

COMPENSATION ET MODELISATION DE LA DISPERSION MODALE DE POLARISATION

Reinhold Noé

Univ. Paderborn, EIM-E, Warburger Str. 100, D-33098 Paderborn, Allemagne

noe@upb.de

RESUME

La dispersion modale de polarisation (PMD) est un obstacle énorme devant l'augmentation des débits sur une partie des réseaux de la plupart des compagnies de télécommunication. Cet article porte sur la compensation optique de la PMD par des composants de l'optique intégrée et la modélisation d'ordres élevées de la PMD.

MOTS-CLEFS : *dispersion modale de polarisation, PMD, niobate de lithium, LiNbO₃*

1. INTRODUCTION

La non-circularité des guides d'ondes, inévitable désormais, dégénère les modes propres de polarisation dans les fibres optiques. Le retard de phases entre les deux modes orthogonaux de polarisation résulte d'un délai de groupe différentiel (DGD) entre celles-ci. Puisque l'orientation de la non-circularité change en fonction de la distance, il y a une conversion de modes très fréquente. Le délai différentiel total d'une fibre est donc d'habitude beaucoup moins grand que la somme des délais différentiels individuels, mais peut quand même être aussi grand que les débits de 40 Gb/s ou même les débits de 10 Gb/s ne peuvent être transmis sur des distances de quelques 100 km. Pour la compensation de la dispersion modale de polarisation (PMD) [1] il y a plusieurs possibilités:

- Compensation électronique après une photodétection directe. Celle-ci ne peut annihiler qu'une partie des effets de la PMD, puisque les informations sur la polarisation et la phase se perdent lors de la détection.
- Compensation électronique dans un récepteur cohérent avec diversité de polarisations. Malheureusement ceux-ci n'existent pas encore, et devraient être sur-échantillonnés, ce qui est difficile.
- Compensation optique dans au moins une section de délai différentiel.

La dernière de ces possibilités est le sujet de cette communication, ainsi que la modélisation d'ordres élevées de la PMD avec peu de paramètres, qui résulte quand on regarde la fibre optique de la même manière comme un compensateur optique distribué de PMD qui peut être réalisé en niobate de lithium.

2. COMPENSATEUR DISTRIBUE DE PMD EN NIOBATE DE LITHIUM

Une longue fibre optique peut être modélisée par un grand nombre de sections de délai différentiel (Fig. 1), séparés par des transformateurs de polarisation $SBA(\varphi, \psi)$ [2]. Quelques matrices de rotation pour les vecteurs de Stokes normalisés sont (ω = fréquence angulaire optique)

$$SBA(\varphi, \psi) = \begin{bmatrix} \cos \varphi & -\sin \psi \sin \varphi & \cos \psi \sin \varphi \\ \sin \psi \sin \varphi & \cos^2 \psi + \sin^2 \psi \cos \varphi & \cos \psi \sin \psi (1 - \cos \varphi) \\ -\cos \psi \sin \varphi & \cos \psi \sin \psi (1 - \cos \varphi) & \sin^2 \psi + \cos^2 \psi \cos \varphi \end{bmatrix}, \quad PS(-\omega\tau) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \omega\tau & \sin \omega\tau \\ 0 & -\sin \omega\tau & \cos \omega\tau \end{bmatrix}.$$

De manière analogue qu'un compensateur Soleil-Babinet, ceux-ci sont capables de convertir n'importe quelle polarisation dans un mode principal de la section de délai suivante. Implémenter la même structure que la fibre au récepteur permet de compenser toute la PMD. Ceci est possible dans un composant de l'optique intégrée en niobate de lithium en coupe X et propagation Y. Son délai différentiel total est de 25 ps pour un composant d'une longueur de 100 mm. Le vecteur PMD a la direction d'un des PSP dans l'espace des vecteurs de Stokes normalisés avec une longueur égale au DGD. Un SBA introduit l'angle φ entre les directions des vecteurs PMD de deux sections DGD

voisines, et tourne le reste suivant le profil DGD par φ . L'angle ψ définie le décalage de phase entre une onde non convertie et une onde convertie, ce qui permet de l'appeler un angle d'orientation. Un DGD τ est représenté par un retardateur de phase $PS(-\omega\tau)$, et le compensateur PMD complet par le produit

$\prod_{i=n}^1 (PS(-\omega\tau_i)SBA(\varphi_i, \psi_i))$. On peut (Fig. 2) écrire $\varphi_i e^{j\psi_i} = G(V_{1,i} + jV_{2,i})$ avec $G = \text{const.}$, $V_{1,i}, V_{2,i}$ = tensions d'électrodes pour conversion de modes en phase et en quadrature du convertisseur i .

Plusieurs expériences de compensation de la PMD ont été rapportées utilisant ce compensateur quasi distribué de PMD [3, 4]. Le degré d'intégration, la performance optique et le temps de réponse de ce composant sont excellents par rapport à n'importe quelle autre technologie pour la compensation optique de la PMD. Parmi les défis qui restent à surmonter sont le contrôle illimité et rapide de la polarisation et la génération de signaux d'erreur pour les ordres élevés de PMD.

3. MODELISATION D'ORDRES ELEVEES DE LA PMD

La définition de la PMD de premier ordre est connue. Poole et Wagner ont cherché les polarisations principales (PSP) qui ne changent pas, de premier ordre, en fonction de la fréquence optique à la sortie d'une fibre optique et présentant un DGD [1]. Alternativement, on peut déterminer la fonction de transfert d'intensité pour les faibles signaux et trouver les délais extrêmes, donc un DGD, entre deux polarisations orthogonales qui sont les PSP [2]. Pour la PMD d'ordre élevé, la plupart des auteurs la relie à un développement limité de Taylor du vecteur de PMD [5] en fonction de la fréquence optique. Malheureusement il n'y a pas de relation directe aux paramètres physiques de la fibre. Pire que ceci, la trajectoire vraie du vecteur PMD Ω serait une somme de sinus avec des arguments qui dépendent d'une manière linéaire de la fréquence, laquelle n'est pas bien approximée par l'expansion de Taylor.

Sans perte de généralité nous assumons que $\omega\tau_i = 2\pi m_i$ avec m_i entier à la fréquence de la porteuse. La variation de direction entre des sections DGD voisines est le retard φ_i d'un convertisseur de modes. Par rapport à la direction de la section DGD précédente cette variation a lieu à bas/droite/haut/gauche dépendant de ψ_i . Nous proposons de décrire la PMD par un développement en série de Fourier du couplage de modes (FEMC), utilisant: (1) Une conversion de modes indépendante de la fréquence à l'entrée de la fibre. Celle-ci est décrite par deux paramètres, par exemple le retard φ_0 et l'orientation ψ_0 . (2) Un DGD total. (3) Une transformation de polarisation indépendante de la fréquence à la sortie de la fibre. Dans le cas général trois paramètres sont nécessaires, deux pour une conversion de modes et un de plus pour un retard de phases. (4) Des coefficients spatiaux complexes de Fourier $F_k = \sum_{i=1}^n \varphi_i e^{j\psi_i} e^{-j2\pi ik/n}$ de retard ou de couplage de modes le long du médium biréfringent qui montre le DGD total de (2) seulement dans l'absence de conversion de modes. Les points (1-3) sont familiers de la PMD de premier ordre. Seulement l'ajout de (4) mène à une définition naturelle qui inclut la PMD d'ordre élevé. F_0 boucle le profil DGD. Le radius du boucle est proportionnel à $|F_0|^{-1}$. Autres F_k forment des spirales.

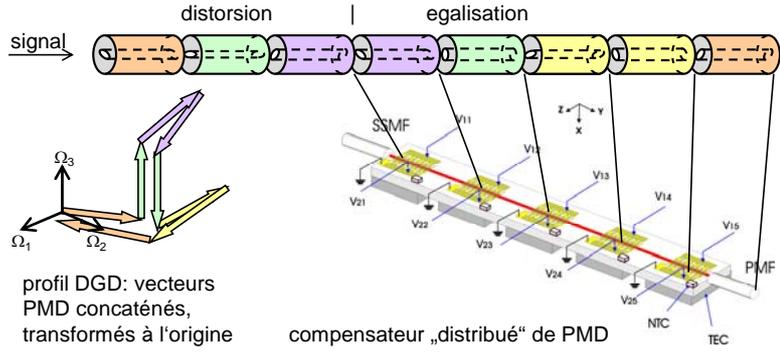


Fig. 1: Modèle d'une fibre optique avec PMD, et sa égalisation par un compensateur en LiNbO₃ avec coupe X, propagation Y, et des transformateurs

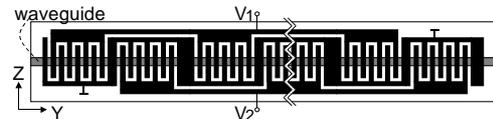


Fig. 2: Electrodes en forme de peigne d'un convertisseur de modes, de type deux phases.

La fig. 3 montre le profil DGD d'un milieu PMD exemplaire comme référence, composé de 16 sections DGD de longueur unité et concaténé avec l'inverse de sa modélisation par FEMC avec $k = -1, 0, 1$. La FEMC montre un profil plus souple que le médium, négligent les parties moins importantes du profil de référence. Quand on lance un pulse optique avec une durée égale au DGD de la structure FEMC, ceci devrait passer sans distorsion si la FEMC approximait la référence parfaitement. Dans cet exemple, ceci est achevé presque parfaitement, avec une suppression de la polarisation orthogonale de ≥ 37 dB. Moyennée sur une totalité de 75 exemples aléatoires, la suppression de la polarisation orthogonale à la sortie de la structure de référence concaténée avec l'inverse du modèle de la PMD est donnée dans le tableau 1. Le développement tronqué en série de Taylor du vecteur PMD était calculé ainsi que l'inverse de la matrice de Jones correspondante [6] pour concaténation avec la référence. Un développement exponentiel était évalué de la même manière [7]. En tout cas la durée du pulse d'entrée était la même, trouvée après convergence de la FEMC. En ordre 1 les méthodes sont identiques et délivrent les mêmes résultats. Aussi pour l'ordre 3 ($|k| \leq (\text{ordre}-2)$ pour la FEMC) le nombre de paramètres est le même pour les trois méthodes. L'amélioration de la suppression de la polarisation orthogonale sur le cas de la PMD de premier ordre est plus que deux fois mieux pour la FEMC que pour les autres méthodes. Ceci n'est pas surprenant puisque la FEMC a des liens étroits avec la PMD naturelle. La détermination des F_k et autres coefficients de la FEMC (DGD total, transformations d'entrée et de sortie) nécessite un processus numérique durant lequel la suppression de la polarisation orthogonale est maximum ainsi la durée du pulse d'entrée est rajustée. Ceci peut être considéré comme désavantage principal de la FEMC. Mais la FEMC est beaucoup mieux adaptée pour décrire la PMD d'ordre élevé que les autres méthodes. Trouver une solution rapide de la FEMC pourrait aider le contrôle de compensateurs distribués de la PMD – ceci étant une question de ne pas être capturé dans des optima locaux pendant le contrôle.

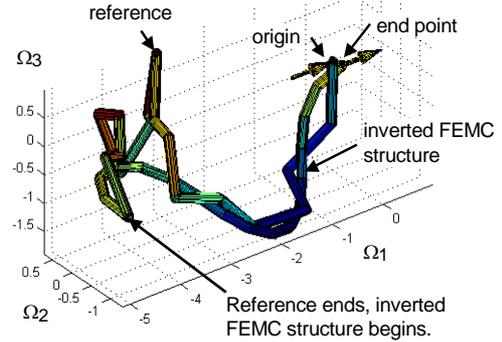


Fig. 3: Profil DGD de référence (médium PMD exemplaire) concaténé avec une structure FEMC inversée (formant un compensateur PMD en même temps). Une unité est la longueur d'une section DGD de la structure référence.

TABLEAU I: SUPPRESSION DE LA POLARISATION ORTHOGONALE PAR DES COMPENSATEURS DONNES PAR QUELQUES DEFINITIONS DE PMD D'ORDRE ELEVEE, MOYENNE SUR 75 EXEMPLES ALEATOIRES

Ordre de la méthode	1	2	3
Longueur de l'impulse d'entrée (normalisée)	5,6	7,2	9,5
Développement de Taylor du vecteur PMD	10,3 dB	14,8 dB	19,9 dB
Développement exponentiel de la matrice de Jones	10,3 dB	12,6 dB	16,1 dB
Développement de Fourier du couplage de modes FEMC	10,3 dB	21,6 dB	35,5 dB

CONCLUSION

La meilleure possibilité pour compenser la PMD avec un grand degré d'intégration semble être l'utilisation d'un composant optique intégrée en LiNbO_3 en coupe X et propagation Y avec plusieurs convertisseurs de mode. Un choix limité de coefficients de Fourier de ce couplage de modes se prête à une modélisation de la PMD d'ordre élevé beaucoup plus exact que par d'autres méthodes connues.

RÉFÉRENCES

- [1] C. D. Poole, R. E. Wagner, *Phenomenological approach to polarization dispersion in long single-mode fibers*, IEE Electron. Letters, vol 22, no. 19, pp. 1029-1030, May 1986
- [2] R. Noé et al., *Polarization mode dispersion compensation at 10, 20 and 40 Gb/s with various optical equalizers*, IEEE Journal of Lightwave Technology 17(1999), pp. 1602-1616
- [3] R. Noé et al., *Integrated optical LiNbO_3 distributed polarization mode dispersion equalizer in 20 Gbit/s transmission system*, IEE Electronics Letters, vol.35, no.8, pp. 652-654, April 1999
- [4] R. Noé, D. Sandel, V. Mirvoda, *PMD in high-bit-rate systems and means for its mitigation*, IEEE J. Selected Topics in Quantum Electronics, Vol. 10, 2005, pp. 341-355
- [5] J.P. Gordon, H. Kogelnik, *PMD Fundamentals: Polarization mode dispersion in optical fibers*, Proceedings of the National Academy of Sciences of the USA, vol. 97, no. 9, p. 4541-4550, Sept 2000
- [6] F. Heismann, *Jones matrix expansion for second-order polarization mode dispersion*, Proc. ECOC-IOOC 2003, Th1.7.5
- [7] A. Eyal et al, *Representation of second-order polarization mode dispersion*, Electron. Lett. 35(1999), pp. 1658-1659