

CARACTERISATION EXPERIMENTALE ET EXTENSION DU MODELE DE BRUIT GAUSSIEN POUR LES SYSTEMES MONOCANAL NON GERES EN DISPERSION

P. Jennevé, P. Ramantanis, J.-C. Antona, G. de Valicourt, M.A. Mestre, H. Mardoyan, S. Bigo

Bell Labs, Alcatel-Lucent, Route de Villejust, 91620 NOZAY, France, philippe.jenneve@alcatel-lucent.com

RÉSUMÉ

Malgré la réception cohérente, la modulation et l'absence de gestion de dispersion, les transmissions optiques monocanal 100Gbit/s ne respectent pas la relation reliant le taux d'erreur et la variance de bruit pour de grandes puissances optiques. L'utilisation d'ordres plus élevés de la distribution du bruit permet d'affiner le taux d'erreur estimé.

MOTS-CLEFS : transmission optique ; effet Kerr ; bruit additif gaussien ; statistiques.

1. INTRODUCTION

Dans les systèmes de transmission optique non gérés en dispersion utilisant le multiplexage en polarisation (PDM) et la modulation à 4 états de phase (QPSK), les distorsions du signal optique sont souvent modélisées par un bruit blanc additif gaussien (AWGN) [1], combinant les contributions des amplificateurs optiques et issues de l'interaction entre effet Kerr et dispersion chromatique. Ce modèle a été validé par des études théoriques, des numériques et expérimentales [1-3]. Dans le contexte de tels systèmes multiplexés en longueur d'onde, de multiples estimateurs de performance (taux d'erreur binaire (BER), facteur Q), qui reposent sur ce modèle [2,3], sont très précis pour des puissances optiques incidentes inférieures ou proches du seuil non-linéaire (NLT) pour lequel la performance est maximisée. Dans cet article, nous nous intéressons à des régimes allant jusqu'à 5dB au delà du NLT, qui peuvent apparaître dans des liens optiques comportant un faible nombre de canaux, voire des liens monocanal.

Notre étude consiste à comparer, pour une grande variété de distances et de puissances optiques, les valeurs du BER (a) directement déterminées à partir du comptage des erreurs et (b) estimées à partir de la variance de la distribution du bruit en supposant dans un premier temps le modèle AWGN. Après avoir montré un écart entre ces deux méthodes pour des puissances supérieures au NLT, nous proposons un nouvel estimateur du BER qui intègre des ordres supérieurs de la distribution statistique du bruit.

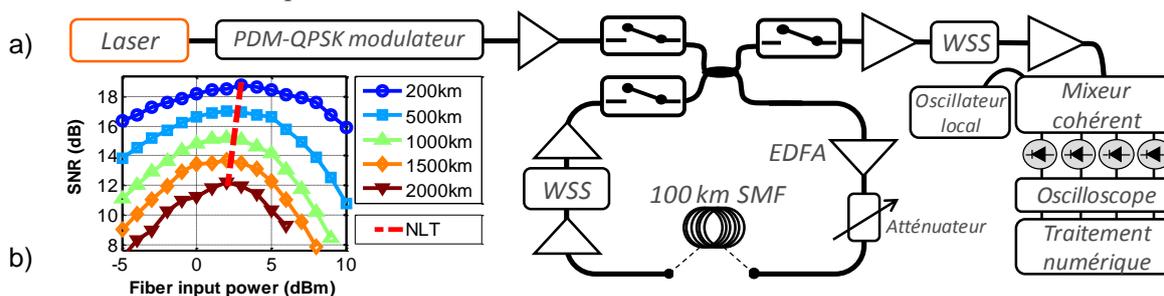


Fig. 1 : a) Montage expérimental. b) Rapport signal sur bruit en fonction de la puissance en entrée de la fibre pour différentes distances. La ligne pointillée matérialise les valeurs du seuil non linéaire.

2. MONTAGE EXPERIMENTAL

La fig. 1a) représente le schéma du dispositif expérimental. L'émetteur est constitué d'un laser semi-conducteur à cavité étendue (ECL) et d'un modulateur QPSK alimenté par deux séquences pseudo-aléatoires de longueur 2^{15} à 28Gbit/s. Le multiplexage de polarisation est ensuite réalisé à partir d'un émulateur pour générer un signal PDM-QPSK à 112Gbit/s incluant 12% de code correcteur d'erreurs et de protocole.

Le signal est amplifié à l'aide d'un amplificateur à fibre dopée erbium (EDFA) et injecté dans une boucle à recirculation composée d'un tronçon de 100km de fibre standard monomode (SMF), de 3 EDFA et d'un commutateur sélectif en longueur d'onde (WSS) pour équilibrer la distribution spectrale du bruit. La puissance optique du signal injecté est variée de -5dBm à 10dBm et la distance de 100km à 3000km. Le récepteur est constitué d'un mixeur cohérent dont les 8 sorties sont reliées à 4 photodiodes équilibrées et un second ECL est utilisé comme oscillateur local. Le signal de détection est échantillonné à 40GS/s à l'aide d'un oscilloscope de 20GHz de bande passante. Des séries d'échantillons de 100µs sont enregistrées et traitées numériquement sur un ordinateur. Le traitement numérique permet la séparation des polarisations, la compensation du décalage en fréquence et la récupération de la phase de la porteuse [4].

La détermination du BER s'effectue en appliquant deux méthodes : (a) un comptage des erreurs via un processus de décision, (b) une estimation à partir de la distribution des échantillons du champ pour chaque symbole de la constellation (Fig. 2). Si le bruit qui a affecté le signal est blanc additif gaussien, alors la distribution des échantillons l'est également. On peut ainsi calculer le taux d'erreur (BER_{AWGN}) (1) en fonction du rapport signal sur bruit (SNR) (2) qui est déterminé à partir de la variance de la partie réelle et imaginaire, σ_{re}^2 , σ_{im}^2 , et de la puissance moyenne P , selon :

$$BER_{AWGN} = 0.5 \times \text{erfc}\left(\sqrt{SNR/2}\right) \quad (1) \quad \text{avec} \quad SNR = \frac{P - (\sigma_{real}^2 + \sigma_{imag}^2)}{(\sigma_{real}^2 + \sigma_{imag}^2)} \quad (2)$$

où $\text{erfc}(\cdot)$ est la fonction erreur complémentaire. Le BER est ensuite converti en facteur de qualité Q selon la relation : $Q^2 = 20 \log_{10}(\sqrt{2} \text{erfc}^{-1}(2 \times BER))$.

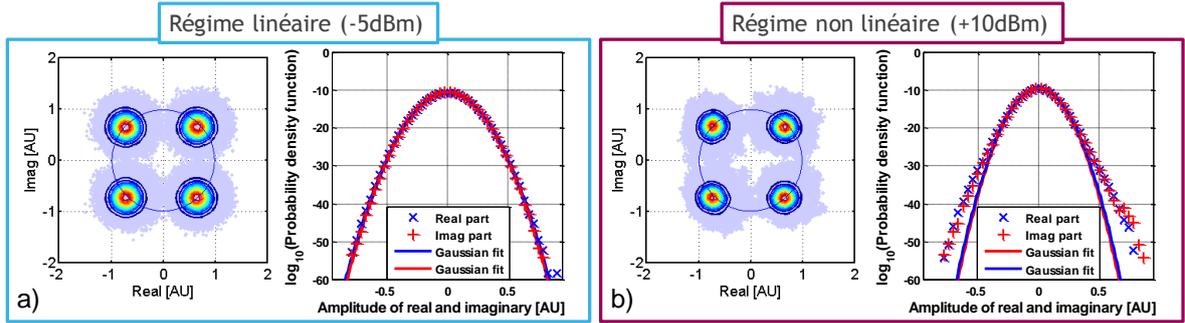


Fig. 2 : PDFs de la constellation QPSK et PDFs des parties réelle et imaginaire de la distribution d'un symbole dans a) le régime linéaire et dans b) le régime non linéaire.

3. CARACTERISATION STATISTIQUE DU BRUIT

La fig. 1b) illustre l'évolution du SNR, mesurée en fonction de la puissance optique en entrée du tronçon de fibre. Le NLT sépare deux régimes de puissance, le régime linéaire où le SNR croît avec la puissance et le régime non linéaire où le SNR décroît. L'écart entre le facteur Q obtenu par comptage d'erreurs et celui estimé à partir des variances de bruits en fonction de la puissance injectée est représenté sur la fig. 3a) pour toutes les distances. Alors que l'écart reste inférieur à 0,2dB pour des puissances inférieures à 1dBm, il grimpe à 1,4dB pour des puissances autour de 8dBm. On note que l'estimation par les variances surestime les performances du système.

Pour comprendre l'origine d'un tel désaccord, nous testons la nature du bruit pour notre système en comparant sur la fig. 2 les fonctions de densité de probabilité (PDF) 2D de la constellation QPSK et des PDFs associées aux parties réelle et imaginaire de la distribution d'un symbole dans les deux régimes. Le régime linéaire est illustré avec une puissance de -5dBm et une distance parcourue de 1000km. Le régime non-linéaire s'observe avec une puissance de 10dBm et une distance parcourue de 300km. Bien que le facteur Q provenant du comptage d'erreur soit identique dans les deux régimes (11,8dB), l'estimation faite à partir du calcul des variances fournit un facteur Q pour les régimes linéaire et non-linéaire respectivement égal à 11,8dB et 13,1dB. En calculant la différence relative entre les variances des parties réelle et imaginaire ou alternativement

entre les variances associées aux signaux en phase et en quadrature, seul un écart de 6% est mesuré, qui se traduit par une différence maximale de facteur Q de 0,12dB. Bien que souvent mise en cause dans le cas où la modulation de phase croisée domine [6], l'anisotropie des distributions de bruit ne peut expliquer l'écart de performance observé. En revanche, la fig. 2b) montre qu'en régime non-linéaire les PDFs associées aux parties réelle et imaginaire du signal s'écartent d'une loi gaussienne au niveau des pieds de la distribution. En régime linéaire, ces PDFs suivent parfaitement une distribution gaussienne comme le montre la fig. 2a). L'écart à une distribution gaussienne s'évalue en calculant les moments d'ordre supérieur de la PDF, tel que le coefficient de dissymétrie et l'excès de kurtosis, c'est-à-dire, respectivement, le moment d'ordre trois de la distribution centrée réduite et l'écart entre le moment d'ordre quatre de la distribution centrée réduite à celle d'une gaussienne [5]. La fig. 3b) présente l'évolution de ces deux coefficients en fonction de la puissance incidente et pour l'ensemble des distances testées. Comme nous l'anticipions, leurs valeurs restent quasiment nulles en régime linéaire mais augmentent pour des puissances supérieures à 1dBm, valeur qui est à rapprocher du NLT.

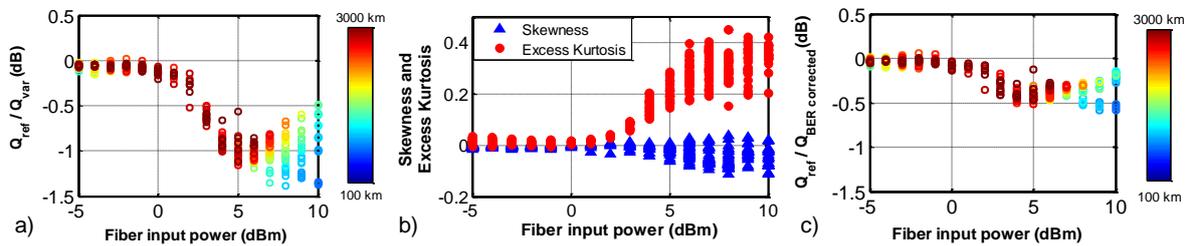


Fig. 3 : a) Différence en facteur Q calculé à partir du comptage des erreurs, Q_{ref} , et à partir de la variance du modèle GN, Q_{var} . b) Coefficient de dissymétrie (triangle bleu) et kurtosis normalisé (point rouge). c) Différence en facteur Q calculé à partir du comptage des erreurs, Q_{ref} , et à partir du BER corrigé, $Q_{BER\ corrected}$.

En vue d'établir un estimateur du BER étendu au régime non-linéaire, la formule du BER est corrigée en ajoutant les ordres supérieurs de la distribution comme correction, au moyen des séries de Edgeworth [7]. Nos calculs montrent une faible influence du coefficient de dissymétrie, et nous permettent d'établir une expression pour la correction du BER qui ne tient compte que du SNR et du kurtosis normalisé, γ :

$$BER_{corrigé} = \frac{\gamma(SNR-3)\sqrt{SNR}}{24\sqrt{2\pi}} e^{-SNR/2} + BER_{AWGN} \quad (3)$$

Comme le montre la fig. 3c), ce nouvel estimateur du BER diminue l'erreur d'estimation avec la valeur réelle, qui reste inférieure à 0,5dB pour toutes les puissances et toutes les distances.

CONCLUSION

Nous avons étudié les performances d'un système de transmission PDM-QPSK sans gestion de dispersion en ligne sur une large plage de fonctionnement en puissance et en distance. Pour une puissance supérieure au seuil non-linéaire, une surestimation de 1.5dB du facteur de qualité estimé à partir des variances du bruit supposé gaussien est démontrée par rapport à la valeur réelle. Nous avons apporté une correction sur l'estimation du BER basé sur les ordres supérieurs de la distribution du bruit du signal reçu permettant d'atteindre une précision de 0,5dB sur le facteur Q.

Ce travail a été partiellement financé par le projet CELTIC + SASER-SAVENET.

REFERENCES

- [1] L. Beygi et al, IEEE Transactions on Communications, Vol. 60, no. 11, p. 3440, (2012).
- [2] F. Vacondio et al., Opt. Express, Vol. 20, no. 2, p. 1022 (2012).
- [3] G. Bosco et al., Photon. Technol. Lett., Vol. 24, no. 14, p. 1041 (2012).
- [4] O. Bertran-Pardo et al., J.L.T., Vol. 30, no. 14, p. 2367 (2012).
- [5] A. Papoulis, "Probability, Random Variables and Stochastic Processes," McGraw-Hill, (1965).
- [6] R. Dar et al., Opt. Express, Vol. 21, no. 22, p. 25685 (2013).
- [7] D. L. Wallace, Ann. Math. Statist., Vol. 29, no. 3, p. 635-654 (1958).