



Simulações de Controle de Polarização do Sinal Óptico

J. Ferreira¹, A. Bessa dos Santos¹, G. Borghi¹, J. P. von der Weid²

¹ INMETRO – Instituto Nacional de Metrologia, Normalização e Qualidade Industrial – Xerém, Duque de Caxias, Brasil – jferreira@inmetro.gov.br

² CETUC - Centro de Estudos em Telecomunicações - Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – Rio de Janeiro, Brasil

Abstract: This work presents a simulation tool for calculation of the optical signal polarization. Calculations are performed in time domain, allowing the simulation of the temporal evolution of differential group delay (DGD), principal states of polarization (PSP) and output polarization state (SOP). Results show that using two multiplexed signals we can provide a very good control of the polarization states.

Palavras chave: polarização, dispersão dos modos de polarização (PMD), controle de polarização.

1. INTRODUÇÃO

Os sistemas de comunicações ópticas modernos são cada vez mais complexos e cheios de funcionalidades. A transmissão em fibras ópticas está sujeita a uma série de eventos que podem degradar o sinal. Entre os problemas estão ASE (*Amplified Spontaneous Emission*), dispersão cromática, não-linearidades, ganhos e perdas dependentes da polarização, e dispersão dos modos de polarização (PMD - *Polarization Mode Dispersion*). Este último, tem natureza aleatória, dependente da variação do ambiente e, portanto, gera grande incerteza no que concerne à sua previsão [1].

A PMD sofre variações ao longo do tempo cujas fontes são as mudanças na magnitude ou na orientação das birrefringências na fibra ao longo do tempo. Logo, perturbações ambientais como temperatura, pressão, estresse, curvaturas, etc., são fatores que influenciam nas variações da PMD [2]. Este fenômeno, completamente relacionado com a variação dos estados de polarização do sinal óptico, é considerado um dos grandes obstáculos para a implantação e bom funcionamento dos sistemas com altas taxas de transmissão, 40 Gbit/s ou maiores [3].

Um controle preciso do comportamento da polarização é bastante importante para se obter uma performance “ótima” de componentes e sistemas de transmissão ópticos. Algumas características destes sistemas (perdas de inserção, perdas, ganhos e dispersão dependentes da polarização) têm grande dependência do estado de polarização do sinal e devem ser cuidadosamente contabilizadas para o projeto e bom funcionamento desses sistemas ópticos.

Nesse trabalho pretende-se, primordialmente, analisar aspectos sobre polarização do sinal óptico de sistemas de transmissão. A informação adquirida será aplicada no desenvolvimento de diferentes formas de controle de polarização. Vários trabalhos consideram o controle de polarização no processo de compensação de PMD [4]. Um elemento controlador de polarização, posicionado a partir de um sistema de controle, é essencial no funcionamento desses sistemas de controle e compensação de PMD, pois é através dele que se alinhará o PSP (estados principais de polarização) de saída da fibra com o PSP da linha de atraso, acoplando o eixo rápido da fibra no lento da linha de atraso e vice-versa, para o caso de pós-compensação, ou ainda através dele que se encontrará o PSP de entrada do sistema e se lançará a luz para sistemas pré-compensados [5].

Na expectativa de melhorar a eficiência dos sistemas implantados ou ainda na fase de concepção, faz-se indispensável o trabalho realizado através da previsão de dados, foco deste trabalho.

2. SIMULADOR

Para simular uma fibra óptica foi utilizado o formalismo de Jones. Através desse recurso matemático, descrito em [6], a matriz de transferência da fibra é calculada em função da variação do comprimento de onda. Para as simulações realizadas nesse trabalho, foi inserida uma variável extra no equacionamento da matriz de Jones: o tempo. A inserção dessa variável permite a análise do comportamento contínuo da PMD ao invés de apenas seu comportamento estatístico [7].

Simulações do fenômeno da PMD normalmente fazem uso da equivalência frequência-tempo para prever o comportamento estatístico do atraso entre os modos de polarização (DGD) e outras variáveis das fibras monomodo. Pode-se também obter dados sobre o comportamento estatístico da PMD experimentalmente, através de medidas espectrais [8]-[9]. Apesar de serem eficientes, estes métodos oferecem apenas o comportamento estatístico, correlações, distribuições de probabilidade, etc., mas nenhuma informação sobre a evolução real das quantidades tais como

a polarização estados (SOP), atraso diferencial de grupo (DGD) ou estados principais de polarização (PSP). Simulações no domínio do tempo podem ser usadas no desenvolvimento de algoritmos de controle de polarização ou compensação de PMD. Nas transmissões WDM (*Wavelength Division Multiplex*) é interessante conhecer ou prever a evolução temporal destas quantidades e comparar ou correlacionar o comportamento dos diferentes canais.

A matriz de Jones, $T(\omega, t)$, que descreve a fibra na frequência óptica ω e tempo t (variável temporal de variação da birrefringência) é calculada por N produtos sucessivos de duas matrizes representando a matriz de birrefringência do n -ésimo segmento de fibra e acoplamento aleatório em cada emenda [7].

$$T(\omega, t) = \prod_{n=1}^N \begin{bmatrix} e^{j b_n(t) \omega h_n / 2} & 0 \\ 0 & e^{-j b_n(t) \omega h_n / 2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \cos \alpha_n & \sin \alpha_n \\ -\sin \alpha_n & \cos \alpha_n \end{bmatrix} \quad (1)$$

Utilizando-se a matriz acima, foram realizadas simulações para o estudo do controle de polarização. A idéia é, então, aplicar ao sistema algum tipo de controle para que a polarização na saída do sistema sofra o menor número possível de variações, ou seja, mantenha-se estável mesmo com as variações ocorridas na fibra ao longo do tempo.

O sistema básico a ser simulado é apresentado na equação abaixo:

$$S_{out} = T_w * S_{in} \quad (2)$$

onde S_{in} é a polarização do sinal de entrada, mantido fixo, S_{out} é a polarização do sinal de saída e T_w é a matriz, variante no tempo, de transferência da fibra. Logo, para um dado valor S_{in} é possível obter uma saída correspondente, S_{out} , que está diretamente relacionada com as variações inseridas pela fibra óptica. Aqui, considera-se somente a existência da fibra no sistema de transmissão, sem componentes extras modificadores da polarização. Nesse caso, toda a variação sofrida pelo sinal de entrada é consequência da propagação pela fibra óptica.

4. RESULTADOS

Na figura abaixo, Figura 1, é apresentado o resultado simulado para a equação (2). Aqui, é utilizada uma representação gráfica dos estados de polarização, conhecida como Esfera de Poincaré. Essa ferramenta tridimensional representa o SOP através do vetor de dispersão, cujo módulo é igual ao DGD entre os PSP's na frequência ω e cuja direção Ω na esfera de Poincaré é, por definição, o vetor PSP mais lento. Como os PSP's são ortogonais, só é necessário representar um deles. Como na esfera, um estado de polarização qualquer é representado por um ponto, uma evolução contínua da polarização assumida pelo vetor Ω representa um caminho contínuo na superfície da esfera.

Para a simulação mostrada na Figura 1, foi considerado um valor fixo para o sinal de entrada, S_{in} , e uma fibra com

PMD igual a 0,6 ps. Como não existe nenhum mecanismo de controle, a polarização do sinal de saída irá variar livremente, preenchendo toda a Esfera de Poincaré, de acordo com a modificação realizada pela matriz de transferência da fibra, $T(\omega, t)$.

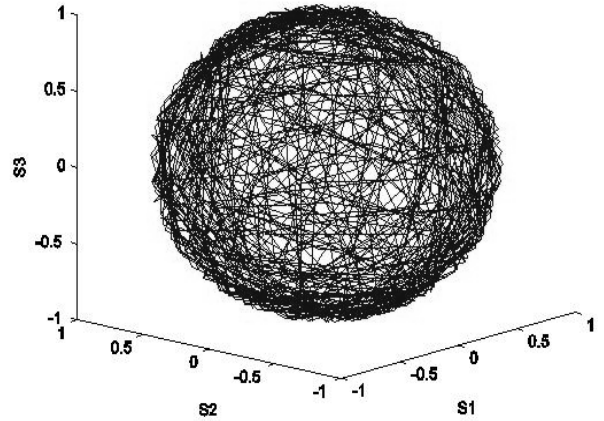


Fig. 1. Representação gráfica da variação da polarização de saída de um sistema óptico sem a presença de controle.

Entretanto, em diversas situações, é desejável que o sistema óptico obedeça a determinadas diretrizes de comportamento, fazendo-se necessário a inserção de algum sistema de controle. A idéia inicial para o controle da polarização é um recurso bastante simples e direto que consiste em multiplicar a matriz de transferência $T(\omega, t)$ por alguma outra matriz, idêntica e de efeito contrário, que anule a transformação ocorrida, conforme equação abaixo.

$$S_{out} = T_w^{-1} * T_w * S_{in} \quad (3)$$

Logo, realizando-se essa transformação, o estado de polarização de saída torna-se idêntico ao estado de polarização de entrada, realizando assim controle perfeito da transmissão:

$$S_{out} = S_{in} \quad (4)$$

A representação da polarização de saída, para a situação descrita na equação (4), na Esfera de Poincaré é um ponto fixo, com direção igual à da polarização de entrada, S_{in} . Apesar de ideal, o modelo de controle citado acima sofre "limitações" na sua implementação pois a precisão do controle estará sujeita a algumas dificuldades de ordem prática. Pode-se citar a situação onde a fibra possui altos valores de PMD, que provocam variações muito rápidas na polarização do sinal. Nesse caso, é preciso um tempo muito pequeno para a aquisição dos dados na saída da transmissão e envio dos mesmos para a realimentação do sistema.

Também existe a dificuldade de se lidar com sistemas onde o canal de transmissão não deve ser manipulado, como no caso de transmissões criptografadas. Nesse caso, uma saída possível é utilizar outros canais que não o de

transmissão para auxiliar nesse processo de controle [10]. Isso pode ser conseguido utilizando-se sistemas de transmissão com múltiplos comprimentos de onda (WDM).

Nesse trabalho é considerada a problemática do uso do próprio canal como realimentação. Trabalhos que utilizam o canal de transmissão como canal de realimentação mostram bons resultados para a compensação da PMD [11].

O espaçamento entre canais também pode ser variado, modificando o resultado encontrado. Espera-se que quanto menor o espaçamento entre os canais utilizados, mais preciso será o controle realizado, devido a semelhança entre os comprimentos de onda.

A equação abaixo, equação (5), insere um controle realizado por um canal diferente do canal de propagação do sinal óptico. Aqui, a matriz de transmissão da fibra para um determinado comprimento de onda (T_{w1}) é multiplicada pela inversa da matriz de transmissão da mesma fibra para um comprimento de onda diferente (T_{w2}). Dessa forma, o resultado da multiplicação não é uma matriz unitária, mas uma matriz que carrega informação sobre a diferença desses dois comprimentos de onda.

$$S_{out} = T_{w2}^{-1} * T_{w1} * S_{in} \quad (5)$$

Na Figura 2, é mostrado o resultado de uma simulação onde o um canal é controlado pelo seu canal adjacente, espaçado de 0,8 nm, conforme mostrado na equação abaixo. Neste caso, a diferença entre a matriz T_{ω} do canal 1 e do canal 2 produzem as variações do Sout na esfera de Poincaré.

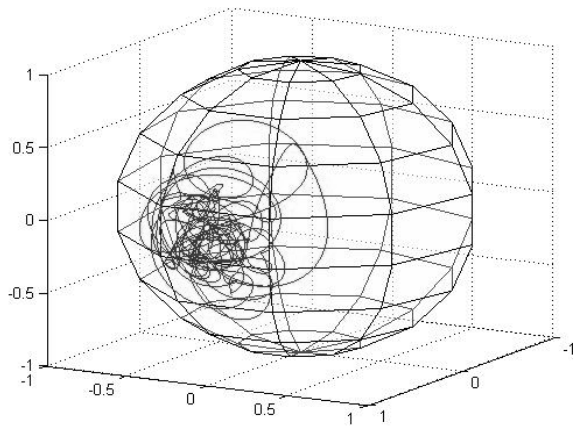


Fig. 2. Evolução do SOP de saída do sistema, para um determinado canal sendo controlado pelo canal vizinho, espaçado de 0,8 nm.

Foi testado um tipo diferente de controle, onde a matriz T_{ω} a ser multiplicada para realizar o controle é o resultado da média das matrizes adjacentes ao canal que se tenta controlar. Assim, a equação (6), mostrada abaixo, apresenta a modificação realizada a ser implementada na simulação.

$$S_{out} = \left(\frac{T_{w1} + T_{w3}}{2} \right)^{-1} * T_{w2} * S_{in} \quad (6)$$

Na Figura 3, é mostrado o resultado para este tipo de controle, estando os canais espaçados de 0,8 nm do seu adjacente. O resultado do controle efetuado é bastante superior ao mostrado na Figura 2 para um mesmo valor de espaçamento entre canais. Conclui-se portanto que a média das matrizes T_{ω} adjacentes ao canal a ser controlado é mais semelhante à matriz T_{ω} deste canal que a matriz T_{ω} do canal vizinho a ele.

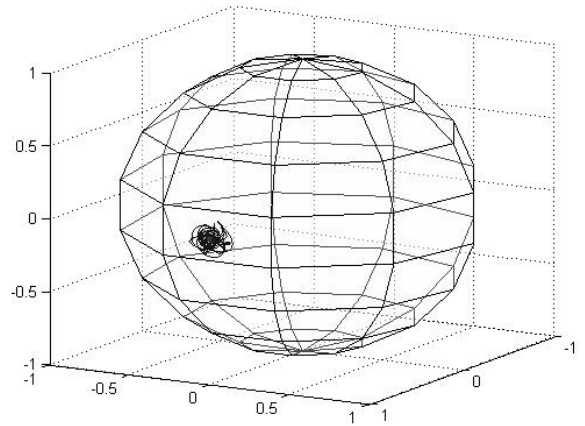


Fig. 3. Evolução do SOP de saída do sistema, para um determinado canal sendo controlado pela média dos canais adjacentes. Cada um dos canais adjacentes é espaçados de 0,8 nm do canal central.

Ainda utilizando a equação (6), o espaçamento entre canais foi variado e foi possível perceber uma melhora significativa no resultado encontrado. Quanto menor o espaçamento, melhor é o controle obtido, sinal do aumento da semelhança entre as matrizes T_{ω} dos canais.

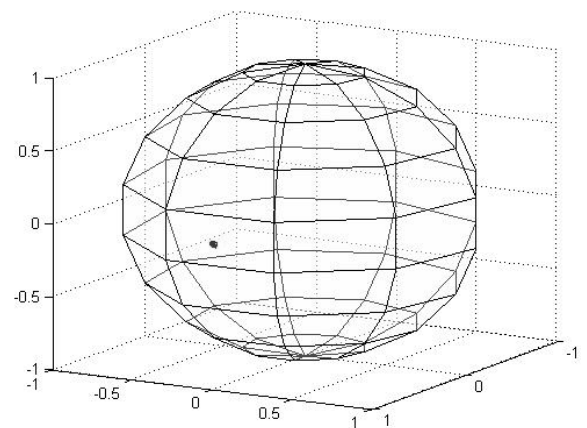


Fig. 4. Evolução do SOP de saída do sistema, para um determinado canal sendo controlado pela média dos canais adjacentes. Cada um dos canais adjacentes é espaçados de 0,4 nm do canal central.

No caso da redução do espaçamento entre canais de 0,8 nm para 0,4 nm, o controle realizado pela média das

matrizes T_{ω} dos canais vizinhos se mostra mais eficiente, permitindo que a variação do S_{out} na esfera de Poincaré seja muito pequena.

5. CONCLUSÃO

Este trabalho apresentou simulações envolvendo controle de polarização. Foram comparados diferentes tipos de realimentação para o controle, envolvendo sistema de transmissão com múltiplos canais. Para esse propósito pode-se utilizar, como realimentação, o sinal proveniente do próprio canal a ser controlado, o sinal de um dos canais adjacentes ao canal a ser controlado ou a média dos sinais dos dois canais adjacentes ao canal a ser controlado. O primeiro caso é considerado ideal, entretanto nem sempre o canal de transmissão está disponível para ser usado como realimentação. O segundo caso, quando temos um canal controlando o adjacente apresenta resultados razoáveis, que dependem do afastamento entre os comprimentos de onda a serem utilizados. Quanto mais próximos melhor é o resultado, pois a semelhança entre o estado atual dos dois canais. No último caso, onde utilizamos dois canais extras ao de transmissão, foram obtidos resultados bastante satisfatórios, também dependentes do espaçamento entre comprimentos de onda. Para um caso de canais espaçados de 0,4 nm o resultado do controle é excelente.

REFERÊNCIAS

- [1] C. Antonelli and Antonio Mecozzi, "Theoretical characterization and system impact of the hinge model of PMD", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 24, n. 11, pp. 4064-4074, Novembro de 2006.
- [2] M. Brodsky, N. J. Frigo, M. Boroditsky and Moshe Tur, "Polarization mode dispersion of installed fibers", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 24, no. 12, pp. 4584-4599, Dezembro de 2006.
- [3] J. Ferreira, "Simulações do Comportamento Temporal da Dispersão dos Modos de Polarização", Tese de Doutorado da PUC-Rio, Abril de 2007.
- [4] Q. Yu, L.-S. Yan, Y. Xie, M. Hauer e A. E. Willner, "Higher Order Polarization Mode Dispersion Compensation Using a Fixed Time Delay Followed by a Variable Time Delay", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 13, n. 8, pp. 863-865, Agosto de 2001.
- [5] L. C. B. Linares, "Estudo da Compensação da Dispersão dos Modos de Polarização em Sistemas Ópticos". Tese de doutorado da PUC-Rio, 2003.
- [6] A. O. Dal Forno, A. Paradisi, R. Passy, and J. P. von der Weid, "Experimental and theoretical modeling of polarization-mode dispersion in single-mode fibers", *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 12, No 3, pp.296 – 298, Março de 2000.
- [7] J. F. Macedo e J. P. von der Weid, "Time Domain PMD Simulations in Optical Fibres and Emulators", *Proc. WFOPC – IEEE/LEOS Workshop of Fibres and Optical Passive Components 2005 Palermo, Italia*, pp. 176-180 Julho de 2005.
- [8] C.D. Poole and D.L. Favin, "Polarization-mode dispersion measurements based on transmission spectra through a polarizer", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 12, no. 6, pp. 917 – 929, Junho de 1994,.
- [9] N. Gisin, J-P. von der Weid and J-P Pellaux, "Polarization mode dispersion of short and long singlemode fibers", *Journal of Lightwave Technology*, vol. 9, no. 7, pp.821-827, Julho de 1991.
- [10] G. Vilela de Faria, J. Ferreira, G. B. Xavier, G. P. Temporão e J. P. von der weid , "Polarization Control Schemes for fibre-optics quantum communications using polarization encoding", *Electronics Letters*, vol. 44, pp. 228 - 229, Janeiro de 2008.
- [11] L. C. B. Linares and J. P. von der Weid, "Performance Comparisons Between First Order Pmd Compensation Techniques", *Journal Of Microwaves And Optoelectronics*, vol. 3, n. 5, pp. 56-63, 2004.