

Koherentna detekcija MPSK signala u prisustvu intezitetskog šuma i laserskog faznog šuma

Bojana Z. Nikolić, Goran T. Đorđević, Ivan B. Đorđević, Mihajlo Č. Stefanović

Sadržaj — Analiziran je koherentni optički prijemnik višenivoskih PSK (Phase-Shift Keying) signala uzimajući u obzir termički šum prijemnika, intezitetski šum i laserski fazni šum. Cilj rada je da se pokaže da je i u današnjim optičkim sistemima, koji podržavaju prenos informacija velikim brzinama, nezanemarljiv uticaj laserskog faznog šuma u kombinaciji sa intezitetskim šumom na vrednosti verovatnoće greške po bitu ukoliko se koristi PSK modulacija sa više faznih nivoa. Svi numerički rezultati su dobijeni, kako analitičkim, tako i simulacionim pristupom.

Ključne reči — Intezitetski šum, koherentni optički sistemi, laserski fazni šum, MPSK, verovatnoća greške.

I. UVOD

AMPLITUDA optičkog signala koji pobuđuje fotodetektor u prijemniku se menja kao posledica više efekata. Pre svega, izračena snaga lasera nije konstantna, već se menja u ospegu od -150 dBm/Hz do -130 dBm/Hz i oaj efekat je poznat kao intezitetski šum lasera [1]. Zatim, promene faze optičkog signala mogu se konvertovati u promene inteziteta svetlosti [2]. 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, [3]. 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 [4].

U koherentnim optičkim sistemima laserski fazni šum je posledica spontane emisije svetlosti u laserima na predaji i prijemu. Ovaj šum se matematički modeluje pomoću slučajne promenljive faze optičkog signala, pri čemu trenutne vrednosti ove faze imaju Gaussovu funkciju gustine verovatnoće nulte srednje vrednosti i određene varijanse [1],[4-5].

Poznato je da je u današnjim optičkim sistemima, u kojima se koriste binarne modulacije i brzina prenosa je 40 Gb/s i više, uticaj laserskog faznog šuma neznan. Cilj ovog rada je da pokaže da je uticaj ovog šuma čak i za tako velike brzine prenosa informacija znatan ukoliko se

koristi digitalna fazna modulacija sa 8 i 16 nivoa. Uticaj laserskog faznog šuma je posmatran u kombinaciji sa istovremenim uticajem intezitetskog šuma. Numerički rezultati su dobijeni, kako korišćenjem simulacionog, tako i analitičkog pristupa.

II. MODEL SISTEMA I ODREĐIVANJE PERFORMANSI

Model prijemnika, koji se razmatra, prikazan je na Sl. 1. Korisni optički signal koji pobuđuje hibrid na ulazu prijemnika je

$$S = \sqrt{P_s} (1 + m(t)) \cos(\omega_s t + \phi_i(t) + \varphi_s(t)), \quad (1)$$

a signal lokalnog oscilatora, koji se dovodi na drugi ulaz optičkog hibrida, može se predstaviti u obliku

$$L = \sqrt{P_L} \cos(\omega_L t + \varphi_L(t)). \quad (2)$$

Snaga dolazećeg optičkog signala označena je sa P_s , dok ω_s predstavlja kružnu učestanost nosioca. Informacija o poslatom simbolu prenosi se promenama u fazi $\phi(t)$, koja u okviru digitskog intervala može uzeti jednu iz skupa vrednosti $\{0, 2\pi/M, \dots, 2\pi(i-1)/M, \dots, 2\pi(M-1)/M\}$, pri čemu je M broj faznih nivoa. Faze dolazećeg optičkog signala i signala lokalnog oscilatora, koje su posledica spontane emisije svetlosti, označene su redom sa $\varphi_s(t)$ i $\varphi_L(t)$. Kao što se može zapaziti, amplituda dolazećeg optičkog signala $\sqrt{P_s} (1 + m(t))$ je promenljiva, pri čemu je $m(t)$ Gaussov proces čija je srednja vrednost nula i varijansa σ_m^2 , [4]. Funkcija gustine verovatnoće trenutnih vrednosti slučajnog procesa $m(t)$ je označena sa $p_m(m)$. Nakon pojačanja pomoću međufrekvencijskog pojačavača, signal koji se vodi u klasičan prijemnik PSK signala je oblika

$$i(t) = A(1 + m(t)) \cos(\omega_0 t + \phi_i(t) + \varphi(t)) + n(t) \quad (3)$$

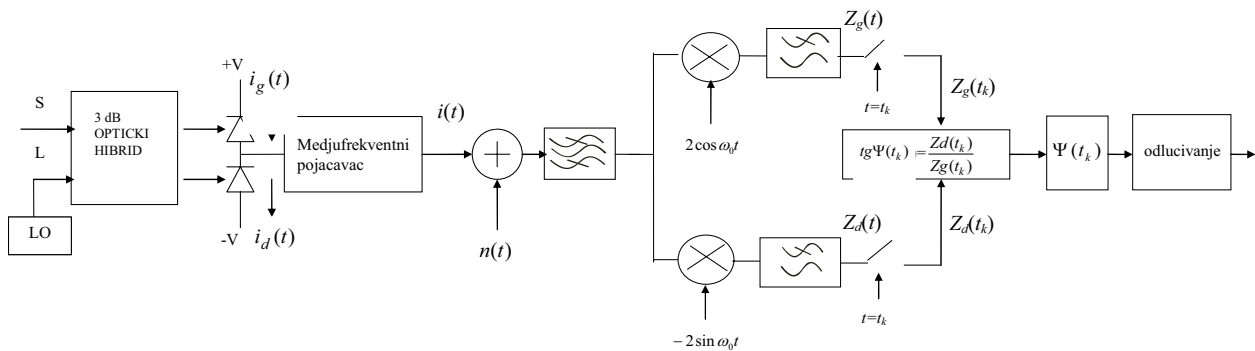
pri čemu je $A = K_{IF} R \sqrt{P_S P_L}$, R je koeficijent konverzije fotodiode, a K_{IF} je pojačanje međufrekvencijskog pojačavača. Kružna učestanost ω_0 je $\omega_0 = \omega_s - \omega_L$. Fazni šum je $\varphi(t) = \varphi_s(t) - \varphi_L(t)$. Njegove trenutne vrednosti imaju Gaussovu funkciju gustine verovatnoće nulte srednje vrednosti i varijanse σ_φ^2 [1],[4]-[6]. Funkcija gustine verovatnoće faznog šuma je označena sa $p_\varphi(\varphi)$.

B. Z. Nikolić, Elektronski fakultet u Nišu, Srbija (telefon: 381-18-529304; faks: 381-18-588399; e-mail: bojanajunior@yahoo.com).

G. T. Đorđević, Elektronski fakultet u Nišu, Srbija (telefon: 381-18-529304; faks: 381-18-588399; e-mail: goran@elfak.ni.ac.yu).

I. B. Đorđević, Department of Electrical and Computer Engineering, University of Arizona, Tucson, AZ 85721, USA (e-mail: ivan@ece.arizona.edu).

M. Č. Stefanović, Elektronski fakultet u Nišu, Srbija (telefon: 381-18-529424; faks: 381-18-588399; e-mail: misa@elfak.ni.ac.yu).



Sl. 1. Model koherentnog optičkog prijemnika za MPSK signale

Varijansa faznog šuma je [1]

$$\sigma_{\varphi}^2 = 2\pi\Delta\nu T, \quad (4)$$

gde je $\Delta\nu$ širina linije lasera, a T je trajanje jednog simbola, koje je sa simboleskom brzinom R_s tj. bitskom brzinom R_b povezano na sledeći način:

$$T = \frac{1}{R_s} = \frac{1}{R_b / \log_2 M}. \quad (5)$$

Termički šum u izrazu (3) označen je sa $n(t)$. Njegove trenutne vrednosti, pod određenim uslovima uglavnom ispunjenim u praksi, imaju takođe Gaussovu funkciju gustine verovatnoće $p_n(n)$ nulte srednje vrednosti i varijanse σ^2 , [1-8].

Posle demodulacije, signali u gornjoj i donjoj grani prijemnika na izlazu filtra propusnika niskih učestanosti su

$$i_g(t) = A(1 + m(t))\cos(\phi_i(t) + \varphi(t)) + x_g(t), \quad (6)$$

$$i_d(t) = A(1 + m(t))\sin(\phi_i(t) + \varphi(t)) + x_d(t), \quad (7)$$

gde su $x_g(t)$ i $x_d(t)$ Gaussovi slučajni procesi čija je srednja vrednost nula i varijansa σ^2 . U gornjoj i donjoj grani prijemnika ovi signali se odmeravaju u trenucima t_k , pri čemu su trenuci t_k na sredini digitskog intervala. Na osnovu ovih odmerenih signala $i_g(t_k)$ i $i_d(t_k)$ određuje se faza signala

$$\tan \Psi(t_k) = i_d(t_k) / i_g(t_k). \quad (8)$$

Na osnovu vrednosti faze $\Psi(t_k)$ određuje se koji simbol je poslat od strane predajnika. Zatim se automatski vrši i detekcija bita poslanih od strane predajnika. Pri tome se ima u vidu da je na predaji primenjen Grayov kod.

Na osnovu onoga što je do sada rečeno napravljen je simulacioni model za određivanje verovatnoće greške po bitu (BER), verovatnoće greške po simbolu (SER) i aproksimativne verovatnoće greške po bitu ($ABER$)

$$ABER = SER / \log_2 M. \quad (9)$$

Verovatnoća greške se može odrediti i na osnovu analitičkog pristupa. Signal $i(t)$ dat izrazom (3) može se predstaviti preko ekvivalentne anvelope i faze u obliku

$$i(t) = r(t)\cos(\omega_0 t + \Psi(t)). \quad (10)$$

Može se pokazati, ako se za trenutak bez gubitka opštosti pretpostavi da je poslat simbol koji odgovara faznom nivou $\phi_k(t)=0$, da je uslovna funkcija gustine verovatnoće faze ovog kompozitnog signala data pomoću

$$p_{\Psi/m,\varphi}(\Psi/m,\varphi) = \frac{1}{2\pi} \exp\left(\frac{-A^2(1+m)^2}{2\sigma^2}\right) + \frac{A(1+m)\cos(\Psi-\varphi)}{2\sqrt{2\pi}\sigma} \cdot \exp\left(\frac{-A^2(1+m)^2 \sin^2(\Psi-\varphi)}{2\sigma^2}\right) \cdot \left(2 - \operatorname{erfc}\left(\frac{A(1+m)\cos(\Psi-\varphi)}{\sqrt{2}\sigma}\right)\right) \quad (11)$$

pri čemu je $\operatorname{erfc}(\cdot)$ komplementarna funkcija greške, definisana na sledeći način:

$$\operatorname{erfc}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_x^{\infty} e^{-t^2} dt. \quad (12)$$

Funkcija gustine verovatnoće faze kompozitnog signala dobija se usrednjavanjem izraza (11)

$$p_{\Psi}(\Psi) = \int \int p_{\Psi/m,\varphi}(\Psi/m,\varphi) p_{\varphi}(\varphi) p_m(m) d\varphi dm. \quad (13)$$

Verovatnoća greške po simbolu je [9],[10]

$$SER = 1 - \int_{-\pi/M}^{\pi/M} p_{\Psi}(\Psi) d\Psi. \quad (14)$$

Veza između standardne devijacije termičkog šuma σ , broja faznih nivoua M i odnosa energije signala po bitu i spektralne gustine snage termičkog šuma E_b/N_0 u decibelima je

$$\sigma = \frac{A}{\sqrt{2 \cdot \log_2 M \cdot 10^{(E_b/N_0)/10}}}. \quad (15)$$

III. NUMERIČKI REZULTATI

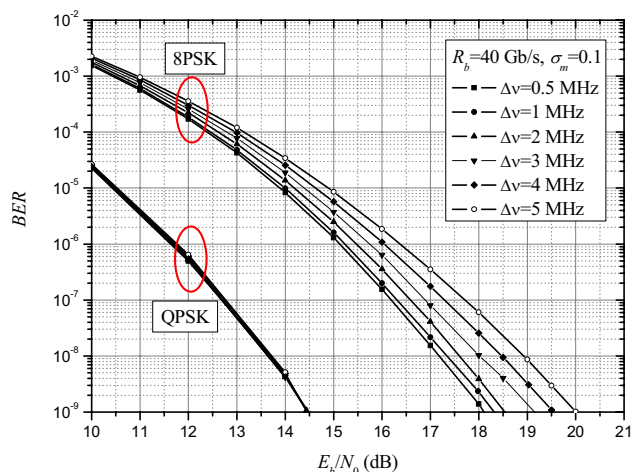
Na osnovu onoga što je rečeno u prethodnom delu određene su performanse razmatranog prijemnika i prikazane su u sledećem delu teksta.

Na Sl. 2 prikazane su zavisnosti BER -a od E_b/N_0 pri detekciji QPSK i 8PSK signala za različite vrednosti širine linije lasera. Vidi se da širina linije lasera tj. laserski fazni šum nema uticaj na vrednosti verovatnoće greške pri detekciji QPSK signala. Međutim ovaj uticaj nije zanemarljiv pri detekciji 8PSK signala. Očigledno je da se $BER=10^{-9}$ postiže za $E_b/N_0=18.1$ dB ako je $\Delta\nu=0.5$ MHz, dok je u slučaju kada je $\Delta\nu=5$ MHz da bi se postigla ista vrednost BER -a potrebno $E_b/N_0=20$ dB. Dakle, zbog laserskog faznog šuma postoji degradacija od 1.9 dB pri ovoj vrednosti BER -a.

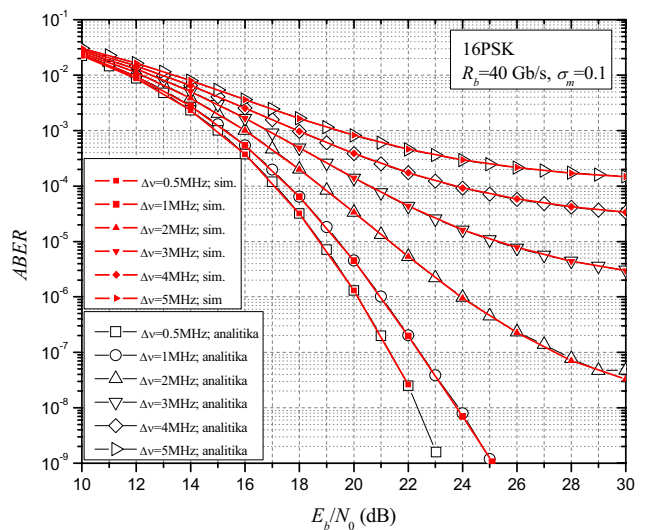
Sl. 3 prikazuje zavisnost aproksimativnog BER -a od E_b/N_0 pri detekciji 16PSK signala. U ovom slučaju je uticaj laserskog faznog šuma još izrazitiji nego kod detekcije 8PSK signala. Može se zapaziti da laserski fazni šum već za $\Delta\nu=2$ MHz izaziva pojavu neotkolonjive verovatnoće greške (BER floor). Na istoj slici su prikazani rezultati dobijeni simulacijom i analitičkim pristupom. Može se uočiti njihovo slaganje.

Na Sl. 4 ilustrovan je uticaj intezitetskog šuma na performanse prijmnika 16PSK signala. Vidi se da i intezitetski šum prouzrokuje pojavu neotkolonjive greške. U slučaju prenosa 16PSK signala, pri vrednosti $BER=10^{-9}$, ako je prisutan intezitetski šum standardne devijacije $\sigma_m=0.1$ mora se platiti kazna od oko $\Delta E_b/N_0=1$ dB u odnosu na slučaj kada ne postoji intezitetski šum. Na slici 4, zajedno sa rezultatima simulacije, prikazani su i rezultati dobijeni analitičkim pristupom, sa ciljem da se pokaže njihovo slaganje.

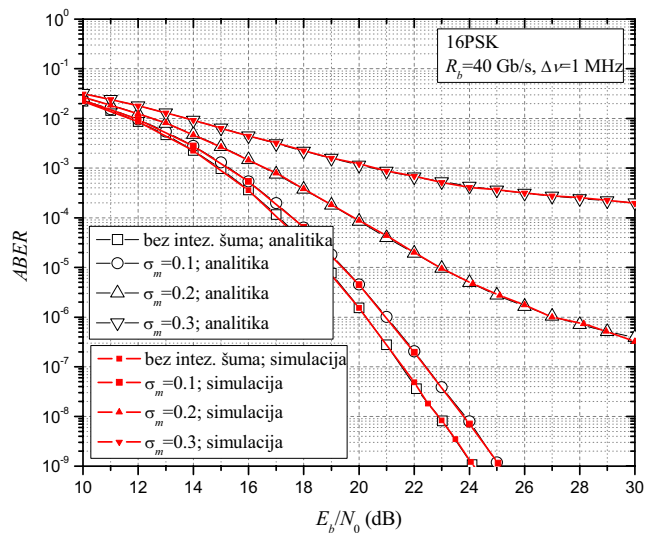
Sl. 5 ilustruje uticaj bitske brzine na vrednosti BER -a. Bitska brzina nema praktično nikakav uticaj na prenos QPSK signala, dok je pri prenosu 8PSK i 16PSK signala njen uticaj primetan. Što je bitska brzina veća, BER je manji tj. performanse sistema su bolje. Za $BER=10^{-9}$, pri prenosu 8PSK signala potrebna je oko 0.3 dB veća vrednost E_b/N_0 pri prenosu signala bitskom brzinom 40 GB nego kada je bitska brzina 100 GB, dok je za prenos 16PSK signala potrebna već nešto više od 2 dB veća vrednost E_b/N_0 .



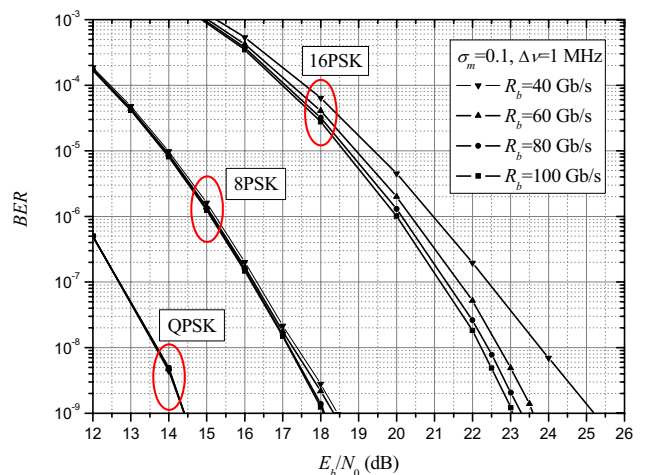
Sl. 2. Performanse prijmnika QPSK i 8PSK signala za različite vrednosti širine linije lasera.



Sl. 3. Performanse prijmnika 16PSK signala za različite vrednosti širine linije lasera.



Sl. 4. Performanse prijmnika 16PSK signala za različite vrednosti standardne devijacije intezitetskog šuma.



Sl. 5. Performanse prijmnika QPSK, 8PSK i 16PSK signala za različite vrednosti bitske brzine.

IV. ZAKLJUČAK

U radu je pokazano da je i u današnjim koherentnim optičkim telekomunikacionim sistemima, koji podržavaju velike brzine prenosa, uticaj laserskog faznog šuma znatan kada se koriste 8PSK i 16PSK modulacioni formati. Pokazano je da kvalitet lasera tj. širina linije lasera u znatnoj meri utiče na vrednosti verovatnoće greške po bitu. Takođe su prikazani i rezultati koji govore o uticaju bitske brzine na vrednosti verovatnoće greške po bitu. Kao i u slučaju uticaja širine linije lasera, i ovde se ne primećuje uticaj bitske brzine na prenos QPSK signala, dok je njen uticaj izražen pri prenosu 8PSK i 16PSK signala. Prikazani su i rezultati koji govore o tome da intenzivni šum može da prouzrokuje priličnu degradaciju performansi i određene su vrednosti neotklonjive greške prouzrokovane ovom pojavom. Postoji dobro slaganje između numeričkih rezultata dobijenih primenom simulacionog i onih rezultata dobijenih primenom analitičkog pristupa.

LITERATURA

- [1] L. Kazovsky, S. Benedetto, A. Willner, *Optical Fiber Communication Systems*, Artech House, Boston - London, 1996.
- [2] G. P. Agrawal, *Nonlinear Fiber Optics*, Academic Press, Inc., Boston, 2002.
- [3] 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.
- [4] M. Stefanović, D. Drača, *Performanse optičkih telekomunikacionih sistema*, Elektronski fakultet, Niš, 2002.
- [5] J. R. Barry, E. A. Lee, "Performance of Coherent Optical Receivers", *Proceedings of the IEEE*, Vol. 78, No. 8, pp. 1369-1393, August 1990.
- [6] A. Marinčić, *Optičke telekomunikacije*, Univerzitet u Beogradu, Beograd, 1997.
- [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. Lukatela, *Statistička teorija telekomunikacija i teorija informacija*, Građevinska knjiga, Beograd, 1981.
- [10] D. B. Drajić, *Uvod u statističku teoriju telekomunikacija*, Akademska misao, Beograd, 2003.

ABSTRACT

Taking the thermal noise, intensity noise and laser phase noise into account, the coherent optical receiver of multilevel PSK (Phase-Shift Keying) signals is analyzed. The aim of the paper is to show that the influence of laser phase noise on bit error probability in detecting multilevel PSK signals is significant in state-of-the-art optical communication systems for high data rate 40 Gb/s and above. Numerical results are obtained both by Monte Carlo simulation and analytically.

COHERENT DETECTION OF MPSK SIGNAL IN THE PRESENCE OF INTENSITY NOISE AND LASER PHASE NOISE

Bojana Z. Nikolić, Goran T. Đorđević,
Ivan B. Đorđević, Mihajlo Č. Stefanović