

1. Prijedlog naslova doktorske disertacije

„Prilog analitičkom modeliranju *multipath* fadinga“.

„A contribution to analytical modeling of *multipath* fading“.

2. Problematika kojom se bavi istraživanje – relevantnost problematike

Problematika kojom se bavi ova disertacija je modeliranje brzih slučajnih fluktuacija anvelope i faze primljenog signala uzrokovanih *multipath* fadingom, s fokusom na *SISO* (*Single Input Single Output*) kanale u *outdoor* okruženju.

Zarad propagacijskih uslova u kanalu, poslani signal trpi posljedice raznih fenomena (refleksija, refrakcija, difrakcija, raspršenje), tako da se na prijemnoj strani javlja više replika poslanog signala koji su različito oslabljeni, te imaju različite faze i kašnjenja. Višestruke replike poslanog signala se na prijemnoj strani superponiraju, formirajući prijemni signal. Adekvatno modeliranje *multipath* fadinga je od velikog interesa, zato što on predstavlja najdestruktivniju smetnju koja se javlja u bežičnim komunikacijama, a očituje se u vidu brzih fluktuacija anvelope i faze primljenog signala. Iako je radio kanal linearan, njegov impulsni odziv u opštem slučaju ovisi o vremenu, frekvenciji i radijus-vektoru kretanja prijemnika u odnosu na predajnik [1], [2].

Obzirom da je kanal ključni segment cjelokupnog komunikacijskog sistema, precizni modeli su od velike važnosti. Glavna motivacija za modeliranje kanala je da se uspostavi adekvatan model koji će odgovarati eksperimentalnim podacima. Sa adekvatnim modelom ćemo bolje procijeniti performanse sistema, iznaći efikasnije algoritme za poboljšanje istih, te komparirati različite sisteme. Zarad kontinuiranog razvoja novih bežičnih sistema, te rastuće primjene postojećih bežičnih sistema, povećana je potreba za novim modelima kanala i alatima za njihovu karakterizaciju.

Na polju modeliranja *multipath* fadinga, uvidom u dosadašnju literaturu, možemo uočiti dva pristupa i to:

- geometrijsko-stohastičke prirode: pristup koji podrazumijeva već neki raspored objekata na putu propagacije koji uzrokuju refleksiju, refrakciju, difrakciju i raspršivanje signala, a dominantno je vezan za simulacioni pristup analizi kanala;
- analitičko-stohastičke prirode: pristup koji se bavi karakterizacijom kanala direktno, na statistički način, bez mnogo zalaženja u mehanizme propagacije signala, te je primarno orijentisan na dobivanje izraza za PDF (*Probability Density Function*) fluktuacija anvelope i faze signala.

Oba pristupa imaju svojih prednosti i mana. Ključna mana prvog pristupa je ta što se u praktičnim slučajevima geometrija objekata, kao i njihov položaj, u kanalu mijenja. Također, parametrizacija tih objekata predstavlja dodatni problem, tako da se obavezno parametri objekata moraju korelisati sa eksperimentalnim mjerenjima. Prednost analitičkih modela nad geometrijskim je njihova primjenjivost u raznim scenarijima.

U kontekstu analitičko-stohastičkog modeliranja možemo razgraničiti tri pristupa.

1. Empirijski pristup: U ovom pristupu se ne pravi nikakva pretpostavka o fizikalnom mehanizmu koji uzrokuje fluktuacije anvelope i faze. Ovdje se obično uzima fleksibilna PDF sa dva do tri parametra, a njena prikladnost scenariju upotrebe se verificira statističkim *goodness-of-fit* testovima na podacima koji su dobiveni mjerenjima. *Weibull*-ova [3] i *Nakagami*-m [4] PDF su primjeri distribucija anvelope koje se najčešće koriste za *outdoor* kanale.

2. Pristup na bazi slučajnih vektora: U ovom pristupu se svaka *multipath* komponenta tretira kao slučajni vektor (sa slučajnom amplitudom i slučajnom fazom). Superpozicija *multipath* komponenti na prijemu se na ovaj način svodi na sabiranje slučajnih vektora, a određivanje distribucije anvelope se svodi na računanje distribucije rezultantnog vektora [5]-[7].

3. *I-Q* bazirani pristup (pristup na bazi kvadrturnih komponenti): Uvažavajući u određenoj mjeri propagacijske mehanizme i karakteristike kanala, u ovom pristupu se primarno određuje združena PDF *I* i *Q* komponenti (kvadrturnih komponenti signala na prijemu). Odavde se vrlo jednostavno određuje (polarnom transformacijom) združena PDF anvelope i faze primljenog signala.

Osnovna prednost empirijskog i *I-Q* baziranog pristupa, nad pristupom na bazi slučajnih vektora u *outdoor* okruženju, jeste činjenica da se u *outdoor* kanalima javlja relativno veliki broj *multipath* komponenti (slučajnih vektora), što povećava kompleksnost modela na bazi slučajnih vektora čineći ga nepogodnom za primjenu.

Prednost *I-Q* baziranog pristupa je što rezultira egzaktnim distribucijama anvelope i faze primljenog signala, dok se kod empirijskog pristupa razmatraju distribucije koje na aproksimativan način opisuju distribucije anvelope ili distribucije faze (ali nikad obje istovremeno).

Pristup koji će biti korišten u disertaciji će imati *I-Q* bazirani analitičko-stohastički karakter, te će kao takav rezultirati egzaktnim distribucijama anvelope i faze primljenog signala.

Kod *I-Q* baziranog pristupa, uvažavajući činjenicu da se mora sprovoditi rigorozna analitička i teorijska analiza, uvijek se mora voditi računa o uslovima za praktičnu primjenu *Centralne granične teoreme*:

- U prisustvu malog broja raspršivača u kanalu, nije zadovoljena *Centralna granična teorema*, pa ne postoji adekvatna teorijski utemeljena distribucija anvelope i faze. Umjesto toga, na empirijskoj osnovi se koriste *Nakagami*-m i *Weibull*-ova distribucija i dr. (i to obje samo za raspodjelu anvelope) – ne postoji odgovarajuće teorijsko-analitičko rješenje.
- U prisustvu većeg broja raspršivača u kanalu postoji teorijska i praktična osnova za primjenu *Centralne granične teoreme*. Na ovaj način se dolazi do egzaktnih distribucija anvelope i faze signala. Klasični primjeri distribucija anvelope u ovom kontekstu su jednostrana *Gauss*-ova, *Rayleigh*-eva, *Rice*-ova [8], *Hoyt*-ova [9], *Beckmann*-ova [10], te

tzv. 5-parametarska distribucija [11]. U istim referencama je za svaku od ovih distribucija anvelope data i odgovarajuća distribucija faze signala.

Većina spomenutih distribucija je također sistematično obrađena i u knjigama [12]-[20].

Nedavno se počeo primjenjivati i metod klasterizacije *multipath* talasa. Naime, na osnovu mjerenja kanala primjećeno je da pristigli talasi (*multipath* komponente) stižu u skupinama koje imaju slične osobine (prije svega kašnjenje) – tj. stižu u klasterima. Ovaj metod je našao primjenu i kod geometrijsko-stohastičkih modela [21]-[27] i kod analitičko-stohastičkih modela na način da se posebno analiziraju osobine u klasteru, a posebno osobine među klasterima. Jasno, na ovaj način se povećala tačnost modela kanala na uštrb povećanja skupa parametara koji opisuju model.

Za slučaj jednog klastera *multipath*a, višeklasterski modeli se reduciraju na jednoklasterske, a to su upravo jednostrana *Gauss*-ova, *Rayleigh*-eva, *Rice*-ova, *Hoyt*-ova, *Beckmann*-ova i 5-parametarska distribucija.

Za više klastera *multipath*a analitičko-stohastički modeli su modeli dati u [28]-[34]. Ovi modeli su empirijski. Iako izrazi za PDF anvelope signala ovih modela, sa matematskog aspekta, uključuju mnoge poznate distribucije (*Rayleigh*-evu, *Rice*-ovu, *Nakagami*-m, itd.), isti su vrlo složeni (redovno su prikazani u kontekstu specijalnih funkcija), što je pak posljedica broja parametara koje distribucije imaju, kao i pretpostavki od kojih se polazilo prilikom matematskog izvođenja ovih distribucija.

I u slučaju više klastera *multipath*a se mora voditi računa o uslovima za praktičnu primjenu *Centralne granične teoreme*, gdje razgraničavamo dva slučaja:

- u klasteru nisu zadovoljeni uslovi za primjenu *Centralne granične teoreme*;
- u klasteru su zadovoljeni uslovi za primjenu *Centralne granične teoreme*.

Oba slučaja su otvoreni problemi, s tim da će se u disertaciji obrađivati ovaj drugi slučaj, tj. slučaj kada postoji više klastera *multipath*a, gdje su u svakom klasteru zadovoljeni uslovi za primjenu *Centralne granične teoreme*. Pored toga, razmatranja će tretirati i korelaciju među klasterima.

Dakle, karakterističan i praktično relevantan slučaj je kada postoji nekoliko klastera, sa ili bez regularne komponente, pri tome su u svakom od njih zadovoljeni uslovi za primjenu *Centralne granične teoreme*, klasteri su korelisani, a između klastera postoji određen vremenski razmak zbog kašnjenja. Takvi slučajevi su zabilježeni u praksi, tj. postoje realni kanali gdje je identificirano više klastera *multipath*a i dovoljan broj komponenti u svakom od njih za primjenu *Centralne granične teoreme*. Međutim, niti u jednom od njih nije data PDF koja na egzaktn način opisuje fluktuacije anvelope i faze signala.

Jedan takav primjer je opisan u [23], [25], [26] i njihovim referencama, a odnosio se na visokourbane sredine, gdje je primjećeno 1-3 klastera *multipath*a, te dovoljan broj *multipath* komponenti za primjenu *Centralne granične teoreme*. U [26] su se na empirijskoj osnovi koristile *Rayleigh*-eva i *Rice*-ova distribucija anvelope, te uniformna distribucija faze iako su davale relativno lošu aproksimaciju rezultata mjerenja (ovdje treba voditi računa da su se u [26]

prije svega razmatrale postavke za geometrijsko-stohastički model, te da autorima nije bilo od velikog značaja da analiziraju PDF anvelope i faze). Također je mjerenjima pokazano da u ovakvim slučajevima zaista postoji korelacija između klastera. Dakle, u [26] nije data PDF koja na egzaktn način opisuje fluktuacije anvelope i faze signala.

Drugi primjer je opisan u [35] i njihovim referencama, a odnosi se na karakterizaciju kanala u šumskom okruženju. Prije svega treba istaknuti da su se mnogi autori, koji su analizirali problematiku mogućnosti komunikacije šumskim okruženjima, referirali na ovakve kanale kao „tip kanala koji je između *indoor* kanala i *outdoor* kanala“. Karakteristike *indoor* kanala, sa aspekta broja *multipath* klastera, je da se u njima javlja relativno veliki broj klastera, ali sa jako malo komponenti u svakom od njih (ne postoje uslovi za primjenu *Centralne granične teoreme*). S druge strane, u *outdoor* kanalima se javlja relativno mali broj klastera, ali sa mnogo *multipath* komponenti (dovoljno za primjenu *Centralne granične teoreme*). U šumskim okruženjima se javljaju kanali koji inkorporiraju osobine *indoor* kanala sa aspekta broja klastera i *outdoor* kanala sa aspekta broja *multipath* komponenti u klasteru. Naime, ovo je u velikoj mjeri tačno jer šumsko područje predstavlja okolinu koja je bogata raspršivačima (npr. lišće, granje, žbunje i sl.). Prilikom modeliranja PDF-a anvelope, u [35] je na empirijskoj osnovi korištena *log-logistic* distribucija anvelope (uz komparaciju sa *Rayleigh*-evom, *log-normalnom* i *Weibull*-ovom distribucijom), te uniformna distribuciju faze. Motivacija za ovu komparaciju je upravo bila kombinovana priroda okruženja koje su analizirali (jer ipak se često *log-normalna* distribucija koristi za *indoor* slučajeve, a *Rayleigh*-eva za *outdoor* slučajeve). U [35] uopšte nije ni razmatran slučaj korelacije među klasterima. Ni ovdje, kao ni u prethodnom slučaju nije data PDF koja na egzaktn način opisuje fluktuacije anvelope i faze signala.

Na kraju, otvoreni problemi kod modeliranja brzih slučajnih fluktuacija anvelope i faze u *SISO* kanalima u *outdoor* okruženju su:

- problem modela koji uzima u obzir više od jednog klastera, gdje u svakom klasteru postoje uslovi za primjenu *Centralne granične teoreme*;
- u klasteru se može javiti regularna komponenta (proizvoljne snage), a snage rasutih talasa kvadraturnih komponenti se razlikuju u klasteru i među klasterima;
- postoji korelacija između klastera.

3. Ciljevi istraživanja i plan istraživanja

Imajući u vidu otvorene probleme kod modeliranja *SISO* kanala u *outdoor* okruženju, osnovni cilj koji postavljam je istraživanje *I-Q* baziranog analitičko-stohastičkog modela koji tretira više klastera *multipath* sa ili bez regularne komponente i arbitrarnim snagama rasutih komponenti, pri tome su u svakom od njih zadovoljeni uslovi za primjenu *Centralne granične teoreme*, te postoji korelacija među klasterima.

U skladu sa postavljenim ciljem, potrebno je:

- odrediti egzaktne distribucije za PDF anvelope i PDF faze signala na prijemu;
- ispitati vezu istraživanog modela sa postojećim modelima;

- verificirati model kroz *software*-ski simulator.

Na bazi *I-Q* pristupa i *Centralne granične teoreme* će biti određene egzaktne distribucije za PDF anvelope i PDF faze signala na prijemu.

Veza između modela se odnosi na ispitivanje specijalnih slučajeva u kontekstu analitičke provjere validnosti modela svođenjem na poznati specijalni slučaj.

Da bi se verificirali rezultati istraživanja potrebno je analizirati model slučajnog procesa, a potom i realizirati odgovarajući *software*-ski simulator na bazi dostupnih alata u sprezi sa postojećim rješenjima [36]. Ovdje se eksplicitno mora voditi računa da ovaj simulator treba da verificira PDF anvelope i PDF faze, te da je s tim u vezi potrebno da simulator djeluje u skladu sa predloženim modelom, a da se rezultati koje daje podvrgavaju distribucijama (anvelope i faze) koje će biti izvedene.

4. Tip istraživanja i metodologija istraživanja

Metodologija istraživanja će imati kombinovani karakter teorijske analize i *software*-ske simulacije.

Sam metodološki pristup će ovisiti o segmentu istraživanja. Teorijska analiza u ovom radu ima pretežno induktivni karakter, a bazirana je na matematičkom modeliranju. S druge strane, segment istraživanja koji se tiče verifikacije odnosi se na *software*-sku simulaciju.

5. Očekivani izvorni naučni doprinos disertacije

Originalna autorova tendencija, koja treba da obilježi disertaciju i koja predstavlja očekivani naučni doprinos je:

prijedlog novog analitičko-stohastičkog modela egzaktnih distribucija anvelope i faze signala u prisustvu *multipath* fadinga.

6. Popis polazne literature

- [1] P.A. Bello, "Characterization of Random Time-Variant Linear Channels," IEEE Transactions on Communications Systems, pp. 360–393, Dec 1963.
- [2] Ezio Biglieri, John Proakis, Shlomo Shamai (Shitz), "Fading Channels: Information-Theoretic and Communications Aspects", IEEE Transactions on Information Theory, Vol. 44, No. 6, pp. 2619-2692, Oct. 1998
- [3] W. Weibull, "A statistical distribution function of wide applicability," Appl. Mech. J., no. 27, 1951.
- [4] M. Nakagami, „The m-distribution – A general formula of intensity distribution of rapid fading“, in Statistical Methods in Radio Wave Propagation, Oxford, U.K., Pergamon Press, 1960., pp. 3-36.

- [5] Gregory D. Durgin, "Theory of Stochastic Local Area Channel Modeling for Wireless Communications", Final Dissertation for the degree of Doctor of Philosophy in Electrical Engineering, Faculty of the Virginia, Polytechnic Institute and State University, USA, Dec. 2000
- [6] Gregory D. Durgin, Theodore S. Rappaport, David A. de Wolf, "New Analytical Models and Probability Density Functions for Fading in Wireless Communications", IEEE Transactions on Communications, VOL. 50, NO. 6, pp. 1005-1015, JUNE 2002
- [7] Ali Abdi, Homayoun Hashemi, Said Nader-Esfahani, "On the PDF of the Sum of Random Vectors", IEEE Transactions on Communications, Vol. 48, No. 1, pp. 7-12, Jan. 2000
- [8] S. O. Rice, „Statistical Properties of a Sine Wave Plus Random Noise“, in Bell Systems Tech. Journal, vol. 27, January, 1948., pp. 109-157.
- [9] R. S. Hoyt, „Probability functions for the modulus and angle of the normal complex variate“, in Bell Systems Tech. Journal, vol. 26, April, 1947., pp. 318-359.
- [10] P. Beckmann, A. Spizzichino, „The Scattering of Electromagnetic Waves from Rough Surfaces“, drugo izdanje, Boston, MA, Artech House, 1987.
- [11] V. I. Tihonov, N. K. Kulman, „Non-linear filtration and quasi-coherent signal reception“, Moskva, Sovetskoye Radio, 1975.
- [12] T. S. Rappaport, „Wireless Communications: Principles and Practice“, drugo izdanje, Upper Saddle River, NJ, PTR Prentice-Hall, 2002.
- [13] G. L. Stuber, „Principles of Mobile Communications“, drugo izdanje, Norwell, MA, Kluwer Academic Publishers, 2001.
- [14] A. Goldsmith, „Wireless Communications“, New York, NY, Cambridge University Press, 2005.
- [15] M. K. Simon, M.-S. Alouini, „Digital Communication over Fading Channels“, drugo izdanje, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2005.
- [16] W. C. Y. Lee, Mobile Communications Engineering Theory And Applications, New York, NY, McGraw-Hill, 1998
- [17] J.D. Parsons , The Mobile Radio Propagation Channel, Chichester, UK, John Wiley & Sons, 2000
- [18] W. C. Jakes, "Microwave Mobile Communications", John Wiley & Sons, New York, 1974
- [19] Matthias Pätzold, "Mobile Fading Channels", West Sussex, England, John Wiley & Sons, 2002
- [20] Andreas F. Molisch, "Wireless Communications", Second Edition, West Sussex, UK, John Wiley & Sons, 2011
- [21] A. F. Molisch, J. Laurila, A. Kuchar, "Geometry-based stochastic model for mobile radio channels with directional component", in Symposium on Intelligent Antenna Technology for Mobile Communications, (1998).
- [22] A. Molisch, M. Steinbauer, H. Asplund, "Virtual Cell Deployment Areas" and "Cluster Tracing" - new methods for directional channel modeling in microcells", in Proc. of the IEEE 55th Vehicular Technology Conference", vol. 3 (2002), 1279 - 1283.
- [23] H. Asplund, A. F. Molisch, M. Steinbauer, N. Mehta, "Clustering of scatterers in mobile radio channels - Evaluation and modeling in the COST259 directional channel model", in Proc. of the IEEE International ICC, vol. 2 (2002), 901 - 905.

- [24] R. Heddergott, P.E. Leuthold, „An extension of stochastic radio channel modeling considering propagation environments with clustered multipath components“, in IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Volume 51 , Issue 8, 2003, pp. 1729 – 1739
- [25] A. F. Molisch, H. Asplund, R. Heddergott, M. Steinbauer, T. Zwick, "The COST259 Directional Channel Model-Part I: Overview and Methodology", IEEE Transactions on Wireless Communications, 12 (2006), vol. 5; 3421-3433.
- [26] H. Asplund, A. Glazunov, A. F. Molisch, K.I. Pedersen, M. Steinbauer, "The COST 259 Directional Channel Model-Part II: Macrocells", IEEE Transactions on Wireless Communications, 12 (2006), vol. 5; 3434-3450.
- [27] Marvin R. Arias, Bengt Manderson, "Clustering Approach for Geometrically Based Channel Model in Urban Environments", IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters, VOL. 5, pp. 290-293, 2006
- [28] M. D. Yacoub „The κ - μ Distribution and the η - μ Distribution“, in IEEE Antennas and Propagation Magazine, Vol. 49, No. 1, February 2007, pp. 68 – 81.
- [29] M. D. Yacoub, G. Fraidenreich, „The Symmetrical η - κ Distribution: A General Fading Distribution“, in IEEE Transactions on Broadcasting, vol. 51, No. 5, December, 2005., pp. 504-511.
- [30] M. D. Yacoub, G. Freidenraich, „Generalized η - κ Distribution“, School of Electrical and Computer Engineering – Unicamp, Tech. Rep., January, 2000.
- [31] M. D. Yacoub, G. Freidenraich, H. B. Tercius, F. C. Martins, „The asymmetrical η - κ distribution“, in IEEE IWT – Int. Workshop on Telecommunications, Brazil, August, 2004.
- [32] G. Fraidenraich, M. D. Yacoub, „The λ - μ general fading distribution“, in Proc. of SBMO/IEEE MTT-S International Conference on Microwave and Optoelectronics, September, 2003., pp. 49-54.
- [33] A. K. Papazafeiropoulos, S. A. Kotsopoulos, „The η - λ - μ : A General Fading Distribution“, in Proc. of IEEE Global Telecommunications Conference, November, 2009., pp. 1-4.
- [34] Mirza Milišić, „Neki aspekti poopštavanja modela multipath fedinga s ciljem poboljšanja evaluacije performansi prijemnika“, magistarski rad urađen na Elektrotehničkom fakultetu, Univerziteta u Sarajevu, 2011. godine
- [35] Jing Liang, Qilian Liang, “Outdoor Propagation Channel Modeling in Foliage Environment“, in IEEE Transactions on Vehicular Technology, Vol. 59, No. 5, June 2010, pp. 2243-2252
- [36] Matthias Pätzold, "Mobile Fading Channels", West Sussex, England, John Wiley & Sons, 2002