

Compensação do Efeito da Variação da SOP em Técnica de Monitoração de OSNR via DSP

João Carlos S. S. Januário, Heitor S. Carvalho e Juliano R. F. de Oliveira

Resumo— O efeito da variação do estado de polarização em sinais não coerentes modulados no formato OOK a 40Gbps foi considerado neste artigo para a estimação da OSNR através da técnica baseada na diversificação de polarização usando processamento digital de sinais (DSP). Através da caracterização deste efeito, sua influência é compensada e uma maior acurácia é alcançada na monitoração da OSNR.

Palavras-Chave— Monitoração, OSNR, DSP, Fotodetector, Polarização.

Abstract—The effect of variation in the state of polarization (SOP) in the non coherent signals modulated by OOK 40Gbps was considered in this work to estimate the OSNR through polarization diversity and digital signal processing technique. Through a characterization of this effect, its influence is compensated and a high accuracy is achieved for OSNR monitoring.

Keywords—Monitoring, OSNR, DSP, Photodetector, Polarization.

I. INTRODUÇÃO

A qualidade do sinal na camada óptica pode ser avaliada de diversas maneiras, dentre as quais se destaca a relação sinal ruído que quantifica o nível de ruído amplificado de emissão espontânea (ASE – *Amplified spontaneous emission*) em função ao nível de sinal. Esta medida é diretamente relacionada à taxa de erro de bit (BER – *bit error rate*), principal parâmetro para mensurar o desempenho da rede.

Tendo em vista a construção de uma nova geração de sistemas de comunicação, é essencial a implementação de monitores de performance na camada óptica e o desenvolvimento de técnicas adequadas para o seu gerenciamento, tornando-a reconfigurável, com níveis de granularidade adaptados às altas taxas de transmissão impostas pelos sistemas. Por meio da utilização de ROAM (*Reconfigurable optical add-drop multiplexers*), que permitem a adição ou remoção de canais diretamente da camada óptica, o histórico de transmissão de cada canal óptico é distinto, o que acarreta um nível de ruído intra banda diferente entre os canais adjacentes. Como resultado, após várias filtragens, perde-se a referência do nível de ruído em relação ao sinal, e a estimação da OSNR por interpolação linear não é mais viável.

Para superar a perda de precisão na estimativa de OSNR pelo método convencional de interpolação linear, foram propostos métodos que estimam o nível de ruído ASE dentro da largura de banda do sinal. Dentre estes podemos citar o método conhecido como *polarization nulling*, ou anulação de polarização, o qual assume que o sinal é completamente polarizado, enquanto que o ruído é completamente

despolarizado[1]. Nesta técnica o canal óptico é filtrado e em seguida passa por um controlador de polarização para que todos os estados de polarização sejam selecionados através de um polarizador. Esta varredura é feita paralelamente com a medição da potência óptica na saída do polarizador, assim, o ponto de mínima potência significa a extinção do sinal, havendo apenas ruído ASE, enquanto que o ponto de máxima potência é o momento em que há ruído ASE mais sinal. As situações de máxima e mínima potência permitem formar um sistema capaz de estimar a OSNR, contudo, esta técnica é sensível a efeitos dispersivos, tal como a PMD (*Polarization mode dispersion*). Existem outras técnicas para a estimação intra banda da OSNR, tais como: a técnica interferométrica[2], o método que se baseia na operação do EDFA[3], a técnica que utiliza grade de acoplamento em conjunto com fotodetector integrado[4], e outros. Apesar de apresentarem pontos relevantes, quando consideramos a necessidade da monitoração da OSNR ocorrer em pontos específicos ao longo de todo o enlace óptico, um requisito para a escolha do método a ser adotado é o seu baixo custo, o que implica na simplicidade do setup experimental utilizado, limitando a aplicação das técnicas existentes.

A utilização de processamento digital de sinais para a estimação intra banda da OSNR é um método bastante promissor por sua simplicidade e precisão. A técnica desenvolvida por [5] fez uso de processamento digital de sinais em um método de diversificação das polarizações, de forma que a influência da PMD de primeira ordem, DGD (*differential group delay*), na monitoração pode ser desconsiderada e ainda apresenta um baixo erro de estimação e fácil implementação em hardware. Apesar de todas as vantagens apresentadas, o modelo proposto possui algumas limitações que em uma situação não ideal devem ser abordadas para garantir a qualidade da estimação. Estas limitações foram inicialmente tratadas em [6], no qual o ruído térmico do fotodetector é considerado.

Outro ponto que necessita ser considerado na estimação da OSNR é o batimento presente no fotodetector. Idealmente este efeito não é significativo, contudo, em um modelo mais realista, à medida que o estado de polarização, SOP (*state of polarization*), varia, o batimento sinal-ruído passa a ser significativo para a estimação da OSNR. Tal fato é abordado neste trabalho e um modelo para compensar este efeito é apresentado, o que ainda não foi feito nos métodos anteriores que abordam a diversidade de polarização usando processamento digital de sinais.

II. DESENVOLVIMENTO

O setup proposto para monitoração de OSNR pelo método de diversificação de polarização utilizando processamento

digital de sinais é proposto em [5] e é baseado em uma análise singular das componentes ortogonais da polarização do sinal de entrada. Através do uso de um PBS essas componentes do sinal são separadas e por meio de fotodetectores são convertidas do domínio óptico para o elétrico para que em seguida técnicas de processamento digital de sinais possam ser usadas para estimar a OSNR do canal óptico. A fig. 1 apresenta um esquemático do setup usado para este método.

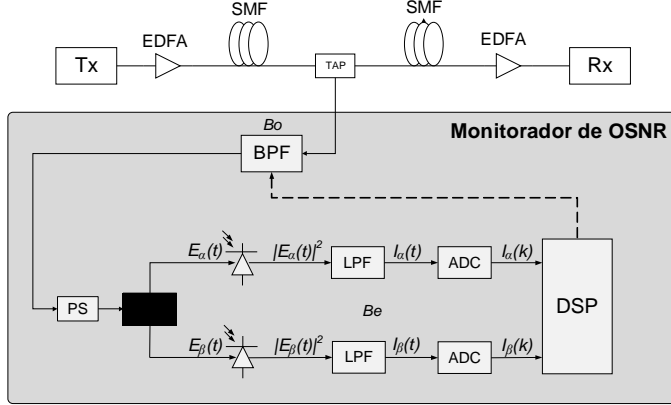


Fig. 1 Esquemático do Modelo de Monitoração

Ao sinal chegar no módulo de monitoração, um filtro óptico passa faixa, BPF, de largura de banda B_o seleciona o canal desejado para análise; em seguida um *polarization scrambler*, PS, possibilita que vários estados de polarização sejam selecionados para que o efeito da variação da SOP possa ser analisado na estimação de OSNR. O PBS separa as componentes ortogonais da polarização nos eixos α e β para que após a conversão para o domínio elétrico um filtro de largura de banda B_e e resposta ao impulso $h_e(t)$ possa fornecer as correntes $I_\alpha(t)$ e $I_\beta(t)$ para serem amostradas em um conversor analógico digital, ADC, e, assim, sirvam de entrada ao DSP. Tendo em mente o setup descrito, algumas considerações devem ser feitas para a solução do problema, dentre estas há a não inclusão das não lineares da fibra junto com os efeitos de multi canais, também não serão considerados os efeitos dispersivos de segunda e terceira ordem.

As correntes $I_\alpha(t)$ e $I_\beta(t)$ podem ser expressas pelas equações 1 e 2, nas quais há a contribuição do ruído ASE e também do ruído térmico.

$$I_\alpha(t) = |E_\alpha(t)|^2 = \left(E_{\alpha,s}(t) + E_{\alpha,s+ase}(t) + |n_\alpha(t)|^2 + n_{t1}(t) \right) \otimes h_e(t) \quad (1)$$

$$I_\beta(t) = |E_\beta(t)|^2 = \left(E_{\beta,s}(t) + E_{\beta,s+ase}(t) + |n_\beta(t)|^2 + n_{t2}(t) \right) \otimes h_e(t) \quad (2)$$

Nas equações acima, $E_{\alpha,s}(t)$ e $E_{\beta,s}(t)$ são as componentes de sinal em cada um dos braços, $E_{\alpha,s+ase}(t)$ e $E_{\beta,s+ase}(t)$ são as componentes do batimento sinal-ruído, $|n_\alpha(t)|^2$ e $|n_\beta(t)|^2$ correspondem ao batimento ruído-ruído no fotodetector.

A. Modelo Matemático em Condições Ideais

Dadas as equações das correntes elétricas formadas a partir dos fotodetectores, o modelo matemático sugerido por [5] para se chegar à estimação da OSNR utilizará para sua simplificação a propriedade do ruído térmico inserido pelos fotodetectores ser um ruído branco com distribuição gaussiana. Essa mesma propriedade pode ser estendida para a análise do batimento sinal-ruído, que em uma situação ideal assume média igual a zero independente da polarização trabalhada.

Ainda no setup proposto, uma vez considerado que os fotodetectores utilizados são semelhantes, a influência do ruído térmico será tida como igual para ambas as componentes ortogonais da polarização do sinal de entrada trabalhadas no monitorador de OSNR. Dessa forma, assumindo um comportamento ideal para este ruído, com média igual a zero, seu efeito é descrito em [6].

As equações que definem o modelo apresentado relacionam a média das correntes fornecidas pelos fotodetectores com os valores da potência de sinal, P_s , e de ruído, P_{ase} , do canal óptico. Essas relações são estabelecidas pelo princípio de funcionamento do PBS, o qual distribui o ruído ASE de forma igual nos seus ramos, pois a ASE é um sinal despolarizado, enquanto que a forma como sinal é dividido é ponderada segundo o seu estado de polarização, sendo um fator multiplicativo r o indicativo desta ponderação. Dessa forma, a média das correntes pode ser descrita pelas equações 3 e 4.

$$\langle I_\alpha(t) \rangle = rP_s + P_{ase}/2 \quad (3)$$

$$\langle I_\beta(t) \rangle = (1-r)P_s + P_{ase}/2 \quad (4)$$

Decorrente das equações acima, a equação 5 pode ser definida.

$$\langle I_\alpha(t) \rangle + \langle I_\beta(t) \rangle = P_s + P_{ase} \quad (5)$$

Para tornar o sistema possível de solução, mais uma relação deve ser acrescentada. Esta relação foi sugerida por [5] e está representada em 6.

$$\langle [I_\alpha(t) - \gamma \cdot I_\beta(t)]^2 \rangle \quad (6)$$

Onde $\gamma = r/(1-r)$.

O sistema formado pelas equações 5 e pela relação 6, junto com as equações 3 e 4, permite que a potência do sinal e do ruído sejam calculadas e, assim, o valor de OSNR possa ser alcançado para uma banda equivalente de ruído (NEB) determinada pela largura de banda de 50GHz do filtro BPF presente no setup experimental. Considerando uma resolução de 0,1nm, a OSNR pode ser expressa pela equação 7.

$$OSNR (dB) = 10 \cdot \log_{10} \frac{P_s}{P_{ase}} + 10 \cdot \log_{10} \frac{NEB(nm)}{0.1 (nm)} \quad (7)$$

Além das vantagens apresentadas pela simplicidade de implementação em hardware, por meio de uma filtragem elétrica adequada esta técnica pode ser considerada insensível à influência de efeitos dispersivos, tal como a DGD (*differential group delay*) demonstrado em [5].

B. Influência da variação da SOP na Técnica de Estimação da OSNR

A simplificação do modelo matemático usado na monitoração de OSNR é válida para se comprovar os conceitos envolvidos no problema, contudo, uma vez que um setup experimental é pretendido, as suposições que afastam o modelo ideal do real devem ser revistas e seus efeitos analisados. Dessa forma, uma das considerações a ser abordada é a que envolve o funcionamento do fotodetector, pois entre os efeitos que o caracterizam há o ruído *shot*, o ruído térmico e o batimento entre sinal, ruído e sinal-ruído. O ruído *shot* apesar de existente não é relevante para o setup analisado, pois, seguindo a proposta de monitoração, apenas uma amostra do sinal é utilizada para a estimação da relação sinal ruído, o que sugere que a potência de entrada é baixa para o monitorador e, conseqüentemente, para os componentes que o constituem. Assim, sendo a potência de entrada baixa no fotodetector a influência do ruído *shot* pode ser desprezada. Já o ruído térmico não possui sua amplitude dependente da potência do sinal de entrada, seu efeito varia em função de um conjunto de variáveis que vão desde constantes físicas, como a constante de Boltzmann, a valores de temperatura e resistência de carga do circuito de recepção.

Através do ambiente de simulação OptiSystem®, o esquemático do modelo de monitoração de OSNR descrito pela fig. 1 foi implementado segundo o *layout* apresentado na fig. 2. Nele o sinal óptico modulado a 40Gbps no formato NRZ-OOK foi gerado e posto sob o efeito de um rotacionador de polarização para indicar a variação da SOP do sinal, além de um atenuador seguido por um modelo de fibra. Logo em seguida este sinal foi acoplado ao ruído ASE gerado de forma independente através de um amplificador de fibra dopada com érbio, EDFA. Uma vez presente o sinal e o ruído em uma mesma fibra óptica, um filtro óptico passa banda seleciona o canal na grade de 50GHz, e este segue para um PBS e um conjunto de fotodetectores e filtros elétricos passa baixa com frequência de corte em 150MHz. O sinal resultante foi adquirido com uma frequência de amostragem de 320Gsps e processado por meio do software Matlab®.

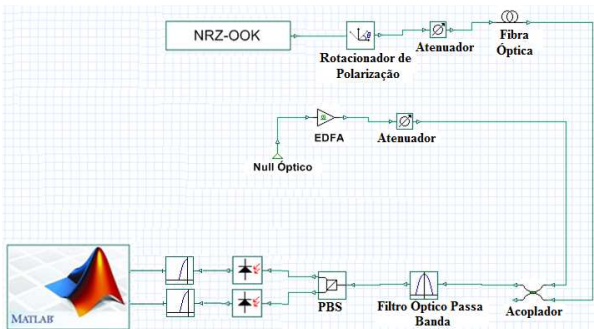


Fig. 2 Layout da simulação feito no ambiente OptiSystem.

A partir do ambiente descrito pela fig. 2 os efeitos relacionados ao ruído térmico foram acrescentados no modelo proposto por [5], o que tornou possível alcançar os resultados descritos por [6], os quais quando avaliados sob a influência da variação da SOP do sinal de entrada fornece uma qualidade de estimação descrita pela fig. 3.

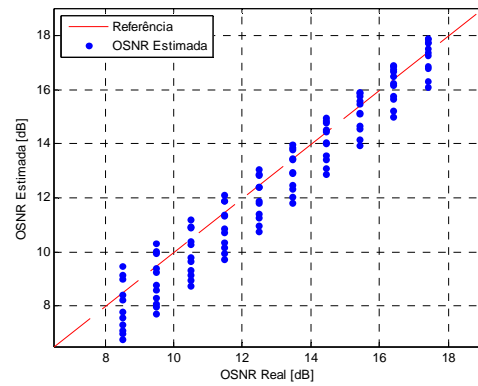


Fig. 3 Influência da variação da polarização do sinal de entrada na estimação da OSNR.

Na fig. 3 é possível observar o comportamento da estimação de um dado valor de OSNR em função da variação da SOP do sinal de entrada. Para cada valor de OSNR analisado o método de estimação foi aplicado para diferentes estados de polarização do sinal de entrada, o que permite analisar a influência da variação da SOP na qualidade da estimação. A análise da fig. 2 permite concluir que o modelo até aqui considerado para a estimação da relação sinal ruído óptica pela técnica de diversificação de polarização com processamento digital de sinal tem seu desempenho dependente da variação da SOP do sinal de entrada. Portanto, é preciso aprimorar este modelo para que esta dependência não exista e a robustez necessária para prover a estimação da OSNR em situações reais seja alcançada.

C. Caracterização para um Sistema Não Ideal

Um ponto que precisa ser abordado para aproximar o método proposto de uma condição real é o efeito do batimento sinal-ruído no fotodetector. O batimento que ocorre entre sinal-sinal e entre ruído-ruído já foi incluído no modelo matemático inicial, contudo o batimento entre sinal-ruído que a princípio foi considerado como sendo ideal, agora precisa ser estudado em uma situação não ideal.

As características estocásticas do batimento sinal ruído permite representá-lo através de sua variância, descrita pela equação 8 [7] e relacionada à potência do sinal.

$$\sigma_{s-ase}^2 = 4 \rho^2 P_{ase}(t) P_s(t) \tag{8}$$

Como observado pela equação 8, a potência do batimento sinal-ruído é dependente da responsividade do fotodetector, ρ , da potência do sinal, $P_s(t)$, e da potência do ruído, $P_{ase}(t)$, do sistema.

Tendo em mente o setup sugerido para o método de monitoração da relação sinal ruído óptica, cada eixo definido pelas saídas do PBS possui porções de sinal e ruído ASE segundo descritos pelas equações 3 e 4. Apesar de representarem valores distintos, a soma das potências dos braços de saída do PBS indica a potência óptica total do sistema, que deve permanecer constante para um dado sinal independente de seu estado de polarização.

Quando os efeitos que definem o funcionamento de um fotodetector são inseridos entre as variáveis do sistema, há uma mudança na forma como a potência do sistema se comporta no domínio elétrico, o que sugere que esta não mais será independente à variação da polarização do sinal de entrada. Como já discutido, os efeitos do fotodetector significativos ao problema são o ruído térmico e o batimento sinal-ruído. Considerando o ruído térmico, sua influência no sistema pode ser abordada de maneira simplificada se em cada uma das componentes ortogonais da polarização do sinal de entrada tratadas no setup de monitoração, os fotodetectores forem considerados semelhantes, apresentando valores de resistência de carga e ganho de transimpedância iguais. O batimento sinal-ruído também influirá no comportamento da potência elétrica total do sistema, após os fotodetectores, pois à medida que o estado de polarização do sinal de entrada varia, muda-se a porção de sinal presente em cada braço do PBS, e como apresentado na equação 8, essa mudança influirá na variância do batimento.

Uma vez que a variância está relacionada a energia do sinal e ao quadrado de sua média, em uma situação não ideal a média do sinal é alterada de forma não linear diante da mudança do valor de sua variância. Dessa forma, quando considerado o efeito do batimento sinal-ruído, a influência significativa de sua variância implica na perda de validade da equação 5, pois diante da variação da SOP a linearidade existente na distribuição de potência óptica entre as componentes ortogonais da polarização do sinal de entrada não mais se verifica no domínio elétrico.

A partir do modelo de monitoração de OSNR descrito por [6], uma forma de compensar o efeito do batimento sinal ruído no desempenho do método é por meio da caracterização do comportamento do erro de estimação diante da mudança de estado de polarização do sinal de entrada. A utilização dessa caracterização só se torna possível pois para uma certa faixa de OSNR e de potência de entrada o comportamento do erro de estimação obedece um padrão que pode ser obtido e utilizado para mitigar os efeitos da variação da SOP do sinal de entrada. Aplicando esta caracterização, as condições de SOP do sinal de entrada analisadas na fig. 3 foram novamente avaliadas no ambiente de simulação indicado pela fig. 2 e os resultados obtidos para a estimação da OSNR estão descritos na fig. 4.

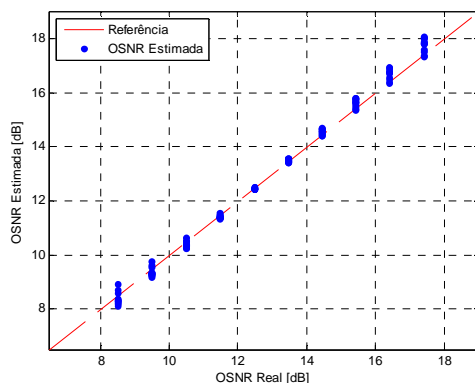


Fig. 4 Estimação da OSNR diante da correção dos efeitos causados pela variação da polarização do sinal de entrada.

III. ANÁLISE E RESULTADOS

Seguindo o esquema proposto pela fig. 1, o setup do modelo de monitoração foi montado no ambiente de simulação Optisystem®, fig. 2, para avaliar o efeito desta mudança da SOP do sinal de entrada, descrita pelo fator multiplicativo r , na potência total do sistema no domínio elétrico. Para tanto, um sinal modulado à taxa de 40Gbps no formato NRZ-OOK foi acoplado a um ruído ASE com potência definida de maneira que o sinal resultante possuísse um valor de OSNR de 10dB. Esta junção de sinal e ruído é posta na entrada de um PBS para que o sinal possa ser separado em suas componentes ortogonais e, em seguida, convertido para o domínio elétrico por um conjunto de fotodetectores. Através do setup proposto em simulação, o comportamento da potência total do sistema no domínio elétrico pôde ser avaliado em função do fator r , variável responsável por ponderar a porção de sinal em cada braço do PBS. A partir de um sistema configurado para se aproximar de um modelo real, os efeitos relacionados ao fotodetector passaram a ser considerados e o comportamento do sistema nestas condições está descritos na fig. 5.

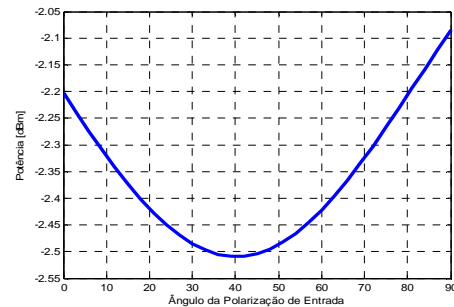


Fig. 5 Comportamento da potência total do sistema no domínio elétrico em função da mudança de polarização.

Como pode ser visto pela fig. 5, a potência do sistema não permanece constante diante da mudança da SOP do sinal de entrada. Tal resultado comprova a perda de validade da equação 5, indicando a importância de se inserir uma modelagem dos efeitos presentes no fotodetector, principalmente do batimento sinal-ruído, que é o principal responsável pelo efeito observado.

Ainda pela ferramenta de simulação Optisystem®, o mesmo sinal de 40Gbps NRZ-OOK foi utilizado em conjunto com ruído ASE para a construção do setup indicado pela fig. 1. Neste cenário, para compensar a dependência da variação da SOP do sinal de entrada na estimação da OSNR, o erro de estimação foi caracterizado para que fosse possível mitigar o efeito do batimento sinal-ruído para uma determinada faixa de OSNR a ser monitorada. A partir dessa caracterização, o erro de estimação ao longo do fator r assume uma nova distribuição, o que garante uma melhor qualidade na monitoração. A fig. 6 mostra essas duas situações, a primeira com erro de estimação influenciado pelo batimento sinal-ruído; e um segundo caso no qual o mesmo erro foi compensado por meio de sua caracterização.

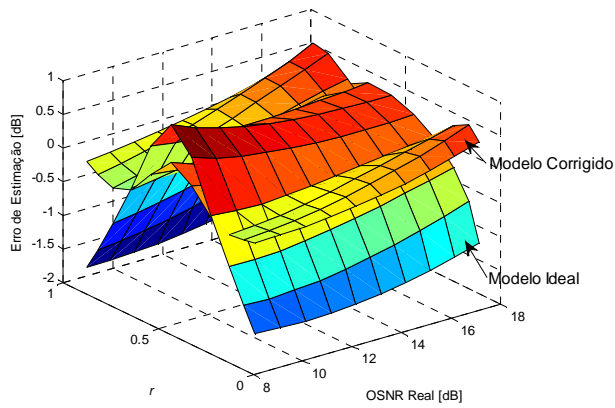


Fig. 6 Erro de estimação da OSNR considerando a variação da polarização do sinal de entrada para os dois modelos apresentados.

Como pode ser visto pela fig. 6 o erro de estimação só tende a um valor mínimo para a condição de r igual a 0,5, ou seja, potência de sinal distribuída igualmente entre os braços do PBS. Nas condições em que o valor de r se afasta dessa situação o erro aumenta, pois em um determinado braço o valor de ruído será diferente da do outro devido ao efeito do batimento sinal ruído. Ainda pela fig. 6 se observa que um erro de aproximadamente 2dB ao longo de uma faixa de OSNR, reduziu-se a menos de 0,5dB depois que sua caracterização foi realizada e aplicada ao sistema. Essa caracterização só é possível, pois o comportamento do erro de estimação apresenta um padrão bem definido ao longo da faixa de OSNR analisada, assim, uma vez definido esse padrão, a caracterização pode ser utilizada para garantir a qualidade de estimação da OSNR.

IV. CONCLUSÕES

Através dos resultados obtidos com a modelagem dos efeitos presentes do fotodetector, observou-se a influência do batimento sinal ruído, cujo valor é dependente da variação da SOP do sinal de entrada. Desconsiderar esse efeito gera erros cada vez maiores à medida que o PBS presente no setup do problema divide as componentes ortogonais da polarização de entrada em porções que fogem da razão 0,5, ou seja, fator r diferente de 0,5. Uma vez que é feita a caracterização do erro de estimação em função da variação de polarização, é possível minimizar este erro de forma a atingir uma acurácia de 0,5dB para uma faixa de OSNR desde 10dB à 20dB.

Dessa forma, se comprova a dependência da qualidade de estimação em função da variação da SOP do sinal de entrada, sendo necessário fazer uma calibração do sistema para que esse efeito seja mitigado.

AGRADECIMENTOS

Gostaríamos de agradecer a Fundação CPqD e ao FUNTTEL, por financiarem este trabalho.

REFERÊNCIAS

- [1] J. H. Lee and Y. C. Chung, "OSNR monitoring technique using polarization nulling method," *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 13, no. 1, pp. 88–90, Jan. 2001.
- [2] E. Flood, W. H. Guo, J. F. Smyth, M. Lynch, A. L. Bradley, L. P. Barry and J. F. Donegan, "Dual Polarization Interferometric In-Band OSNR Measurement", *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 24, no. 11, pp. 873–875, June. 2012.
- [3] Lee JH, Yoshikane N, Tsuritani T, Otani T, "In-band OSNR monitoring technique based on link-by-link estimation for dynamic optical networks", *Optical Fiber Communication Conference, Anaheim, CA, 2006*.
- [4] K. Ku, Y. M. Chen, Z. Z. Cheng, X. Chen, and H. K. Tsang, "OSNR Measurements Using Silicon Grating Coupler and Integrated Photodiode", *Photonics Conference (IPC), ThB6 (2012)*.
- [5] Qi Sui, Alan Pak Lau and Chao Lu, "OSNR monitoring in the presence of first-order PMD using polarization diversity and DSP", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 28, no. 15, pp 2105-2114, Aug. 2010.
- [6] Vitor V. N., João C. S. S. J. e Júlio C. R. F. de O., "Análise de Influência do Ruído Térmico e Filtragem Elétrica em Técnicas de Monitoração de OSNR Digital", *Anais SBRT*, 2011.
- [8] G.P. Agrawal, "Fiber-Optic Communications Systems", 3th ed., (Wiley, 2002).