

Análise de Desempenho de Sistemas FSO com MIMO sob Condições de Turbulência

H.R.D. Filgueiras, T. H. Brandão e Arismar Cerqueira S. Jr.

Resumo— Este trabalho apresenta uma análise de desempenho numérica de sistemas de comunicações ópticas no espaço livre (FSO - *free-space optics*) com múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO - *multiple-input multiple-output*) sob condições de turbulência, considerando canal Gamma-Gamma. Inicialmente, descreve-se os fundamentos teóricos das técnicas de diversidade espacial e da modelagem do canal FSO com turbulências atmosféricas. Em seguida, relata-se previsões do desempenho de um sistema FSO baseado na modulação QPSK (*quadrature phase shift keying*) em termos de probabilidade de erro de bit (BER). Demonstra-se melhorias sistêmicas de até 27 dB para um sistema operando com quatro canais sob condições severas de turbulência, por meio da compensação das adversidades mesmo em condições de inoperância.

Palavras-Chave— 5G, FSO, MIMO e modelagem de canal.

Abstract— This work reports numerical analysis of free-space optics (FSO) systems with multiple-input multiple-output (MIMO) under turbulence conditions, considering Gamma-Gamma channel. Initially, theoretical fundamentals of spatial diversity techniques and FSO channel modelling with atmospheric turbulences are described. Posterior, performance predictions of a FSO system based on QPSK (*quadrature phase-shift keying*) modulation are reported in terms of bit error rate (BER). We demonstrate up to 27-dB performance enhancement for a system operating under 4-channels condition with strong turbulence, by means of overcoming the adversity effects of turbulence even in non-operating conditions.

Keywords— 5G, channel modelling, FSO and MIMO.

I. INTRODUÇÃO

As tecnologias sem fio têm evoluído constantemente à medida que a demanda de tráfego de dados no sistema de comunicação móvel aumenta. A evolução da primeira geração de comunicação móvel (1G) a quarta geração (4G) foi principalmente dedicada em redesenhar a rede de acesso (RAN), a fim de permitir maior capacidade e elevadas taxas de transmissão [1]. A quinta geração de comunicação móvel (5G) consiste em uma arquitetura móvel sem precedentes, projetada para suportar pelo menos três principais cenários, de acordo com o 3GPP (*Third Generation Partnership Project*) [2]: *massive machine type communication* (mMTC); *ultra reliable low latency communication* (URLLC) e *enhanced mobile broadband communication* (eMBB) [3]. Além disso, áreas de acesso remoto e rurais têm motivado muitas pesquisas, principalmente em países de escala continental, como Brasil, China e Canadá [4].

H.R.D. Filgueiras, T. H. Brandão e Arismar Cerqueira Sodré Jr. são do laboratório WOCA, Instituto Nacional de Telecomunicações (Inatel), Avenida João de Camargo, 510, Santa Rita do Sapucaí - MG, Brasil. e-mail: hugorodrigues@get.inatel.br; tiagob@get.inatel.br; arismar@inatel.br.

Particularmente no cenário eMBB, espera-se que o 5G atinja 1000 vezes a capacidade atual do sistema, 100 vezes a taxa de transmissão de dados e de 3 a 5 vezes a eficiência espectral, quando comparado ao 4G [2][5]. Técnicas de múltiplas entradas e múltiplas saídas (MIMO - *multiple-input multiple-output*) permitem combater o desvanecimento do canal e, conseqüentemente, aumentar de forma considerável a capacidade e confiabilidade do sistema, tirando proveito de múltiplos canais de propagação para obter aumento de taxa por multiplexação e ganhos de diversidade [6], viabilizando aplicações eMBB.

Recentemente, os sistemas de comunicações ópticas no espaço livre (FSO - *free-space optics*) têm recebido crescente atenção por prover vantagens de baixo custo e alta capacidade [7]. Dentre as principais vantagens, destacam-se a imunidade à interferências eletromagnéticas e segurança proveniente do estreito feixe do laser [7]. Existem autores que propõem o uso do FSO como um enlace de apoio aos sistemas de radiofrequência, a fim de aumentar a capacidade do sistema ou ainda, a utilização de enlaces de radiofrequência como redundância aos enlaces FSO [8][9]. Adicionalmente, o espectro de frequência utilizado por sistemas FSO não é licenciado (faixa de infravermelho: comprimento de onda (λ) de 1000 nm a 1 mm), o que diminui o custo de implementação. Dentre as limitações, pode-se destacar a dificuldade de alinhamento, limitação quanto à mobilidade e turbulências atmosféricas [7][10]. Alguns modelos analíticos de canal são apresentados na literatura para representar a variação de ganho do canal, dentre eles, destacam-se a distribuição exponencial negativa [7], log-normal [10] e Gamma-Gamma [11].

Nesse contexto, a utilização de MIMO se apresenta como uma solução potencial para combater um canal FSO turbulento, por meio do ganho de diversidade [10]. Utilizar múltiplos lasers e/ou múltiplos fotodetectores possibilita a criação de distintos canais entre transmissor e receptor independentes entre si [12]. Dessa forma, em um determinado instante de tempo, se um canal entra em estado de inoperância por desvanecimento, a probabilidade do outro canal também estar em inoperância na mesma alocação de tempo e frequência é baixa, aumentando a confiabilidade do sistema devido ao aumento de relação sinal ruído (SNR) na saída do decodificador [12].

Este artigo relata uma análise numérica da aplicação de MIMO em um sistema FSO operando com modulação QPSK (*quadrature phase shift keying*) sob condições de desvanecimento Gamma-Gamma, com o intuito de prover ganho de diversidade. O trabalho consiste em uma análise numérica preliminar a respeito do ganho de diversidade considerando canais decorrelacionados, como uma prova de conceito. Tal abor-

dagem, acarretaria em grandes distâncias entre os múltiplos transmissores e receptores, dado a provável alta correlação entre canais de visada direta. Investigações complementares a respeito da influência de correlação entre canais devem ser futuramente exploradas. O artigo é estruturado em cinco seções. A Seção II apresenta uma breve fundamentação teórica em diversidade espacial para FSO, enquanto a modelagem matemática do canal é tratada na Seção III. A Seção IV apresenta os resultados obtidos para um sistema FSO com MIMO e, finalmente, as conclusões e trabalhos futuros são apresentados na Seção V.

II. TÉCNICAS DE DIVERSIDADE PARA FSO

Esta Seção descreve os fundamentos teóricos de algumas técnicas de diversidade, que serão utilizadas no presente trabalho. Diversidade consiste em transmitir a mesma informação por meio de canais distintos em frequência, no tempo ou no espaço [12]. Utilizar a técnica com diversidade de frequência ou tempo acarreta em uma baixa eficiência espectral, por utilizar recursos extras a fim de transmitir informações de redundância. Por outro lado, a multiplexação espacial pode alcançar ganho de diversidade no mesmo recurso de frequência e tempo, aumentando o número de transmissores e/ou receptores [12]. Em sistemas FSO, vislumbra-se aumentar a SNR na recepção, superando a turbulência atmosférica do canal, a fim de garantir um enlace de comunicação mais confiável.

A Fig. 1 apresenta um esquema FSO convencional e quatro possíveis esquemas de diversidade espacial. A Fig. 1(a) ilustra um esquema com uma única entrada e uma única saída (SISO - *single input single output*) e, nota-se que um único canal (h_{11}) de transmissão é criado entre eles. Neste esquema não há diversidade espacial, porém é importante destacá-lo como referência para os outros esquemas. Na Fig. 1(b), observa-se um esquema genérico com múltiplas entradas e uma única saída (MISO - *multiple input single output*), ou seja, existem L transmissores (*laser diode* ou LD) e um único receptor (*photodetector* ou PD). Destaca-se que para cada percurso entre LD e PD existe um canal representado por h_{1L} , por meio desta configuração e técnicas de pré-codificação torna-se possível tirar proveito dos múltiplos canais e se obter um ganho de diversidade espacial de transmissão de ordem L . Algumas das técnicas comumente empregadas para ganho de diversidade de transmissão são o STBC (*space time block coding*) e o STTC (*space time trellis coding*), sendo o STBC utilizado em sistemas com dois transmissores e N receptores e o STTC para L transmissores e N receptores [13]. A Fig. 1(c) apresenta uma única entrada e múltiplas saídas (SIMO - *single input multiple output*), ou seja, existe um LD e N PDs e, para cada PD, existe um único canal representado por h_{N1} . Neste cenário é possível se tirar proveito dos múltiplos canais, por meio de técnicas como PS (*pure selection*), EGC (*equal gain combining*) e MRC (*maximun ratio combining*) [14], sendo o último capaz de explorar a máxima SNR possível, obtendo-se um ganho de diversidade de ordem N de recepção.

O cenário MIMO com múltiplas entradas e múltiplas saídas é evidenciado na Fig. 1(d), no qual entre os L LDs e os N PDs, existe apenas um único canal h_{NL} com $N = L$. O

ganho de diversidade que pode ser obtido neste esquema só se aplica às técnicas de recepção, sendo assim este sistema é equivalente ao apresentado na Fig. 1(c) para o mesmo número de canais entre LD e PD. Por fim, na Fig. 1(e), nota-se um esquema MIMO similar ao da Fig. 1(d), porém com canais cruzados entre os LDs e PDs, com isso pode-se explorar tanto o ganho de diversidade de transmissão quanto o ganho de recepção combinando as duas técnicas, alcançando ganhos de ordem $L \times N$.

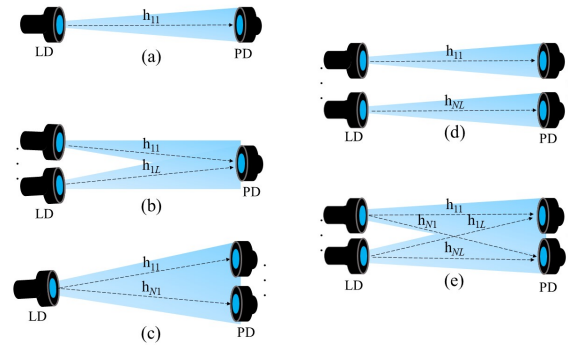


Fig. 1. Esquemas de diversidade espacial: a) SISO; b) MISO; c) SIMO; d) MIMO sem canal cruzado; e) MIMO com canal cruzado.

Considerando o esquema apresentado na Fig. 1(e), para $N = L = 2$, pode-se implementar a pré-codificação de Alamouti (STBC) [13], a fim de se obter um ganho de diversidade de transmissão de ordem dois e um esquema de MRC [14] para explorar o ganho de recepção, totalizando um ganho de diversidade de ordem quatro. O sinal recebido pode ser representado de acordo com (1), no qual \vec{S}_{r_i} corresponde ao vetor de sinal recebido no momento i , \vec{c} é o vetor de símbolos transmitidos, \mathbf{H} representa a matriz do canal (nesse exemplo uma matriz 2×2) e \vec{n} é referente ao vetor de ruído.

$$\vec{S}_{r_i} = \mathbf{H}\vec{c} + \vec{n} \quad (1)$$

O canal deve ser considerado invariante ao longo do período de transmissão de pelo menos dois símbolos para que a técnica STBC atinja o ganho de diversidade almejado [13]. Os vetores recebidos no instante iT e $(i+1)T$ em ambos os PDs são devidamente decodificados e combinados, alcançando um ganho de diversidade de ordem quatro, como mostrado em (2). Nota-se que a fase de cada canal, que poderia degradar drasticamente o desempenho do sistema devido à interferência inter-simbólica (ISI), foi totalmente eliminada do sistema, codificando e decodificando adequadamente.

$$\begin{aligned} \hat{c}_1 &= c_1 \left(|h_{11}|^2 + |h_{12}|^2 + |h_{21}|^2 + |h_{22}|^2 \right) \\ &\quad + n_1 (h_{11}^* + h_{21}) + n_2 (h_{12}^* + h_{22}) \\ \hat{c}_2 &= c_2 \left(|h_{11}|^2 + |h_{12}|^2 + |h_{21}|^2 + |h_{22}|^2 \right) \\ &\quad + n_1 (h_{11}^* + h_{21}) + n_2 (h_{12}^* + h_{22}) \end{aligned} \quad (2)$$

Nota-se ao analisar (2) que não há nenhum indicador em relação ao ganho de diversidade de transmissão ou recepção, ou seja, os símbolos transmitidos são simplesmente ponderados

pelo ganho de todos os canais existentes entre transmissores e receptores. Dessa forma, do ponto de vista de desempenho do sistema, não há distinção entre esquemas de diversidade de transmissão, recepção ou ambos, desde que possuam a mesma quantidade de canais na matriz \mathbf{H} . Dito isso, os resultados a serem apresentados nesse artigo irão explorar a melhoria de desempenho de um sistema QPSK para diferentes quantidades de canais, sem distinção da técnica utilizada para atingir o ganho de diversidade.

III. MODELAGEM DO CANAL FSO COM TURBULÊNCIA

Em um sistema FSO, a principal causa de desvanecimento está relacionado às turbulências atmosféricas, as quais levam em consideração diversas condições climáticas, tais como [15]: temperatura, velocidade do vento, nevoeiro, chuva, vibrações estruturais e pressão atmosférica. Um sinal óptico, ao passar por um canal com turbulência, irá interagir com as moléculas constituintes do meio e seus fótons poderão se espalhar ou ser absorvidos, ocasionando a degradação da amplitude e/ou fase do sinal. Pode-se caracterizar a turbulência do canal como variações aleatórias no tempo e espaço, ocasionadas por condições atmosféricas [15].

A turbulência atmosférica de uma canal FSO pode ser classificada como fraca, moderada, forte e saturada, dependendo da variação do índice de refração e da não-homogeneidade do canal. Atualmente, não existe um modelo matemático que represente todas as variações das turbulências atmosféricas [15]. Entretanto, existem alguns modelos estatísticos amplamente aceitos que trazem boas aproximações sobre o desvanecimento. A distribuição Log-Normal pode representar condições de turbulência fraca, já a distribuição exponencial negativa pode representar de forma realística as condições de turbulência forte. A distribuição mais aceita na literatura é a Gamma-Gamma que, ao variar alguns de seus parâmetros, permite representar os desvanecimentos de turbulência fraca a saturada [15].

O modelo de turbulência Gamma-Gamma [16], [17] é um modelo que assume as flutuações da radiação da luz transversais à turbulência atmosférica e considera os efeitos de pequena escala (baseados no espalhamento) e grande escala (baseados nas refrações) [15]. A função densidade de probabilidade do canal \mathbf{H} , para o modelo Gamma-Gamma, é dado por

$$f_h(H) = \frac{2(\alpha\beta)^{\frac{(\alpha+\beta)}{2}}}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)} H^{\frac{(\alpha+\beta)}{2}-1} K_{\alpha-\beta}\left(2\sqrt{\alpha\beta H}\right) \quad (3)$$

sendo α e β fatores relacionados aos efeitos de pequena e grande escala dentro do processo de espalhamento, $K_n(\cdot)$ é a função de Bessel modificada de segunda espécie e ordem n e $\Gamma(\cdot)$ é a função Gamma. As condições atmosféricas que provocam as flutuações da onda plana do sinal óptico são dados por α e β , respectivamente:

$$\alpha = \left[\exp\left(\frac{0.49\sigma^2}{\left(1 + 1.11\sigma^{12/6}\right)^{7/6}}\right) - 1 \right]^{-1}, \quad (4)$$

$$\beta = \left[\exp\left(\frac{0.51\sigma^2}{\left(1 + 0.69\sigma^{12/5}\right)^{5/6}}\right) - 1 \right]^{-1}. \quad (5)$$

O fator σ^2 presente em (4) e (5) consiste na variância de Rytov, que representa a variação do índice de refração e não-homogeneidade do canal, ou seja, considera a intensidade da turbulência. Esse fator é válido para o campo se propagando horizontalmente através das turbulências do canal, como ocorre na maioria dos casos em aplicações terrestres. Valores típicos de σ^2 variam de 0 a 100, conforme apresenta a Fig. 2(a), na qual pode-se extrair valores de α e β em função de σ^2 . São ainda destacadas as regiões nas quais a turbulência é considerada fraca ($\sigma^2 < 1$), moderada a forte ($1 < \sigma^2 < 30$) ou saturada ($\sigma^2 > 30$).

A Fig. 2(b) apresenta a distribuição Gamma-Gamma, obtida a partir de (3) para três valores de σ^2 . Para uma situação de turbulência fraca, adotou-se $\sigma^2 = 0,5$, o que de acordo com a Fig. 2(a) corresponde a $\alpha = 41,77$ e $\beta = 39,34$. Nesta situação, o ganho médio do canal é de aproximadamente 1 e a variação de ganho ocorre entre 0,5 a 1,5, ou seja, na situação de turbulência fraca não existe ganho de canal próximos de 0 e a variância do canal provoca pouca dispersão do sinal. Na condição de turbulência moderada, considerou-se $\sigma^2 = 1$, correspondente a $\alpha = 4,39$ e $\beta = 2,56$, o que implica em um ganho médio de canal de aproximadamente 0,93. Neste cenário, verifica-se que existe maior dispersão do ganho (entre 0 e 3,5) e que a maior concentração de valores do ganho do canal ocorrem em torno de 0,4. Por fim, para um ambiente de turbulência forte, adotou-se $\sigma^2 = 30$, correspondente a $\alpha = 8,65$ e $\beta = 1,02$. Para estes valores, o ganho médio do canal é de 0,85, percebe-se que o ganho do canal ocorre com maior frequência para valores próximos de 0 e que a variância em torno da média é maior comparada aos cenários já mencionados, confirmando uma degradação mais severa do canal de comunicação FSO.

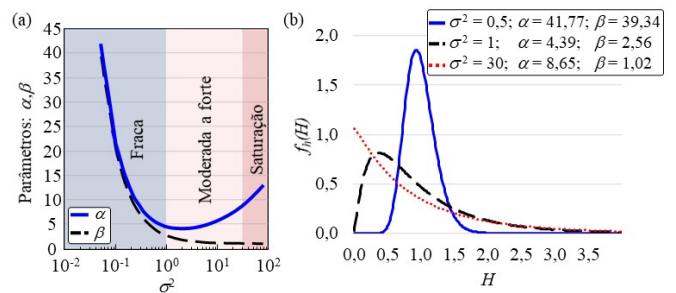


Fig. 2. Turbulência Gamma-Gamma. a) Curvas de α e β em função de σ^2 , b) Função densidade probabilidade para três valores de σ^2 .

Após realizada a modelagem matemática do canal Gamma-Gamma foi possível implementá-la em Matlab, a fim de avaliar sistemas FSO baseado em QPSK operando com múltiplos canais com distintas intensidades de turbulência. Todos os resultados a serem apresentados na Seção IV foram obtidos para valores de σ^2 iguais a 0,5, 1 e 30, perfazendo turbulências fraca, moderada e forte, respectivamente.

IV. ANÁLISE DE DESEMPENHO DE FSO COM MIMO

Esta Seção apresenta os resultados da análise de desempenho em termos de taxa de erro de bit (BER - *bit error rate*) de um sistema FSO com MIMO considerando um canal com turbulência Gamma-Gamma. Analisou-se a BER do sistema em função da SNR para três níveis de turbulência, explorando técnicas de diversidade para dois e quatro canais e comparou-se com um sistema sem turbulência. Todas as análises foram realizadas utilizando a modulação QPSK. As simulações foram realizadas no programa computacional Matlab e os resultados foram obtidos, por meio do método de Monte Carlo.

A Fig. 3(a) apresenta uma comparação de três constelações QPSK sob uma canal sem turbulência e demonstra o ganho de diversidade obtido ao se explorar mais de um canal. Verifica-se que a energia média da constelação cresce no fator $10\log_{10}(X)$, sendo X o número de canais, quando comparada a um único canal. Na constelação, pode-se observar um ganho de 3 e 6 dB para dois e quatro canais, respectivamente. Os resultados foram traçados considerando 25 dB de SNR por canal utilizado. Posteriormente, adotou-se σ^2 igual a 0,5, com seus respectivos valores de $\alpha = 41,77$ e $\beta = 39,34$, a fim de representar o comportamento da turbulência atmosférica sobre a constelação QPSK. A Fig. 3(b) mostra as constelações para 1 e 4 canais. Nota-se que mesmo sobre uma turbulência fraca, existe uma variação considerável na amplitude do sinal recebido, o que em situações de SNR inferiores aumentará a probabilidade de erro do sistema. Destaca-se também o ganho de diversidade obtido para quatro canais, visto que a energia média da constelação aumentou de forma considerável.

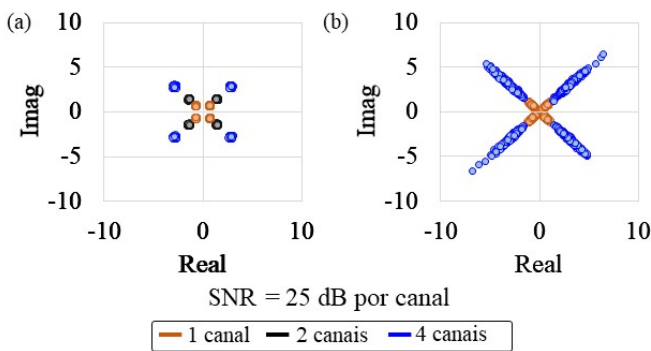


Fig. 3. Sistema FSO sem turbulência: a) Contaminação AWGN em sistema com 1, 2 e 4 canais entre transmissor e receptor; b) Desvanecimento Gamma-Gamma com 1 e 4 canais entre transmissor e receptor.

As curvas de BERxSNR foram traçadas variando a SNR do sistema de -3 a 25 dB para finalidades de visualização e análise do comportamento do desempenho do sistema até em situações muito adversas, nas quais a intensidade do ruído é maior que a do sinal. A curva teórica foi traçada como referência em todas as simulações e uma calibração do código foi realizada traçando a curva de BER para uma situação de apenas contaminação AWGN (*additive white gaussian noise*), na qual a curva deve ser igual à teórica. Adicionalmente, traçou-se o limite de FEC (*forward error correction*) de $3,8 \times 10^{-3}$ [18], para que fosse possível computar o ganho de diversidade nos diferentes cenários no limite mínimo de operação do sistema.

A Fig. 4 reporta as curvas de BER em função de SNR para situações sem turbulência e com turbulência fraca em sistemas com 1, 2 e 4 canais, respectivamente. Observa-se o ganho teórico de diversidade de 3 e 6 dB para o canal AWGN puro para 2 e 4 canais. Ao acrescentar a turbulência fraca, percebe-se uma degradação em todos os sistemas, porém, ao utilizar-se 2 canais, já é possível observar um desempenho superior ao sistema de apenas um canal AWGN, comprovando a eficiência da diversidade espacial para combater as turbulências atmosféricas.

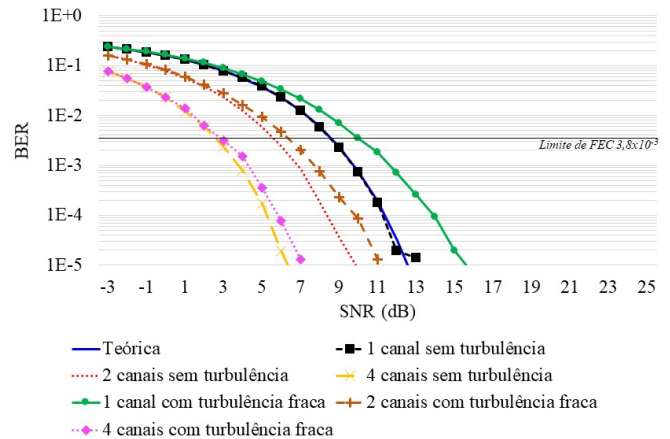


Fig. 4. Análise de desempenho do sistema FSO sob turbulência fraca.

As Figs. 5 e 6 apresentam os resultados obtidos de BER em função de SNR para as situações com turbulência moderada e forte, respectivamente. Em ambas, também foram traçadas as curvas de desempenho do sistema sem turbulência para cômputo da perda de desempenho. O comportamento observado foi sempre o mesmo independente da intensidade da turbulência: degradação do desempenho do sistema com adição de turbulência e melhoria do sistema com utilização de diversidade. Percebe-se, por exemplo, na Fig. 5, que o limite de FEC é atendido em um único canal AWGN com SNR = 9 dB. Ao acrescentar os efeitos da turbulência, o limite de FEC passa a ser atendido em condições de SNR = 24 dB, uma penalidade de potência 15 dB. Ao acrescentar diversidade espacial no sistema, o limite de FEC passa a ser atendido com valores reduzidos de SNR iguais a 14 e 6 dB para 2 e 4 canais, respectivamente, melhorando o desempenho do sistema em condições ainda melhores do que um único canal AWGN, comprovando mais uma vez a aplicabilidade de diversidade espacial para combate dos efeitos de turbulências atmosféricas.

Observa-se que quanto mais severos forem os efeitos da turbulência, mais eficácia terá a diversidade espacial, ou seja, em um canal muito bom, em condições amenas de desvanecimento, há pouco que a diversidade possa melhorar. Entretanto, em condições severas de desvanecimento, muitas vezes em estado de inoperância, a diversidade irá prover ganho mais significativo, podendo até combater a turbulência do canal. Observando a Fig. 6, percebe-se que o limite de FEC para 1 canal AWGN é atendido com SNR = 9 dB. Sob condições de turbulência forte, o sistema entra em inoperância. Fazendo-se uma projeção da curva, estima-se que o limite de FEC seja

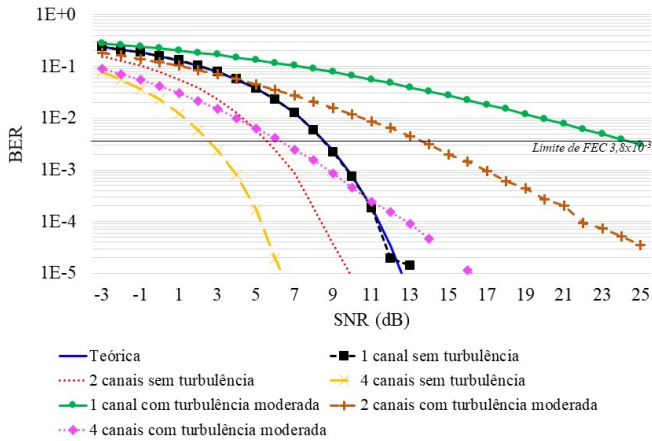


Fig. 5. Análise de desempenho do sistema FSO sob turbulência moderada.

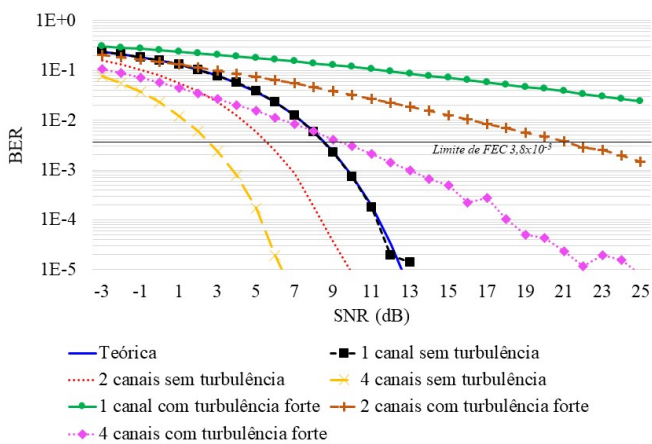


Fig. 6. Análise de desempenho do sistema FSO sob turbulência forte.

atendido em condições de aproximadamente $\text{SNR} = 37$ dB. Ao utilizar diversidade de ordem 2 ou 4, percebe-se que o limite passa a ser atendido com relação sinal ruído de 20 e 10 dB, respectivamente, acarretando em um ganho de até 27 dB.

Não há limite na quantidade de canais utilizados em um sistema, sendo o custo de implementação e o espaço os principais fatores a serem avaliados. Muitas vezes, aumentar o número de transmissores e/ou receptores de 1 para 2 ou 4 já é o suficiente para combater o canal turbulento, conforme apresentado neste trabalho. A medida que o número de canais é incrementado ainda mais, há ganho de diversidade, mas o mesmo tende à saturação, tornando a implementação inviável.

V. CONCLUSÕES

Este artigo apresentou uma análise de desempenho numérica detalhada de um sistemas FSO operando com MIMO sob canal de turbulência Gamma-Gamma. Foram apresentados os fundamentos teóricos da diversidade espacial e a modelagem matemática do canal de turbulência Gamma-Gamma, além de investigações da taxa de erro de bits para condições de turbulência fraca, moderada e forte, tomando-se como base o limite de FEC atual de $3,8 \times 10^{-3}$. Utilizou-se simulações de Monte Carlo em algoritmo próprio, criado pelos autores em ambiente Matlab. A utilização de diversidade se mostrou

uma poderosa ferramenta para o combate às turbulências atmosféricas e resultados numéricos demonstraram ganhos de até 27 dB em condições severas de desvanecimento, por meio da utilização de quatro canais entre transmissão e recepção. Como trabalhos futuros, almeja-se a generalização do código para qualquer ordem e tipo de modulação e qualquer ordem de diversidade, além da análise de correlação entre canais e validação experimental dos resultados numéricos apresentados.

AGRADECIMENTOS

Este trabalho foi parcialmente financiado pelo projeto RNP, com pesquisas do MCTIC, No. 01250.075413/2018-04, Centro de Referência em Radiocomunicações - CRR do Inatel. Os autores também agradecem ao suporte financeiro da CAPES, FINEP, CNPq e FAPEMIG.

REFERÊNCIAS

- [1] R. Agrawal e A. Bedekar, "Network Architectures for 4G: Cost Considerations [Wireless Broadband Access]", *IEEE Communications Magazine*, v. 45, n. 12, pp. 76–81, 2007.
- [2] 3GPP, "5G; Study on Scenarios and Requirements for Next Generation Access Technologies", versão 14.2.0 Release 14, *3GPP TR 38.913*, 2017.
- [3] E. Westerberg, "4G/5G RAN Architecture: How a Split Can Make the Difference", *Ericsson Technology Review*, v. 93, n. 6, pp. 1–16, 2016.
- [4] I. Philbeck, "Connecting the Unconnected; Working together to achieve Connect 2020 Agenda Targets", *ITU White Paper*, 2017.
- [5] C. Wang, J. Bian, J. Sun, W. Zhang e M. Zhang, "A Survey of 5G Channel Measurements and Models", *IEEE Communications Surveys Tutorials*, v. 20, n. 4, pp. 3142–3168, 2018.
- [6] E. G. Larsson, O. Edfors, F. Tufvesson e T. L. Marzetta, "Massive MIMO for next generation wireless systems", *IEEE Communications Magazine*, v. 52, n. 2, pp. 186–195, 2014.
- [7] A. B. Raj e A. K. Majumder, "Historical perspective of free space optical communications: from the early dates to today's developments", *IET Communications*, v. 13, n. 16, pp. 2405–2419, 2019.
- [8] W. A. Alathary e E. S. Altubaishi, "On the Performance Analysis of Decode-and-Forward Multi-Hop Hybrid FSO/RF Systems With Hard-Switching Configuration", *IEEE Photonics Journal*, v. 11, n. 6, pp. 1–12, 2019.
- [9] S. Sharma, A. S. Madhukumar e R. Swaminathan, "Effect of Pointing Errors on the Performance of Hybrid FSO/RF Networks", *IEEE Access*, v. 7, pp. 131 418–131 434, 2019.
- [10] T. V. Pham, T. C. Thang e A. T. Pham, "Average achievable rate of spatial diversity MIMO-FSO over correlated Gamma-Gamma fading channels", *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, v. 10, n. 8, pp. 662–674, 2018.
- [11] H. Nouri e M. Uysal, "Adaptive MIMO FSO communication systems with spatial mode switching", *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, v. 10, n. 8, pp. 686–694, 2018.
- [12] Lizhong Zheng e D. N. C. Tse, "Diversity and multiplexing: a fundamental tradeoff in multiple-antenna channels", *IEEE Transactions on Information Theory*, v. 49, n. 5, pp. 1073–1096, 2003.
- [13] S. M. Alamouti, "A simple transmit diversity technique for wireless communications", *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, v. 16, n. 8, pp. 1451–1458, 1998.
- [14] V. A. Aalo, "Performance of maximal-ratio diversity systems in a correlated Nakagami-fading environment", *IEEE Transactions on Communications*, v. 43, n. 8, pp. 2360–2369, 1995.
- [15] Z. Ghassemlooy, W. Popoola e S. Rajbhandari, *Optical Wireless Communications: System and Channel Modelling with MATLAB*, 1st. Boca Raton, FL, USA: CRC Press, Inc., 2012.
- [16] J. Fang e *et al.*, "Polar-coded MIMO FSO communication system over gamma-gamma turbulence channel with spatially correlated fading", *IEEE/OSA Journal of Optical Communications and Networking*, v. 10, n. 11, pp. 915–923, 2018.
- [17] L. Mroueh, "Extended Golden Light Code for FSO-MIMO Communications With Time Diversity", *IEEE Transactions on Communications*, v. 67, n. 1, pp. 553–563, 2019.
- [18] R. Lin e *et al.*, "Real-time 100 Gbps/ λ /core NRZ and EDB IM/DD transmission over multicore fiber for intra-datacenter communication networks", *Opt. Express*, v. 26, n. 8, pp. 10519–10526, 2018.