

Oscillateur optoélectronique (OEO) générant des peignes de fréquences et des trains d'impulsions optiques

Brian Sinquin, Goulc'hen Loas, Steve Bouhier, Ludovic Frein, Marc Vallet, Mehdi Alouini, Marco Romanelli
 Univ. Rennes, CNRS, Institut FOTON UMR 6082, 35000 Rennes, France

Depuis une vingtaine d'années, les peignes de fréquences suscitent un fort intérêt tant du point de vue fondamental que pour de nombreuses applications, comme la spectroscopie résolue en temps/fréquence, les télécommunications optiques, le LIDAR, la génération de signaux d'horloge, etc [1]. Récemment, nous avons démontré la possibilité d'utiliser la modulation directe d'un laser semiconducteur DFB comme source radiofréquence (RF) dans un oscillateur optoélectronique (OEO) [2]. L'objet de la présente communication est de présenter la génération de peignes de fréquences et de trains d'impulsions courtes au moyen de notre dispositif. Notre approche est différente de celle récemment exposée dans [3]. Dans notre cas, nous tirons parti de l'auto-modulation de phase du signal optique dans la ligne à retard fibrée [4], pour obtenir un fort élargissement spectral conduisant à un affinement temporel des impulsions en régime de dispersion anormal.

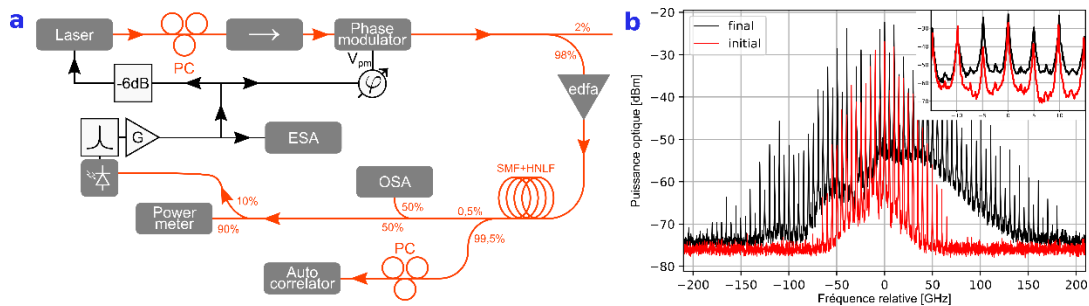


Fig. 1. a) Schéma d'OEO à modulation directe à effet Kerr. b) Peigne de fréquence généré. En rouge : spectre optique avant l'amplificateur optique (EDFA). En noir : spectre optique après propagation dans les fibres.

Le montage est schématisé sur la Fig. 1.(a). Le laser produit une onde optique à 1550 nm, qui est modulée en phase, puis amplifiée. Cette dernière se propage dans 5 km de fibre optique standard (SMF) puis dans 100 m de fibre hautement non-linéaire (HNLF) ; une partie de l'onde est ensuite prélevée pour être analysée par différents instruments de mesures (OSA, auto-corrélateur, puissance-mètre), le restant étant détecté au moyen d'une photodiode rapide. Le signal électrique généré est amplifié, filtré autour de 10 GHz avant d'être appliqué parallèlement sur le port de modulation du laser DFB et l'entrée du modulateur de phase. Un déphasage peut être ajusté entre ces deux voies.

Nous observons un peigne de fréquences (Fig. 1.(b)) dont le taux de répétition est de 5 GHz et dont la largeur à -30 dB est de 240 GHz. Notons que ce taux de répétition correspond à une sous-harmonique de la fréquence de modulation OEO. L'apparition de sous-harmoniques est dû au caractère non-linéaire de la dynamique du laser et a déjà été modélisée et observée expérimentalement dans le cas de fortes modulations directes de lasers à semi-conducteur [5]. En ajustant la phase du signal d'entrée du modulateur de phase optique, nous observons des impulsions à la sortie de la ligne à retard, de durée 4 ps (FWHM). Nous avons également observé, pour d'autres paramètres, un taux de répétition de 2,5 GHz, dû à deux doublements de période en cascade. Il est à remarquer que, même dans le régime impulsionnel, l'oscillation à 10 GHz de l'OEO reste très stable. Nous avons en effet mesuré un bruit de phase de -123 dBc/Hz à 10 kHz de la porteuse, et un plancher de bruit à -125 dBc/Hz, ce qui prouve la bonne cohérence de phase entre toutes les dents du peigne de fréquence.

Afin de vérifier que la dynamique intrinsèque du laser est bien à l'origine du taux de répétition inattendu des peignes, nous avons modulé directement la source optique à l'aide d'un synthétiseur de fréquence à $f_0 = 10$ GHz, et avons mesuré le spectre RF de l'intensité optique de sortie (Fig. 2).

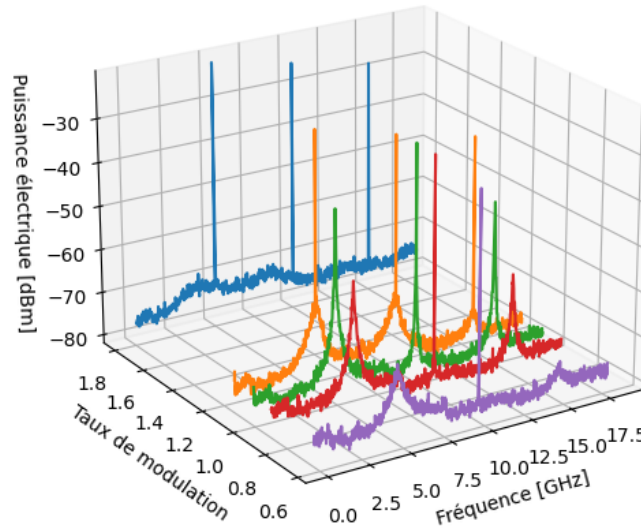


Fig. 2. Spectres de puissances électriques de l'intensité émise par le laser pour différents taux de modulation.

En augmentant le taux de modulation, on observe l'apparition de bandes latérales étroites et intenses situées à $f_0/2$ de part et d'autre de la porteuse RF, i.e. à 5 GHz et 15 GHz. Cet effet ne se produit que si la fréquence des oscillations de relaxation du laser est proche de $f_0/2$: ici pour un courant d'injection fixé à 27 mA, soit 2 fois le courant de seuil, et pour un taux de modulation allant de 0,6 à 2. Cet effet de doublement de période peut s'accompagner, dans certains cas, d'un régime impulsionnel [5]. La génération d'impulsions directement en sortie du laser est potentiellement intéressante, car elle permet à l'effet Kerr d'affiner des impulsions préexistantes dans de la fibre à retard et donc de s'affranchir du modulateur de phase. Enfin, le doublement de période a pour effet de densifier le peigne d'un facteur 2, et présente donc un intérêt pour des applications de spectroscopie ou de multiplexage en longueur d'onde (WDM).

- [1] S. A. Diddams, K. Vahala, and T. Udem, "Optical frequency combs: Coherently uniting the electromagnetic spectrum" *Science* **369**, p. eaay3676 (2020).
- [2] B. Sinquin, M. Romanelli, S. Bouhier, L. Frein, M. Vallet, and M. Alouini, "Low Phase Noise Direct-Modulation Optoelectronic Oscillator" *J. Light. Technol.*, **39**, pp. 7788-7793 (2021). doi: 10.1109/JLT.2021.3111703.
- [3] C. D. Munoz, M. Varon, F. Destic, and A. Rissons, "Self-starting VCSEL-based optical frequency comb generator" *Optics Express* **28**, pp. 34860-34874 (2020).
- [4] Y. K. Chembo, A. Hmima, P. A. Lacourt, L. Larger, and J. M. Dudley, "Generation of Ultralow Jitter Optical Pulses Using Optoelectronic Oscillators With Time-Lens Soliton-Assisted Compression" *J. Light. Technol.* **27**, pp. 5160–5167 (2009). doi: 10.1109/JLT.2009.2028033.
- [5] L. Chusseau, E. Hemery, and J.-M. Lourtioz, "Period doubling in directly modulated InGaAsP semiconductor lasers" *Appl. Phys. Lett.* **55**, pp. 822–824 (1989).