propagation of high frequency waves in road tunnels", *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 42, pp. 75–81, Jan. 1994.
- [10] Y. P. Zhang and H. J. Hong, "Ray-optical modeling of simulcast radio propagation channels in tunnels," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 53, pp. 1800–1808, Nov. 2004.
- [11] Y. P. Zhang, Y. Hwang, and R. G. Kouyoumjian, "Ray-optical prediction of radio-wave propagation characteristics in tunnel environments—Part 2: Analysis and measurements," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 46, pp. 1337–1345, Sep. 1998.
- [12] J. Minghua, Z. Guoxin, and J. Wenli, "A new model for predicting the characteristic of RF propagation in rectangular tunnel," *IEEE*, pp. 268–270, 2008.
- [13] Martí Pallarés, F. J. P. Juan, and L. Juan-Llácer, "Analysis of path loss and delay spread at 900 MHz and 2.1 GHz while entering tunnels," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 50, no. 3, pp. 767–776, May 2001
- [14] J. S. Lamminmaki and J. J. A. Lempiainen, "Radio propagation characteristics in curved tunnels," *Proc. Inst. Elect. Eng. Microw. Antennas Propag.*, vol. 145, no. 4, pp. 327–331, Aug. 1998.
- [15] T.-S. Wang and C.-F. Yang, "Simulations and measurements of wave propagations in curved road tunnels for signals from GSM base stations," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 54, no. 9, pp. 2577–2584, Sep. 2006.
- [16] M. Lienard and P. Degauque, "Ray density normalization for ray-optical wave propagation modeling in arbitrarily shaped tunnels," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 48, pp. 1316–1325, Sep. 2000.
- [17] D. Didascalou, J. Maurer, and W. Wiesbeck, "Subway tunnel guided electromagnetic wave propagation at mobile communications frequencies," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 49, pp. 1590–1596, Nov. 2001.
- [18] S.-H. Chen and S.-K. Jeng, "SBR image approach for radio wave propagation in tunnels with and without traffic," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 45, pp. 570–578, Aug. 1996.
- [19] Gerrit Mur, "Absorbing boundary condition for the finite-difference approximation of the time-domain electromagnetic-field equations," *IEEE Trans. On Electromagnetic Compatibility*, vol. EMC-23, no. 4, pp. 377–382, Nov. 1981.
- [20] Lajos Nagy, "Propagation modelling in subway tunnel using FDTD," *Proc. 'EuCAP 2006', Nice, France 6-10 November 2006*.
- [21] Carmen Cerasoli, "RF propagation in tunnel environments," *IEEE Military Communication Conference*, pp. 363–369, 2004.
- [22] Popov, A. V. and N. Y. Zhu, "Modeling radio wave propagation in tunnels with a vectorial parabolic equation", *IEEE Trans. Antennas and Propagation*, Vol. 48, NO.9, pp 1403-1412, 2000.
- [23] Popov, A. V., Vinogradarov V. A., N. Y. Zhu, and F. M. Landstorfer, "3D parabolic equation model of EM wave propagation in tunnels", *IEEE Electronic letters*, Vol. 35, NO.11, pp 880-881, 27th May 1999.
- [24] N. Noori, S. Safavi-Naeini and H. Oriazi, "A new three-dimensional vector parabolic equation approach for modelling radio wave propagation in tunnels", *IEEE*, pp 314-317, 2005.
- [25] Y. P. Zhang, "New model for propagation loss prediction in tunnels," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 52, pp. 1308–1314, Sep. 2003.
- [26] Y. Kasashima, and J. Hirai, "Analysis of propagation characteristics of radio waves in tunnels", *IEEE*, pp 664-667, 2003.

ABSTRACT

Statistical method for modeling radio-wave propagation in tunnel environment is proposed. Measurement campaign that has been carried out in order to collect needed data is described. After statistical analysis of the measurement results, modeling results are given. Measurements are compared with modeling results in order to verify proposed statistical method.

STATISTICAL MODEL OF RADIO-CHANNELS IN TUNNEL ENVIROMENTS

Jovana S. Palibrk