

primeiro lugar, geramos uma sequência de bits pseudoaleatória (*pseudorandom bit sequence*, PRBS) de aproximadamente 10^6 elementos. Esta sequência se dividiu em blocos de 2, 3 ou 4 bits dependendo se a configuração a simular era PolSK4, PolSK8 ou PolSK16, respectivamente. Para o caso de PolSK4 e PolSK8, foram utilizados códigos esféricos ótimos para 4 e 8 pontos [6], enquanto que para PolSK16 se utilizou o código esférico com maior distância mínima conhecida [7]. A partir dos parâmetros de Stokes, calcularam-se os valores das tensões de alimentação do modulador de polarização. Este modulador estava formado por um divisor de feixe de polarização (*polarization beam splitter*, PBS) que dividia a saída de um laser monomodo à 1550 nm em duas saídas linearmente polarizadas nas direções X e Y. As intensidades das componentes foram controladas mediante dois moduladores Mach-Zehnder (*Mach-Zehnder modulators*, MZMs) e a diferença de fase entre elas foi ajustada por meio de um modulador de fase (*phase modulator*, PM). Para analisar a sensibilidade do receptor, o canal óptico foi simulado como um atenuador variável que permitiu varrer a potência óptica na entrada do receptor baseado em polarimetria de Stokes padrão em paralelo [8]. Para isso, um divisor óptico (*optical splitter*, OS) de quatro saídas foi usado a fim de criar diferentes replicas do sinal de entrada. A primeira destas réplicas foi diretamente fotodetetada, resultando numa estimativa do primeiro parâmetro de Stokes, S_0 . As restantes saídas do divisor foram processadas para obter S_1 , S_2 e S_3 por médio das projeções do estado de polarização em três diferentes bases [9]. Uma vez obtidos valores estimados dos parâmetros de Stokes, estes foram decodificados por máxima verossimilhança, associando-os aos pontos do código mais próximos. Finalmente, as sequências de entrada e saída foram comparadas para calcular a BER.

III. RESULTADOS NUMÉRICOS

Como mencionado na Seção II, a potência de entrada ao receptor foi controlada usando um atenuador óptico variável. Desta forma, a relação sinal a ruído (*signal to noise ratio*, SNR) nas saídas dos fotodetetores é variada pois a baixas intensidades ópticas o ruído térmico destes é dominante. Assim, para cada configuração PolSK (com 4, 8 e 16 pontos) as curvas de BER obtidas em função da potência recebida são apresentadas na Figura 2. Como era de esperar, para uma determinada potência recebida, a BER aumenta conforme se aumenta o número de bits por símbolo e, conseqüentemente o número de pontos do código esférico, o que reduz a distância entre pontos adjacentes. A sensibilidade de um receptor é definida como a potência mínima requerida para atingir uma determinada BER [10]. No nosso caso, consideramos uma BER de 2×10^{-3} que corresponde ao limite de códigos de correção de erro (*forward error correction*, FEC) utilizados em sistemas de comunicações ópticas. As sensibilidades obtidas são -15 dBm para PolSK4, -13.5 dBm para PolSK8 e -12.2 dBm para PolSK16. Posteriormente, comparamos estas sensibilidades com as sensibilidades de sistemas PAM com os mesmos números de bits por símbolo. Pode-se observar que para 2 bits por símbolo, a sensibilidade de PAM4 é aproximadamente 1.4 dB melhor que a sensibilidade de PolSK4.

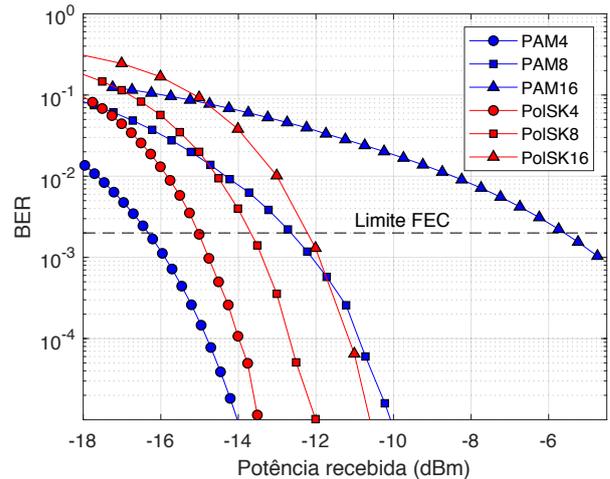


Fig. 2. BER dos sistemas PolSK e PAM com 2, 3 e 4 bits por símbolo em função da potência recebida.

Por outro lado, para um número maior de bits por símbolo, a sensibilidade de PolSK é melhor que a de PAM. Em particular, para PolSK8 a melhora é de 0.9 dB em quanto que para PolSK16 a utilização da modulação do espaço de Stokes representa uma melhora de mais de 6.5 dB.

IV. CONCLUSÕES

Neste trabalho avaliamos mediante simulações computacionais a sensibilidade de sistemas baseados em PolSK de 2, 3 e 4 bits por símbolo. Em comparação com PAM com o mesmo número de bits por símbolo, PolSK apresenta um desempenho pior que PAM para 2 bits por símbolo mas um desempenho melhor para 3 e 4 bits por símbolo.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem à Fundação de Amparo a Pesquisa do Estado de São Paulo (FAPESP), processo 2019/16063-8.

REFERÊNCIAS

- [1] E. Agrell, M. Karlsson, A. Chraplyvy, D. J. Richardson, P. M. Krummrich, P. Winzer, K. Roberts, J. K. Fischer, S. J. Savory, and B. J. Eggleton, "Roadmap of optical communications," *Journal of Optics*, vol. 18, no. 6, p. 063002, 2016.
- [2] H. Venghaus and N. Grote, *Fibre optic communication: Key devices*. Springer, 2017, vol. 161.
- [3] Z. K. Ping, C. Wei, S. Qi, M. J. Wei, A. P. T. Lau, L. Chao, and Z. Li, "Low cost 400ge transceiver for 2km optical interconnect using pam4 and direct detection," in *2014 Asia Communications and Photonics Conference (ACP)*. IEEE, 2014, pp. 1–3.
- [4] D. Che, C. Sun, and W. Shieh, "Maximizing the spectral efficiency of stokes vector receiver with optical field recovery," *Optics Express*, vol. 26, no. 22, pp. 28 976–28 981, 2018.
- [5] T. Sukanuma, W. Yanwachirakul, E. Kato, M. Sugiyama, Y. Nakano, and T. Tanemura, "Fully integrated 4-port stokes vector receiver for multi-level 3d signal detection," in *OptoElectronics and Communications Conference (OECC)*. IEEE, 2019, pp. 1–3.
- [6] T. Ericson and V. Zinoviev, *Codes on Euclidean spheres*. Elsevier, 2001, vol. 63.
- [7] J. H. Conway and N. J. A. Sloane, *Sphere packings, lattices and groups*. Springer Science & Business Media, 2013, vol. 290.
- [8] R. Hui and M. O'Sullivan, *Fiber optic measurement techniques*. Academic Press, 2009.
- [9] R. A. Chipman, *Handbook of Optics*, 2004, ch. 22. Polarimetry.
- [10] P. Agrawal, *Fiber-optic communication systems*. John Wiley, New York, 2002.