

Sujet de thèse

Conception d'algorithmes temps réel pour transpondeurs optiques élastiques à très haut débit

Laboratoire d'accueil: IRISA - Equipe GRANIT (Lannion)

Encadrement universitaire :Pascal Scalart (IRISA/GRANIT)

Contact : pascal.scalart@irisa.fr, tel : 02.96.46.90.74

Motivation

Cette thèse s'inscrit dans l'objectif de mise au point et d'amélioration d'algorithmes de traitement du signal pour les transpondeurs optiques flexibles cohérents à très haut débits de l'ordre de 200/400 Gbit/s. Afin d'atteindre ces objectifs, il semble nécessaire d'orienter les activités de recherche vers les systèmes *flexibles* à *haute-efficacité spectrale*. En effet, le souhait de réduire les coûts de transport optiques en augmentant à la fois le débit de données par canal et l'efficacité spectrale a motivé l'utilisation de formats de modulations numériques d'ordre élevé de type QAM. Cependant, l'implémentation matérielle temps-réel de tels prototypes d'émission/réception se révèle être un challenge important car il s'avère nécessaire de développer des algorithmes complexes de traitement du signal à haut débit assurant un compromis satisfaisant entre performance, complexité et sensibilité. Le sujet de thèse décrit ci-après s'engage sur cette voie en s'orientant vers la prise en compte conjointe des problèmes d'implémentation dès l'étape de sélection/optimisation d'algorithmes de traitement du signal dans le cadre de récepteurs optiques cohérents à formats de modulation QAM d'ordre élevé.

Positionnement du travail

Le premier axe de travail investigué dans cette thèse concerne la tâche essentielle de récupération de porteuse inhérente à tout récepteur cohérent, et pour lequel il est primordial d'être en mesure de corriger les variations de phase (CPE pour Carrier Phase Estimation) et les rotations de phase introduites par le décalage de fréquence (CFO pour Carrier Frequency Offset) entre les lasers utilisés à l'émission et à la réception. Pour des implémentations réelles à quelques 100 Gbit/s ou au-delà, il est important de paralléliser au maximum le traitement du signal ce qui conduit à privilégier des techniques de type FFCR (Blind FeedForward Carrier Recovery) qui ne nécessitent pas de boucle retour de transmission. Par ailleurs, nos travaux antérieurs sur cet axe [1-2] dans le cadre de communications optiques (thèse de Trung-Hien Nguyen) utilisant la technique d'expansion en harmoniques circulaires (CHE pour circular harmonic expansion) conjointement avec des formats multi-niveaux à 16/32/64/128 QAM utilisant un encodage différentiel constitueront le point de départ de ces travaux. En effet nous souhaitons les étendre suivant plusieurs orientations : (a) optimiser les opérations de traitement du signal (FFT, calcul de périodogramme) effectuées au sein des techniques CHE afin d'en démontrer la pertinence d'un point de vue implémentation, (b) évaluer le gain potentiel apporté par l'insertion de techniques de filtrage de Wiener au sein de ces boucles de récupération de porteuse (type CHE), et (c) investiguer des solutions alternatives à la technique CHE mais offrant un avantage en flexibilité à travers l'utilisation de boucles de récupération de phase 'souples' indépendantes du format de modulation.

Le deuxième axe de travail envisagé concerne l'amélioration de *l'efficacité spectrale* des communications optiques cohérentes à très haut débit. Sur ce point, l'étude portera sur de nouveaux formats de modulation émergents permettant de passer progressivement de débits de 100/200/400 Gbit/s à l'aide de formats intermédiaires adaptés spécifiquement aux différentes portées. Ceci peut se réaliser en modifiant, de manière adaptative, la taille (et la forme d'onde) de l'alphabet des symboles modulés transmis par l'émetteur (la constellation dans le cas de communications optiques) ou en utilisant une loi non-uniforme de

la probabilité d'émission des symboles modulés lorsque l'on raisonne à constellation figée. Cette technique, plus connue sous le vocable de *probabilistic shaping* [3], semble très pertinente dans le cadre de communications optiques flexibles utilisant des constellation circulaires ou rectangulaires de type QAM puisqu'elle permet de contrôler l'occurrence des symboles externes de la constellation QAM (associés aux symboles à forte puissance) de manière à réduire les phénomènes non-linéaires lors du transport sur fibre optique et ainsi augmenter au récepteur le rapport signal à bruit (SNR) pour tous les autres symboles de la constellation. Cette technique peut être mise en œuvre en utilisant des codes correcteurs d'erreurs modifiés de type FEC [4] ou en utilisant une technique directe de mise en forme de la constellation QAM [5]. D'un point de vue implémentation, cette dernière solution présente l'intérêt de ne nécessiter qu'une seule unité de traitement afin d'égaliser le canal de propagation et ceci quel que soit le point de fonctionnement sélectionné pour l'efficacité spectrale.

Contexte local

Ce travail de thèse se veut être l'élément central d'une coopération tripartite réunissant l'équipe IRISA/GRANIT pour les aspects algorithmiques et matériels, le laboratoire FOTON pour son expertise sur les systèmes de transmissions optiques à haut débit. Ces 2 partenaires précités sont d'ores et déjà associés au sein du projet européen Celtic+ Sendate (qui associe également Orange Labs et Vectrawave). Ce travail de thèse serait également un élément structurant permettant de lancer une action transversale au sein du nouveau plateau technique FICOP (FOTON IRISA Common Optical Platform) issu du CPER Photonique.

[1] T-H. Nguyen, M. Joindot, P. Scalart, M. Gay, L. Bramerie, O. Sentieys, and J. -C. Simon, 'Carrier frequency offset estimation based on circular harmonic expansion for optical coherent M -QAM communication systems,' in Proc. of the IEEE Opto Electronics and Communications Conference (OECC2015), Shanghai, China, Jul. 2015.

[2] T -H. Nguyen, M. Joindot, P. Scalart, M. Gay, L. Bramerie, O. Sentieys, and J. -C. Simon, 'Carrier phase recovery for optical coherent M -QAM communication systems using harmonic decomposition-based maximum loglikelihood estimators,' in Proc. of the Signal Processing in Photonics Communications (SPPcom2015), MA, USA, Jul. 2015.

[3] B.P. Smith and F. R. Kschischang, 'A pragmatic coded modulation scheme for high-spectral-efficiency fiber-optic communications', *Journal Lightwave Technology*, 30(13), pp. 2047–2053, Jul. 2012.

[4] M.P. Yankov et al., 'Constellation shaping for fiber-optic channels with QAM and high spectral efficiency.' *Photonics Technology Letters, IEEE* 26.23 (2014): 2407-2410.

[5] L. Beygi, E. Agrell, J. M. Kahn, and M. Karlsson, 'Coded modulation for fiber-optic networks', *IEEE Signal Processing Mag.*, vol. 31, no. 2, pp. 93–103, Mar. 2014.

[6] T. Fehenberger, A. Alvarado, G. Bocherer, N. Hanik 'On Probabilistic Shaping of Quadrature Amplitude Modulation for the Nonlinear Fiber Channel', *Journal of Lightwave Technology*, vol. 34, issue 21, pp. 5063-5073, Nov. 2016.