

Performanse bežičnih optičkih sistema zasnovanih na orbitalnom ugaonom momentu u prisustvu atmosferskih turbulencija

Aleksandar Lazarević, Predrag Ivaniš
Odsek za telekomunikacije i informacione tehnologije
Elektrotehnički fakultet u Beogradu
Beograd, Srbija
aleksandarlazarevic777@gmail.com, predrag.ivanis@etf.rs

Sadržaj—U ovom radu razmotrene su performanse optičkih bežičnih sistema kod kojih se koristi tehnika ortogonalnog signaliziranja zasnovana na orbitalnom ugaonom momentu. Izložen je matematički model i predložen simulacioni model pomoću koga se mogu proceniti performanse optičkog bežičnog sistema. Kako se performanse ovih sistema značajno degradiraju u prisustvu atmosferskih turbulencija, u cilju povećanja pouzdanosti prenosa predložena je primena zaštitnih kodova i prikazani su odgovarajući numerički rezultati dobijeni Monte Karlo simulacijama.

Ključne riječi—bežični optički sistemi, atmosferske turbulencije, orbitalni ugaoni moment, kodovi male gustine provere parnosti.

I. UVOD

Optičke komunikacije u slobodnom prostoru (*Free Space Optical Communications*, FSO) zasnivaju se na prenosu optičkog signala kroz atmosferu čime je moguće obezbediti prenos podataka na značajno ekonomičniji način u odnosu na prenos kroz tradicionalna optička vlakna. Ovakvi sistemi imaju širok opseg primena – od bežičnih komunikacionih linkova kratkog opsega koji obezbeđuju mrežni pristup prenosivim računarima, preko linkova na „poslednjoj milji“ koji spajaju krajnje korisnike sa postojećim sistemom za prenos preko optičkih vlakana, do linkova za laserske komunikacije u kosmosu [1].

U ovom radu biće razmatrani isključivo *outdoor* sistemi koji podrazumevaju usmerene LOS i *point-to-point* laserske linkove od predajnika do prijemnika kroz atmosferu. Pokazalo se da se u FSO komunikacijama na razdaljinama od nekoliko kilometara mogu dostići protoci od nekoliko Gb/s, a pored visokih protoka ovakav sistem omogućava rad u nelicenciranom opsegu, brzu i jednostavnu instalaciju [2]. Posebno će biti razmotreni sistemi kod kojih se vrši prenos kroz proizvoljan broj ortogonalnih modova koristeći tehniku orbitalnog ugaonog momenta (*Orbital Angular Momentum*, OAM).

Međutim, usled promenljivih atmosferskih turbulencija atmosferskih i smetnji do kojih dolazi zbog oblaka, magle, kiše i snega, dolazi do promena intenziteta signala na prijemu,

što odgovara varijaciji nivoa elektromagnetnog polja kod klasičnih bežičnih sistema [3,4].

Navedeni efekti u kombinaciji sa ambijentalnim šumom dovode do degradacije performansi sistema i mogućnosti prekida veze, što za posledicu ima povećanje verovatnoće greške, kašnjenja itd. Stoga je veoma važno na pravi način proceniti mogućnosti za ublažavanje ovih efekata, naročito pri komunikacijama na većim rastojanjima.

U ovom radu će biti razmotrena struktura optičkih predajnika, prijemnika i optičkih linkova. Zatim će biti izložen matematički aparat kojim se mogu opisati šumovi i turbulencije koje se javljaju na bežičnom optičkom linku. Kao glavna tehnika za poboljšanje performansi sistema, biće razmotrena primena kodova male gustine provere parnosti (*Low Density Parity Check*, LDPC) u bežičnim optičkim sistemima. Najzad, biće predstavljeni rezultati za verovatnoću greške do kojih se došlo izvršavanjem Monte Karlo simulacija i biće detaljno komentarisano značaj dobijenih rezultata za ublažavanje efekata atmosferskih turbulencija.

II. BEŽIČNI OPTIČKI SISTEMI

Postoje dva različita tipa optičkog komuniciranja: optički kablovi i bežični optički prenos. Za potrebe mreža sa linkovima velike dužine najbolje rešenje predstavljaju optički kablovi. Korišćenjem multipleksiranja po talasnim dužinama (*Dense Wavelength Division Multiplex*, DWDM), optički kablovi mogu postići prenos informacija brzinom od 40 Gbps. Međutim, zarad postizanja dobrih rezultata za veze između optičkih vlakna i krajnjih korisnika, bežični optički prenos predstavlja vrlo zgodno rešenje. FSO rešenja predstavljaju alternativu optičkim vlaknima usled manje cene, brže montaže i fleksibilnosti mrežne topologije.

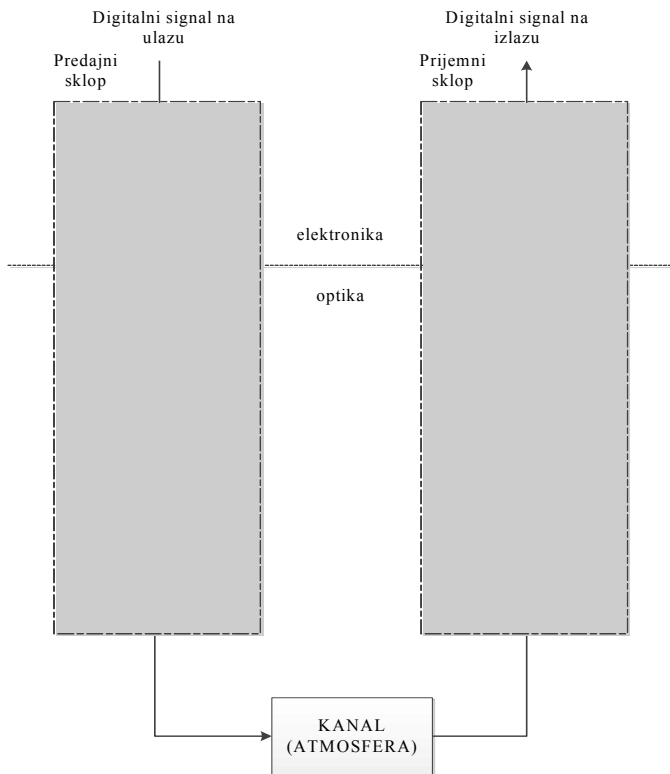
Tradicionalno se bežične tehnologije dovode u vezu sa prenosom u radio-frekventnom (RF) domenu, ali prenos optički talasima može doneti mnogo prednosti u određenim primenama. Pored velike raspoloživosti propusnog opsega, kao osnovne prednosti, bežični optički sistemi dozvoljavaju korišćenje usmerenih laserskih snopova uske divergencije.

Ovakvi snopovi obezbeđuju malu verovatnoću presretanja i detekcije, a primer radi imaju i mogućnost prodiranja kroz gustu maglu na rastojanju od jednog kilometra pri protocima reda veličine Gb/s, uz divergenciju snopa od 0,1 mrad. [3]. Usporedni pregled osobina RF i FSO sistema dat je u Tabeli I.

TABELA I. OSOBINE FSO I RF KOMUNIKACIJA.

	FSO linkovi	RF linkovi
tipičan protok podataka	100 Mb/s - ~Gb/s	< 100 Mb/s
bezbednost kanala	visoka	niska
dimenzije komponenti	male	velike
izvor degradacije signala	atmosferske turbulencije i smetnje	<i>multipath</i> feding, kiša i korisnička interferencija

Blok šema optičkog komunikacionog sistema u slobodnom prostoru prikazana je na sl. 1. Izlaz predajnika modulisan je optičkim nosiocem – tipično laserom, i on se dalje prenosi optičkim putem kroz atmosferski kanal. Najvažniji aspekti optičkog predajnika su veličina, snaga i kvalitet snopa, koji određuju intenzitet lasera i minimalnu divergenciju koju sistem može da obezbedi. U optičkim bežičnim sistemima obično se koristi intenzitetska modulacija (IM) pri čemu se intenzitet definiše kao protok energije po jedinici površine i vremena, izražava se u W/m². Na prijemu se obično vrši direktna detekcija (DD) optičkog signala, i to u opštem slučaju u prisustvu šumne interferencije, distorzije signala i pozadinskog zračenja.



Slika 1. Blok šema FSO sistema.

U slučaju prijemnika sa direktnom detekcijom, trenutna snaga optičkih talasa koji stignu do njega se detektuje direktno, bez optičkog mešanja lokalno generisanih svetlosnih talasa sa talasima koji dođu na ulaz prijemnika (što se koristi kod koherentnih prijemnika). Na detekciju optičkih talasa utiču različiti izvori šuma prisutni u prijemniku. Tri dominantna izvora šuma u FSO komunikacijama su: pozadinski ambijentalni šum, šum fotodetektora i termalni šum elektrona. Kvantni šum detektora uzrokovan je slučajnošću procesa brojanja fotona u fotodetektoru, dok je snaga termalnog šuma direktno proporcionalna temperaturi prijemnika. Optički šum se standardno modeluje kao aditivni beli Gausov šum.

III. MATEMATIČKI MODEL IM/DD SISTEMA

U slučaju sistema sa intenzitetskom modulacijom i direktnom detekcijom (IM/DD), podaci koji se šalju putem FSO linka se najpre intenzitetski modulišu a zatim prolaze kroz atmosferski kanal do prijemnika. Apertura prijemnika prihvata optički signal i fokusira ga na fotodetektor, koji trenutnu optičku snagu pretvara u električnu struju koja se dalje detektuje. U prisustvu atmosferskih turbulencija između predajnika i prijemnika, primljeni signal ima slučajne fluktuacije intenziteta pa je vrednost primljenog signala u jednom signalizacionom intervalu data izrazom

$$r = s\eta I + n, \quad (1)$$

pri čemu $s \in \{0,1\}$ predstavlja poslato informacioni bit, η je koeficijent optičko-električne konverzije, a n predstavlja trenutnu vrednost aditivnog belog Gausovog šuma srednje vrednosti 0 i varijanse σ_n^2 . Atmosferska turbulencija se modeluje izrazom

$$I = I_0 \exp(2X) \quad (2)$$

gde I_0 predstavlja intenzitet svetlosnog signala bez prisustva turbulencija, a X predstavlja niz slučajnih promenljivih sa normalnom raspodelom, srednje vrednosti μ_x i varijanse σ_x^2 . Stoga I ima lognormalnu raspodelu opisanu funkcijom gustine verovatnoće [4]

$$f(I) = \frac{1}{2I} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x^2}} \exp\left(-\frac{(\ln(I/I_0) - 2\mu_x)^2}{8\sigma_x^2}\right), \quad (3)$$

pri čemu se obično usvaja da važi $E[I/I_0] = 1$, $\mu_x = -\sigma_x^2$, pri čemu je sa $E[.]$ označen operator usrednjavanja.

Verovatnoća pogrešne detekcije u slučaju IM/DD sistema sa atmosferskom turbulencijom tada je data izrazom

$$\begin{aligned} P_e &= \frac{1}{2} \int_0^\infty \operatorname{erfc}\left(\frac{\eta I}{2\sigma_n}\right) f_I(I) dI \\ &= \frac{1}{2} \int_{-\infty}^\infty \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma_x^2}} \exp\left(-\frac{(x + \sigma_x^2)^2}{2\sigma_x^2}\right) \operatorname{erfc}\left(\frac{\eta I_0 e^{2x}}{2\sigma_n}\right) dx. \end{aligned} \quad (4)$$

IV. BEŽIČNI OPTIČKI SISTEMI SA KORIŠĆENJEM ORBITALNOG UGAONOG MOMENTA SA PRIMENOM KODOVA SA MALOM GUSTINOM PROVERE PARNOSTI

Orbitalni ugaoni moment svetlosti je novi koncept u optici otkriven pre svega petnaestak godina. Do njegove pojave dolazi kada se svetlosni snop prostire u vidu spiralnog talasnog fronta pa je stoga poznat i pod nazivom uvrnuta svetlost. Ovaj tip svetlosti ima potencijal da napravi revoluciju u načinu prenošenja informacije jer se izračunavanja vrše u kvantnom svetu. Svetlost koja se prostire na ovaj način poseduje orbitalni ugaoni moment veličine $lh/(2\pi)$ gde je l ceo broj dok se sa h označena Plankova konstanta [5]. Na ovaj način može se formirati praktično neograničen prostor stanja.

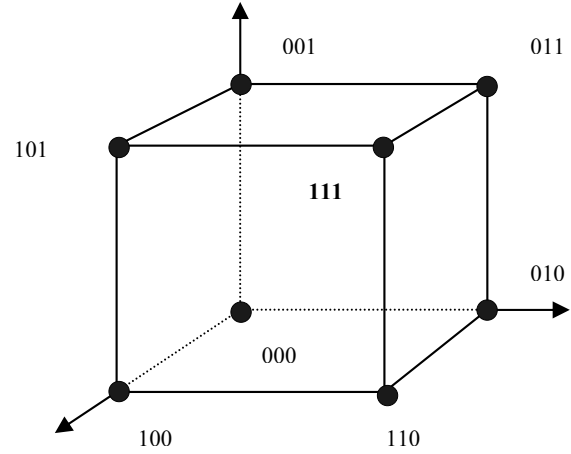
Može se smatrati da se korišćenjem koncepta orbitalnog ugaonog momenta informacije mogu prenositi kroz N -dimenzionalni prostor kod koga su sve dimenzije savršeno ortogonalne. Blok šema predajnika sistema zasnovanog na IM/DD tehnologiji koji koristi OAM koncept prikazana je na sl. 2. U prijemu se vrši odvajanje podkanala koji odgovaraju pojedinim modovima tj. OAM stanjima i vrši se nezavisno odlučivanje za svako od njih. Veoma slična realizacija moguća je u FSO sistemu, s tom razlikom da se umesto multimodnog vlakna koristi atmosferski kanal.

Direktna posledica ortogonalnosti stanja je da se može vršiti nezavisno odlučivanje po svakom od stanja. Primer dvodimenzionalnog ortogonalnog signaliziranja u RF domenu je dobro poznata QPSK modulacija kod koje se odlučivanje može nezavisno vršiti po granama u fazi i kvadraturi. Dobro je poznato da kod ovog tipa modulacije, ako je verovatnoća greške po svakoj od dimenzija p , verovatnoća greške po bitu u slučaju Grejevo mapiranja iznosi tačno [6]

$$P_{b,2-\text{dim}} = \frac{1}{2} [p(1-p) + (1-p)p + 2p^2] = p. \quad (5)$$

Ovaj izraz se lako može uopštiti ako se uoči da je za bilo koji višedimenzionalni prostor moguće uraditi Grejevo mapiranje tačaka u njemu (primer za 3D slučaj je prikazan na sl. 3) [6]. Konačno, verovatnoća greške po bitu pri prenosu kroz ortogonalni u N -dimenzioni prostor dobija se iz izraza

$$P_{b,N-\text{dim}} = \frac{1}{N} \sum_{k=1}^N \binom{N}{k} (kp)^k (1-p)^{N-k} = p. \quad (6)$$



Slika 3. Grejevo mapiranje u 3D ortogonalnom prostoru.

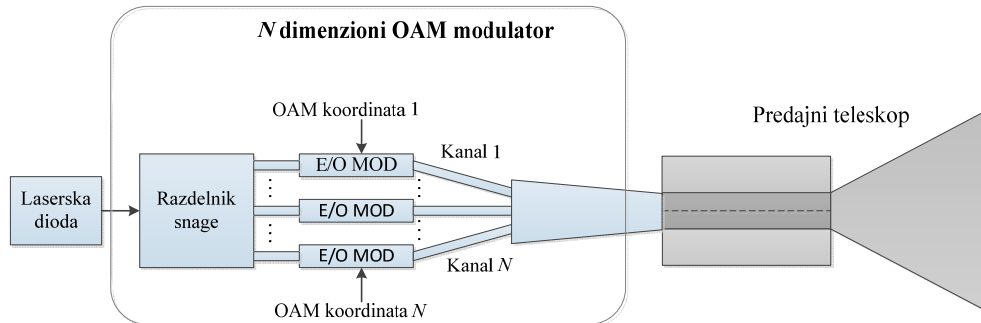
Jasno je da povećanjem broja OAM stanja (ortogonalnih dimenzija) performanse sistema neće biti narušene. Naravno, gore navedena analiza važi samo za slučaj savršene ortogonalnosti OAM stanja.

U ovom radu smatramo da u svakoj od dimenzija postoje dve značajne vrednosti ukupan broj tačaka u N -dimenzionalnoj konstelaciji je 2^N i svaka tačka se mapira sa po N bita. Pošto se svakoj od N dimenzija dodeljuje odgovarajući deo ukupne izračene snage, ukupan kapacitet za slučaj jednakoverovatnih tačaka na konstelaciji se dobija sabiranjem kapaciteta pojedinačnih modova pa je

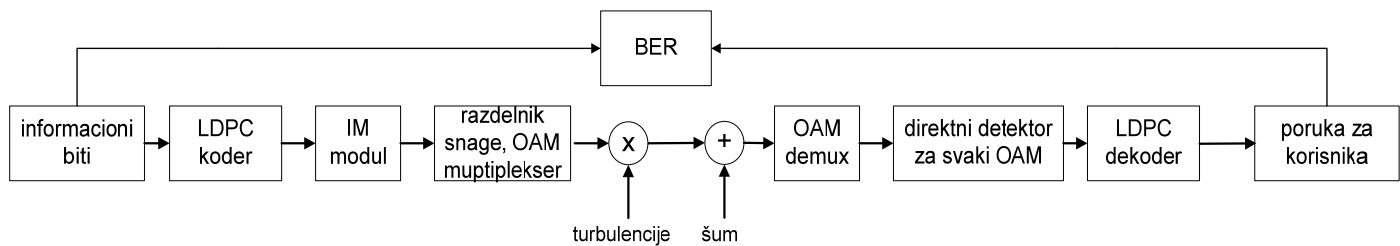
$$\frac{C^*}{B} = N - \frac{N}{2} \sum_{k=1}^2 E \left\{ \log_2 \sum_{i=1}^2 \exp \left[-\frac{|a^{(k)} + n - a^{(i)}|^2 - |n|^2}{2\sigma_n^2} \right] \right\} \quad (7)$$

gde su sa $a^{(1)}$ i $a^{(2)}$ i označeni binarni simboli koji se prenose u svakom od ortogonalnih modova, sa n je označen aditivni beli Gausov šum. Prethodni izraz se može lako izračunati ako se generiše dovoljno veliki uzorak kompleksnog Gausovog šuma, pa se na njemu izvrši usrednjavanje člana datog unutar vitičastih zagrada.

Da bi se u praksi prišlo kapacitetu sistema, u ovom radu će u svakom od ortogonalnih modova biti primenjen binarni kod sa malom gustinom provere parnosti LDPC(256,128). Za dekodovanje je primenjen *sum-product* algoritam [6,7].



Slika 2. N -dimenzioni OAM modulator.

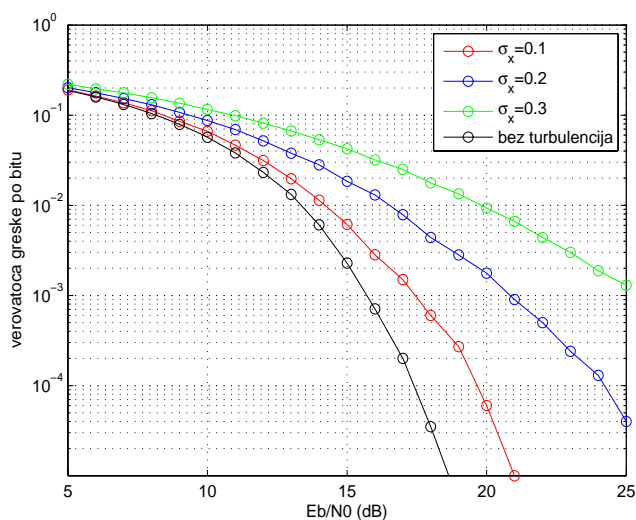


Slika 4. Blok šema simulacionog modela.

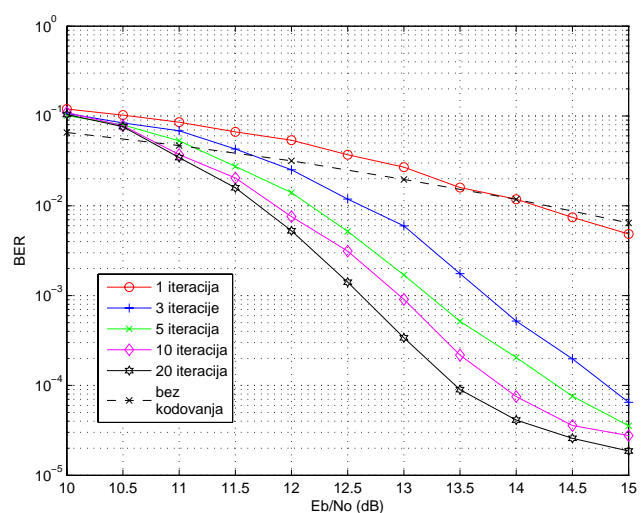
V. NUMERIČKI REZULTATI

U ovom poglavlju biće razmotreni rezultati *Monte Carlo* simulacija. Na svim graphicima biće prikazane performanse verovatnoće greške po bitu u zavisnosti od odnosa signal-šum u kanalu za prenos. Na sl. 4 dat je izgled simulacionog modela kod koga se prvo generiše poruka koju treba poslati, i to kao niz od n slučajnih binarnih brojeva. Ona zatim prolazi kroz IM modulator i šalje se u kanal za prenos. U njemu, pored aditivnog Gausovog šuma može dodatno delovati i atmosferske turbulencije. Za svaku vrednost odnosa signal-šum, odredi se vrednost snage šuma koji se zatim generiše i superponira na primljeni signal. Modelovanje efekta atmosferske turbulencije postiže se na osnovu teorije izložene u jednačinama (1)-(3) i generatora normalnih slučajnih promenljivih. Turbulencija tada deluje kao multiplikativna smetnja.

Nakon što prođe kroz kanal, nad sekvencom se vrši obrada u demodulatoru, gde se obavlja proces odlučivanja na osnovu vrednosti praga. Najzad, vrši se poređenje te sekvence, poslate korisniku, sa polaznom sekvencom, i to bit-po-bit, kako bi se izračunala verovatnoća greške po bitu za konkretan tip modulacije u konkretnim uslovima u kanalu. Na sl. 5 prikazane su performanse na prijemu FSO sistema u kojem se prenosi intenzitetski modulisan signal koji je prošao kroz atmosferski kanal u kome su pored AWGN delovale i turbulencije, za nekoliko vrednosti parametra σ_x .



Slika 5. Performanse sistema za prenos IM/DD optičkog signala kroz atmosferski kanal sa turbulencijama.



Slika 6. Performanse IM/DD optičkog signala sa kodom LDPC(256,128), razni broj iteracija, turbulencije sa $\sigma_x=0.1$.

VI. ZAKLJUČAK

U radu su razmatrani bežični optički sistemi kod kojih je primenjeno signaliziranje zasnovano na orbitalnom ugaonom momentu. Prvo je razmatran sistem kod koga u kanalu deluje samo aditivni šum, i za ovaj slučaj izvedena je verovatnoća greške i kapacitet sistema kada se vrši meko odlučivanje. Zatim su određene performanse sistema u kome pored optičkog šuma deluje i atmosferska turbulencija a radi povećanja pouzdanosti rada sistema primenjeni su kodovi sa malom gustinom provera parnosti. Pokazano je da tehnika prenosa sa orbitalnim ugaonim momentom ima potencijal za znatno povećanje protoka u bežičnim optičkim sistemima.

ZAHVALNICA

Rad je delimično finansirani sredstvima Ministarstva prosvete i nauke Republike Srbije, projekat TR 32007 "Multiservisna optička transportna platforma OTN10/40/100Gbps sa DWDM/ROADM i CARRIER ETHERNET funkcionalnostima".

LITERATURA

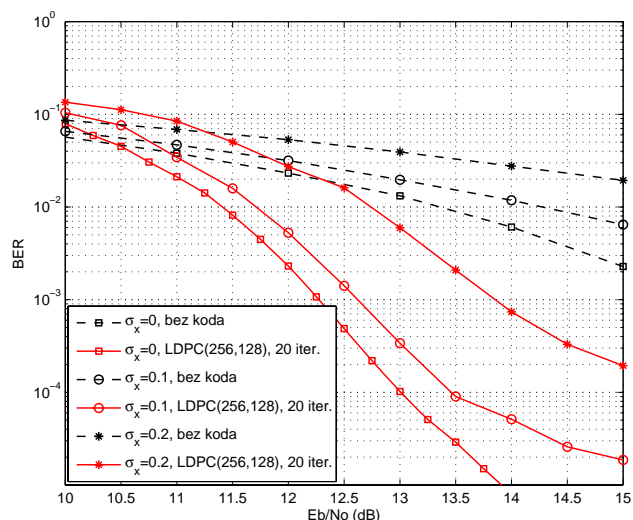
- [1] S. Trisno, Design and analysis of advanced free space optical communication systems, Faculty of the Graduate School of the University of Maryland, College Park, 2006.
- [2] I.I. Smolyaninov, L. Wasiczko, K. Cho, C.C. Davis, "Long Distance 1.2 Gb/s Optical Wireless Communication Link at 1550 nm," Proc. SPIE 4489, pp. 241-250, 2002.
- [3] M. Al Naboulsi, H. Sizun, F. de Fornel, Propagation of Optical and Infrared Waves in the Atmosphere, 2005.
- [4] S. M. Navidpour, M. Uysal, M. Kavehrad, BER Performance of Free-Space Optical Transmission with Spatial Diversity, IEEE Transactions on Wireless Communications, Vol. 6, No. 8, August 2007.
- [5] J. P. Torres, L. Torner, Twisted Photons – Applications of Light with Orbital Angular Momentum, WILEY-VCH Verlag & Co. KGaA, Germany, 2011.
- [6] D. B. Drajić, P. Ivaniš: Uvod u teoriju informacija i kodovanje, treće prošireno izdanje, Akademski misao, Beograd, 2009.
- [7] B. Vasic, O. Milenkovic, "Combinatorial Constructions of Low-Density Parity-Check Codes for Iterative Decoding", IEEE Trans. Inform. Theory, Vol 50 (2004), pp. 1156-1176.
- [8] I. Đorđević, M. Arabaci, "LDPC-coded orbital angular momentum (OAM) modulation for free-space optical communication", Optics Express, Vol 18, Iss. 24, pp. 24722-24728, 2010.

ABSTRACT

The performances of free space optics communications are analyzed for the case when technique of orthogonal signalization with orbital angular momentum is applied. As the system performances significantly degrade in the presence of atmosphere turbulences, we consider the application of binary low density parity check error control codes in this system. The corresponding numerical results obtained by using Monte Carlo simulations are presented.

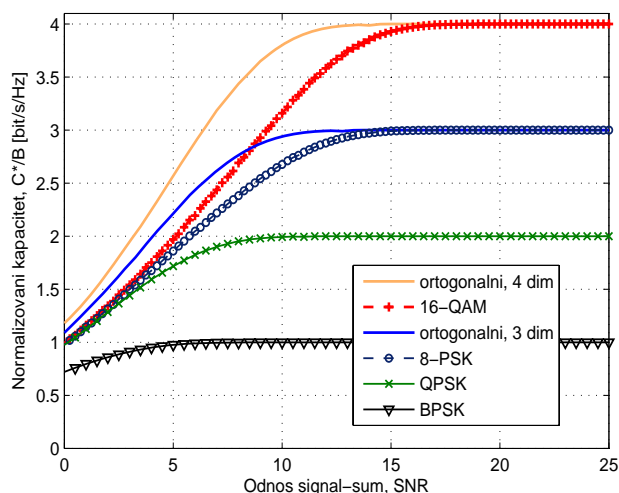
PERFORMANCES OF THE FREE SPACE OPTIC SYSTEMS BASED ON ORBITAL ANGULAR MOMENTUM IN THE PRESENCE OF ATMOSPHERIC TURBULENCE

Aleksandar Lazarević, Predrag Ivaniš



Slika 7. Performanse IM/DD optičkog signala, LDPC(256,128), 20 iteracija, turbulencije raznih standardnih devijacija.

Takođe, određen je kapacitet odgovarajućih kanala sa diskretnim ulazom i kontinualnim izlazom slučaj OAM sistema sa jednom, dve, tri, četiri i šest ortogonalnih modova. Numeričke vrednosti su upoređene sa kapacitetom za slučaj korišćenja BPSK i dvodimenzionalnih konstelacija (QPSK, 8-PSK, 16-QAM i 64-QAM) i prikazane na sl. 8. Iako je izraz (7) izveden za slučaj kanala sa belim Gausovim šumom, jasno je da se primenom prenosa po više dimenzija, usled povećanih Euklidovih rastojanja u višedimenzionalnom prostoru, za isti odnos signal-šum kapacitet sistema može znatno uvećati u odnosu na dvodimenzionalni slučaj. Ovako određen kapacitet određuje granice do kojih je moguće izvršiti poboljšanje performansi. U odnosu na slučaj razmatran u ovom radu dodatno poboljšanje performansi moguće je postići primenom nebinarnih LDPC kodova, kao što je predloženo u [8], a predstavlja temu za buduća istraživanja.



Slika 8. Kapacitet OAM sistema sa većim brojem ortogonalnih modova i poredjenje sa kapacitetima za slučaj primene dvodimenzionalnih konstelacija.