

UTICAJ LASERSKOG FAZNOG ŠUMA I INTEZITETSKOG ŠUMA NA PERFORMANSE KOHERENTNOG OPTIČKOG FSK PRIJEMNIKA

Goran T. Đorđević¹, Milan S. Marković²

¹Elektronski fakultet u Nišu

²INTEL-CO, Novi Sad

I UVOD

Bez obzira na dosadašnju nesumnjivu dominaciju u praktičnoj primeni optičkih telekomunikacionih sistema sa intezitetskom modulacijom i direktnom detekcijom (IM/DD - Intensity Modulation/Direct Detection) nad koherentnim optičkim telekomunikacionim sistemima, pre svega zbog manje složenosti prijemnika, poglavlja posvećena koherentnim optičkim telekomunikacionim sistemima su nezaobilazni delovi mnogih univerzitetskih udžbenika, [1-4]. Takođe, zbog svoje superiornosti u performansama nad IM/DD sistemima (zahtevani nivo signala na ulazu prijemnika koherentnog sistema je za oko 20 dB niži nego kod prijemnika sa intezitetskom modulacijom i direktnom detekcijom, [5]), ovi sistemi su predmet velikog broja naučnih istraživanja, [5-9].

Jedna od nezaobilaznih smetnji, koja se javlja u koherentnim optičkim sistemima i utiče na njihove performanse, predstavlja laserski fazni šum, koji je posledica spontane emisije svetlosti u laserima na predaji i prijemu, pa se zbog toga ova smetnja matematički modeluje pomoću slučajne promenljive faze optičkog signala, pri čemu trenutne vrednosti ove faze imaju Gaussovu funkciju gustine raspodele verovatnoće nulte srednje vrednosti i određene varijanse, [3-6].

Još jedan negativni efekat je promenljiva amplituda optičkog signala koji pobuđuje fotodetektor u prijemniku (intezitetski šum). Promene amplitude mogu biti posledica više efekata: pre svega, javlja se tkzv. intezitetski šum lasera, tj. izračena snaga lasera nije konstantna, već se menja u opsegu od -150 dBm/Hz do -130 dBm/Hz, [4]; zatim, promene faze optičkog signala mogu se konvertovati u promene inteziteta svetlosti [9]; takođe, na konektorima, pogotovo onima koji se nalaze na malom rastojanju od prijemnika, moguće je da nastanu paraziti modovi, koji u potpunosti ne "odu" u omotač pre nego što stignu do prijemnika, [10]. Zbog mnogobrojnih uticaja koji mogu dovesti do slučajne promene amplitude optičkog signala koji pobuđuje fotodetektor u prijemniku, ove slučajne promene amplitude signala su opisane korišćenjem modela predstavljenog u [3].

Uzimajući u obzir napred navedene smetnje, kao i termički šum prijemnika, izvedeni su analitički izrazi za verovatnoću greške za koherentni heterodinski optički prijemnik FSK (Frequency Shift Keying) signala, i to za slučajevne sinhronne i asinhronne demodulacije. Na osnovu ovih izraza dobijeni su odgovarajući numerički rezultati.

II MODEL SISTEMA

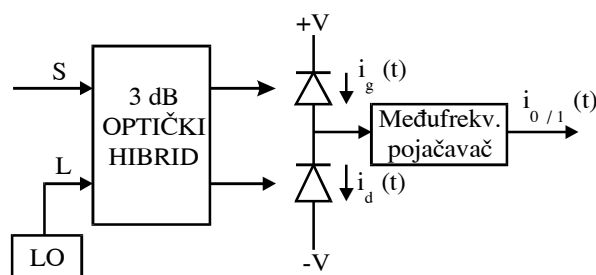
Signal optičkog nosioca koji pobuđuje optički hibrid na ulazu prijemnika (slika 1(a)), u slučaju da je poslata binarna nula, odnosno binarna jedinica, može se predstaviti, redom, analitičkim izrazima

$$S = \sqrt{P_s} (1 + m) \cos(\omega_{s0} t + \varphi_s(t)),$$

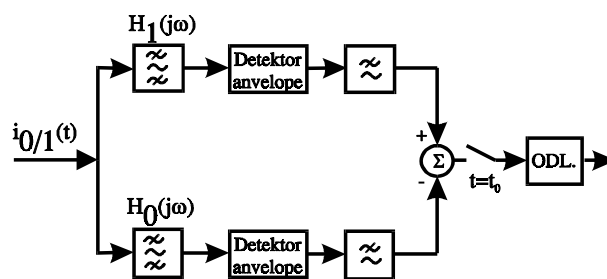
$$S = \sqrt{P_s} (1 + m) \cos(\omega_{s1} t + \varphi_s(t)),$$

dok se signal lokalnog oscilatora, koji pristiže na drugi ulaz optičkog hibrida, može predstaviti pomoću

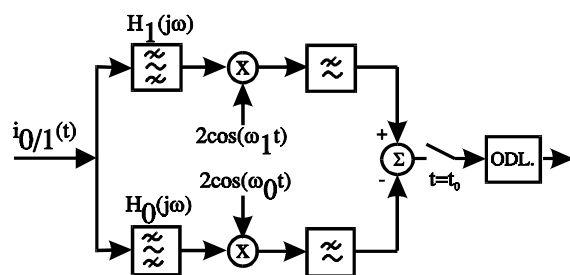
$$L = \sqrt{P_L} \cos(\omega_L t + \varphi_L(t)).$$



(a) Model optičkog prijemnika



(b) Asinhrona demodulacija FSK signala



(c) Sinhrona demodulacija FSK signala

Slika 1. Model prijemnika

P_s je snaga dolazećeg optičkog signala. ω_{s0} i ω_{s1} su kružne učestanosti dolazećeg optičkog signala u kojima je, redom, zapisana informacija o tome da li je poslata binarna nula ili binarna jedinica. $\varphi_s(t)$ i $\varphi_L(t)$ predstavljaju, redom, faze dolazećeg optičkog signala i signala lokalnog lasera, a posledica su spontane emisije svetlosti, [3-4], [6-8]. Amplituda dolazećeg optičkog signala $\sqrt{P_s}(1+m)$ je promenljiva veličina, pri čemu je m Gaussova slučajna

promenljiva čija je srednja vrednost nula i varijansa σ_m^2 (funkcija gustine raspodele verovatnoće slučajne promenljive m je označena sa $p_m(m)$), [3]. Signal sa izlaza optičkog hibrida pobuđuje dve fotodiode, koje konvertuju struju fotona u električnu struju. Nakon pojačanja pomoću međufrekvencijskog pojačavača, [1], signal koji se vodi u klasičan FSK prijemnik je oblika

$$i_0(t) = A(1+m)\cos(\omega_0 t + \varphi(t)) + n(t) \quad (1a)$$

ukoliko je poslata binarna nula, i

$$i_1(t) = A(1+m)\cos(\omega_1 t + \varphi(t)) + n(t) \quad (1b)$$

ukoliko je poslata binarna jedinica, pri čemu je: $A = K_{IF} R \sqrt{P_S P_L}$, (R je koeficijent konverzije fotodiode, a K_{IF} je pojačanje međufrekvencijskog pojačavača); $\varphi(t) = \varphi_S(t) - \varphi_L(t)$ je fazni šum, čije trenutne vrednosti imaju Gaussovu funkciju gustine raspodele nulte srednje vrednosti i varijanse σ_φ^2 (ova funkcija gustine raspodele verovatnoće je označena sa $p_\varphi(\varphi)$), [3-6]; $\omega_0 = \omega_{S0} - \omega_L$, $\omega_1 = \omega_{S1} - \omega_L$. $n(t)$ je termički šum, čije trenutne vrednosti, pod određenim uslovima uglavnom ispunjenim u praksi, imaju takođe Gaussovu funkciju gustine raspodele verovatnoće ($p_n(n)$) nulte srednje vrednosti i varijanse σ^2 , [1-4], [6-8].

III PERFORMANSE SISTEMA

U slučaju asinhronne demodulacije FSK signala, signal $i_0(t)$, odnosno signal $i_1(t)$, najpre se pojačava međufrekvencijskim pojačavačem, a zatim se vrši njegova demodulacija pomoću klasičnog asinhronog kola za demodulaciju (slika 1(b)), [1], [11], i na kraju detekcija. Korišćenjem klasičnih postupaka razvijenim u Teoriji telekomunikacija, a izuzetno jasno predstavljenim u [1], [11], i pod određenim uslovima navedenim u ovim referencama, izraz za verovatnoću greške pri asinhronoj demodulaciji posmatranog signala i pod pomenutim uslovima, je

$$P_{eN} = \frac{1}{2} \int_m e^{-0.5\rho^2(1+m)^2} p_m(m) dm, \quad (2)$$

pri čemu je ρ^2 odnos signal/šum, dat pomoću

$$\rho^2 = \frac{A^2}{2\sigma^2}. \quad (3)$$

Nije naodmet naglasiti da vrednost faznog šuma uopšte ne utiče na verovatnoću greške pri asinhronoj demodulaciji optičkog signala.

U slučaju kada je amplituda optičkog signala konstantna ($m=0$), izraz za verovatnoću greške se svodi na

$$P_{eN} = \frac{1}{2} e^{-0.5\rho^2}. \quad (4)$$

U slučaju sinhronne demodulacije, električni signal se nakon pojačanja na međufrekvenciji vodi u kolo za sinhronu demodulaciju FSK signala prikazano na slici 1(c), na čijem kraju se vrši odlučivanje. Takođe, na sličan način kao što je predstavljeno u [1], [11], dobija se sledeći izraz za verovatnoću greške

$$P_{eK} = \frac{1}{2} \int_m \int_\varphi \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\rho^2} \frac{(1+m)\cos\varphi}{\sqrt{2}}\right) p_\varphi(\varphi) p_m(m) d\varphi dm \quad (5)$$

pri čemu je $\operatorname{erfc}(\cdot)$ komplementarna funkcija greške, definisana pomoću

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2} dt.$$

U slučaju ako se zanemari uticaj faznog šuma, izraz za verovatnoću greške postaje

$$P_{eK} = \frac{1}{2} \int_m \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\rho^2} \frac{(1+m)}{\sqrt{2}}\right) p_m(m) dm, \quad (6)$$

a kada se sem laserskog faznog šuma, zanemari i intezitetski šum, izraz za verovatnoću greške se znatno uprošćava i postaje

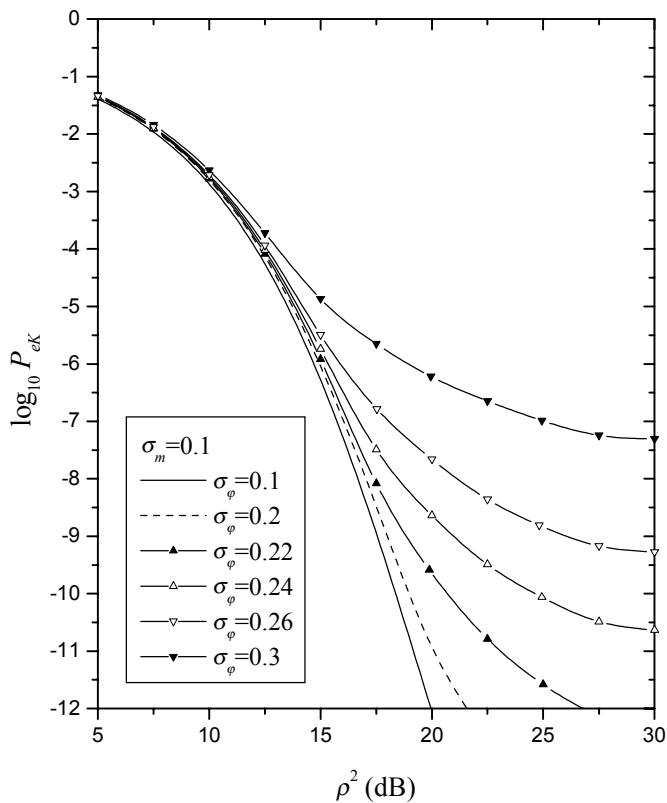
$$P_{eK} = \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\rho^2/2}\right). \quad (7)$$

IV NUMERIČKI REZULTATI

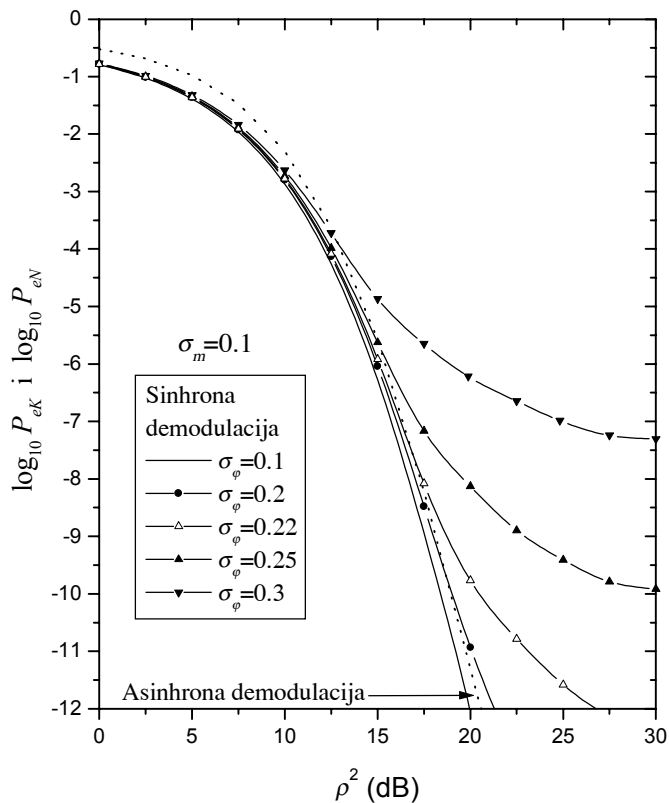
Korišćenjem prethodno izvedenih izraza, dobijeni su odgovarajući numerički rezultati za posmatrane modele sistema.

Na slici 2 su prikazane zavisnosti verovatnoće greške P_{eK} od odnosa signal/šum ρ^2 za različite vrednosti standardne devijacije σ_φ laserskog faznog šuma i stalnu vrednost standardne devijacije σ_m slučajne promenljive m za slučaj sinhronne demodulacije. Sa slike se jasno može sagledati uticaj laserskog faznog šuma (preko promene vrednosti standardne devijacije σ_φ) na performanse prijemnika.

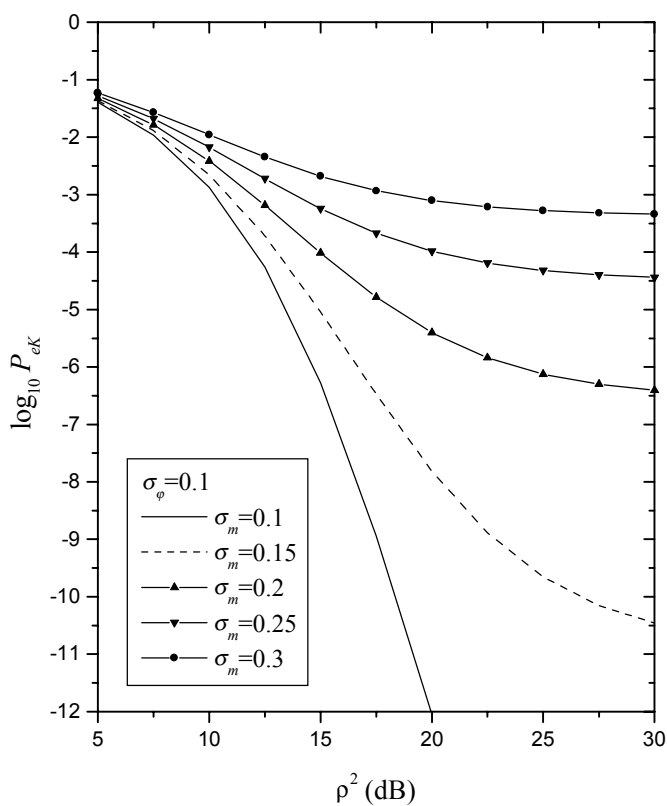
Na slici 3 su prikazane zavisnosti verovatnoće greške P_{eK} od odnosa signal/šum ρ^2 za različite vrednosti standardne devijacije σ_m slučajne promenljive m i stalnu vrednost standardne devijacije laserskog faznog šuma σ_φ za slučaj sinhronne demodulacije, odakle se može sagledati uticaj promena amplitude (tj. intezitetskog šuma) na vrednost verovatnoće greške. Uticaj ovih promena amplitude signala može se videti i iz tabela 1 i 2. Iz tabele 1 treba zapaziti da je potrebna veća vrednost odnosa signal/šum da bi se postigla verovatnoća greške 10^{-9} ukoliko je standardna devijacija promenljive m veća, tj. ukoliko je kriva funkcije gustine raspodele promenljive m (koja utiče na promene amplitude) raširenija. Iz tabele 2 proizilaze sasvim slični zaključci, tj. za fiksiranu vrednost odnosa signal/šum ρ^2 postiže se veća verovatnoća greške (performanse prijemnika su gore) ukoliko je vrednost standardne devijacije σ_m slučajne promenljive m veća.



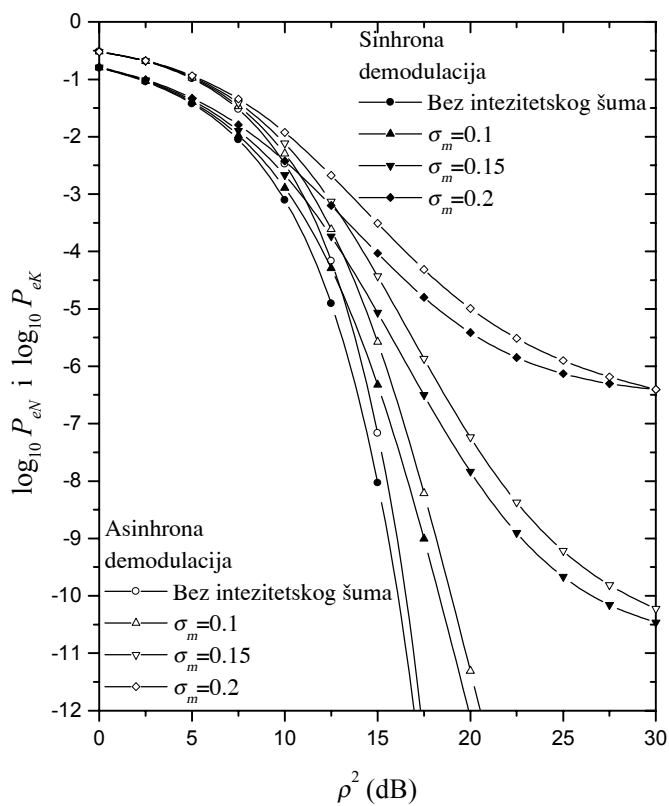
Slika 2. Performanse koherentnog optičkog heterodinskog sinhronog FSK prijemnika u prisustvu laserskog faznog šuma i intezitetskog šuma



Slika 4. Poređenje performansi koherentnog optičkog heterodinskog sinhronog i asinhronog prijemnika u prisustvu laserskog faznog šuma i intezitetskog šuma



Slika 3. Performanse koherentnog optičkog heterodinskog sinhronog FSK prijemnika u prisustvu laserskog faznog šuma i intezitetskog šuma



Slika 5. Poređenje performansi koherentnog optičkog heterodinskog sinhronog i asinhronog FSK prijemnika u prisustvu intezitetskog šuma

Na slikama 4 i 5 data su poređenja performansi koherentnog heterodinskog asinhronog i sinhronog FSK prijemnika. U tabeli 3 su prikazane potrebne vrednosti odnosa signal/šum za postizanje verovatnoće greške 10^{-9} u prisustvu promenljive amplitude signala, za slučaj asinhronog i sinhronog demodulacije.

Tabela 1. Potrebne vrednosti odnosa signal/šum ρ^2 (dB) kod sinhronog demodulacije da bi se dostigla verovatnoća greške $P_{eK}=10^{-9}$, za različite vrednosti standardne devijacije σ_m u slučaju kada je laserski fazni šum zanemaren

σ_m	0.05	0.1	0.11	0.12
ρ^2 (dB)	15.99	17.50	18.04	18.75
σ_m	0.13	0.14	0.15	0.16
ρ^2 (dB)	19.64	20.93	22.80	26.63

Tabela 2. Vrednosti verovatnoće greške P_{eK} za odnos signal/šum $\rho^2=20$ dB kod sinhronog demodulacije za različite vrednosti standardne devijacije σ_m u slučaju kada je laserski fazni šum zanemaren

σ_m	0.1	0.11	0.12	0.13
P_{eK}	7.7E-13	8.7E-12	7.7E-11	5.4E-10
σ_m	0.14	0.15	0.17	0.2
P_{eK}	3.1E-9	1.5E-8	2.0E-7	3.94E-6

Tabela 3. Potrebne vrednosti odnosa signal/šum kod sinhronog ρ_K^2 (dB) i asinhronog demodulacije ρ_N^2 (dB) da bi se dostigla verovatnoća greške 10^{-9} , za različite vrednosti standardne devijacije σ_m u slučaju kada je laserski fazni šum zanemaren

σ_m	0.05	0.1	0.15	0.16
ρ_K^2 (dB)	16.0	17.5	22.8	26.6
ρ_N^2 (dB)	16.5	18.2	24.4	28.9

V ZAKLJUČAK

Za prethodno predstavljen model koherentnog optičkog heterodinskog asinhronog i sinhronog FSK prijemnika izvedeni su izrazi za izračunavanje verovatnoće greške uzimajući u obzir intezitetski šum, laserski fazni šum i termički šum. Na osnovu izvedenih izraza dobijeni su i prikazani numerički rezultati na osnovu kojih se eksplicitno vidi uticaj gore navedenih pojava. Kao osnovni zaključak može se navesti da su performanse koherentnog heterodinskog asinhronog FSK prijemnika čak i bolje od performansi koherentnog heterodinskog sinhronog FSK prijemnika u prisustvu laserskog faznog šuma (slika 4). Takođe, ako se posmatra samo uticaj promenljive amplitude signala na performanse sistema (slika 5) može se zapaziti da se za $\sigma_m=0.2$ pri odnosu signal/šum $\rho^2=30$ dB, verovatnoća greške i za asinhronog i sinhronog demodulator iste. Iz tabele 3 može se zapaziti da je potreban vrlo malo viši odnos signal/šum kod asinhronog prijemnika nego kod sinhronog da bi se dostigla ista verovatnoća greške, i to ne uzimajući u obzir laserski fazni šum. Imajući sa jedne strane ove rezultate u vidu, a sa druge strane veću složenost sinhronog prijemnika od asinhronog, jasno je da je u optičkom telekomunikacionom sistemu gde su ispoljeni uticaji laserskog faznog šuma i intezitetskog šuma, opravdanije koristiti asinhronog FSK prijemnik.

LITERATURA

- [1] A. Marinčić, *Optičke telekomunikacije*, Univerzitet u Beogradu, Beograd, 1997.
- [2] M. Cvijetić, *Digitalne svetlovodne telekomunikacije*, Naučna knjiga, Beograd, 1989.
- [3] M. Stefanović, D. Drača, *Performanse optičkih telekomunikacionih sistema*, Elektronski fakultet, Niš, 2002.
- [4] L. Kazovsky, S. Benedetto, A. Willner, *Optical Fiber Communication Systems*, Artech House, Boston - London, 1996.
- [5] A. Marinčić, "Kablovska televizija u svetu i Srbiji", Stručni seminari, Zbornik izlaganja, *3rd International Conference on Telecommunications in Modern Satellite, Cable and Broadcasting Services (TELSIKS'97)*, str. 1-12, Nis, 1997.
- [6] J. R. Barry, E. A. Lee, "Performance of Coherent Optical Receivers", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 78, No. 8, pp. 1369-1393, August 1990.
- [7] M. Č. Stefanović, I. B. Djordjević, G. T. Djordjević, J. V. Basta, "Heterodyne Optical PSK Receiver Performance in Multichannel Environment", *Journal of optical communications*, Vol. 20, No. 1, pp. 12-15, February 1999.
- [8] I. B. Djordjević, M. Č. Stefanović, S. Ilić G. T. Djordjević, "An Example of Hybrid System: Coherent Optical System with Costas Loop in Receiver - System for Transmission in Baseband", *A Joint IEEE/OSA Publication Journal of Lightwave Technology*, Vol. 16, NO. 2, pp. 177-183, February 1998.
- [9] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, Academic Press, Inc., Boston, 2002.
- [10] P. M. Shankar, "Bit Error Rate Degradation Due to Modal Noise in Single-Mode Fiberoptic Communication Systems", *Journal of Optical Communications*, Vol 10, No. 1, pp. 19-23, 1989.
- [11] G. Lukatela, *Statistička teorija telekomunikacija i teorija informacija*, Građevinska knjiga, Beograd, 1981.

Sadržaj: U radu je predstavljena analiza koherentnog heterodinskog optičkog asinhronog i sinhronog FSK prijemnika u prisustvu laserskog faznog šuma, slučajnih promena amplitude optičkog signala i šot šuma. Na osnovu izvedenih analitičkih izraza za određivanje verovatnoće greške, dobijeni su odgovarajući numerički rezultati, koji su prikazani u radu. Napravljena su poređenja performansi između sinhronog i asinhronog FSK prijemnika uzimajući u obzir prethodno navedene smetnje.

Abstract: This paper presents the analysis of coherent heterodyne optical asynchronous and synchronous frequency-shift keying (FSK) receiver performance in the presence of laser phase noise, intensity noise and thermal noise. On the basis of the previously derived analytical expressions for error probability, the corresponding numerical results are presented and the comparison is made between synchronous and asynchronous FSK receivers in the presence of previously mentioned influences.

INFLUENCE OF LASER PHASE NOISE AND INTENSITY NOISE ON COHERENT OPTICAL FSK RECEIVER PERFORMANCE

Goran T. Đorđević, Milan S. Marković