

SUR LA GENERATION DE MICRO-ONDES ULTRA-PURES ET DE PULSES OPTIQUES A GIGUE ULTRA-FAIBLE EN UTILISANT LES OSCILLATEURS OPTOELECTRONIQUES

Yanne K. Chembo, Kirill Volyanskiy, Abdelhamid Hmima, Hervé Tavernier, Patrice Salzenstein, Pierre-Ambroise Lacourt, Enrico Rubiola, John M. Dudley, et Laurent Larger

Institut FEMTO-ST, Université de Franche-Comté, CNRS UMR 6174, 25030 Besançon, France

Yanne.chembo@femto-st.fr

RÉSUMÉ

L'oscillateur optoélectronique est un système qui permet d'obtenir des micro-ondes ultra-pures ou des pulses optiques de quelques picosecondes dont la gigue temporelle est exceptionnellement faible. Dans cette communication, nous allons présenter les principaux résultats théoriques et expérimentaux qui ont été obtenus depuis 3 ans avec cette technologie à l'Institut FEMTO-ST, en les comparant avec l'état de l'art mondial.

MOTS-CLEFS : *oscillateur optoélectronique ; micro-ondes ultra-pures ; pulses optiques ; résonateurs optiques.*

1. INTRODUCTION

L'oscillateur optoélectronique (O²E) a été inventé en 1994 par Yao et Maleki, deux chercheurs du *NASA Jet Propulsion Laboratory* [1]. L'objectif premier de cet oscillateur était la génération de micro-onde dont le bruit de phase pouvait être exceptionnellement faible (la valeur record à ce jour est de -163 dBc/Hz à 10 kHz d'une porteuse à 10 GHz). Ce système avait initialement pour principale ambition de remplacer les générateurs de micro-ondes dans les radars de prochaine génération. Progressivement, d'autres applications se précisèrent, notamment dans les technologies de navigation aérospatiale et des systèmes embarqués, en temps-fréquence et en télécommunications. Nous présenterons dans cette communication comment ce système peut être analysé théoriquement en utilisant des approches de dynamique non-linéaire et/ou stochastique, et comment cette architecture versatile peut être modifiée pour une vaste gamme d'applications.

2. GENERATION DE MICRO-ONDES ULTRA-PURES

La pureté des micro-ondes générées avec l'O²E est due au fait que dans la boucle d'oscillation, une ligne à retard fibrée est généralement intercalée (Fig. 1). Elle permet un temps de stockage optique considérable (20 μ s pour 4 km de fibre), qui est équivalent à un facteur de qualité $Q=2\pi FT$, où F est la fréquence de la micro-onde et T est le délai induit par la ligne à retard.

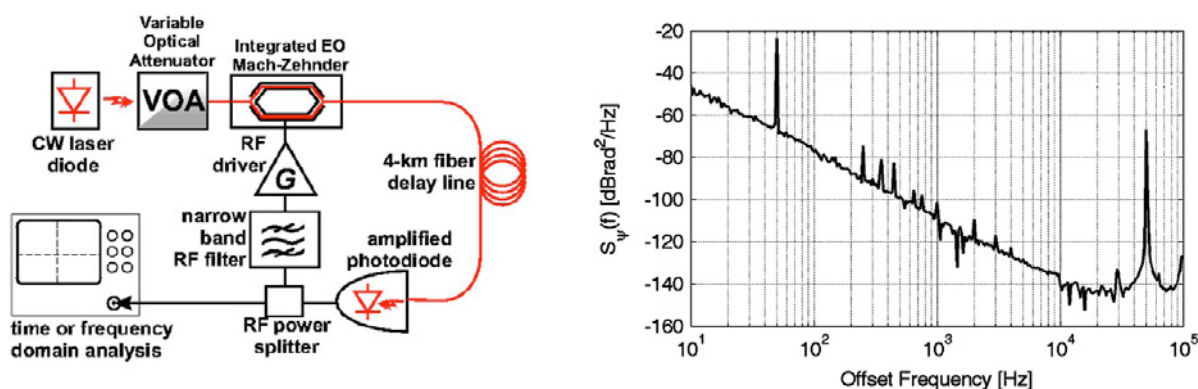


Fig. 1 : A gauche : architecture typique d'un O²E. A droite : bruit de phase typique d'un O²E de FEMTO-ST, avec un plancher bruit de phase à -145 dBrad²/Hz à 10 kHz d'une porteuse à 10 GHz [2,3].

Pour étudier le comportement déterministe de ce système, nous avons développé une approche non-linéaire originale basée sur les équations d'enveloppe complexes à retard. En particulier, nous avons théoriquement mis en évidence l'existence de bifurcation de type Neimark-Sacker qui limite en puissance de sortie la performance de ce système [2,4]. Nous avons aussi démontré la possibilité d'un comportement multi-mode selon le protocole de mise en route de l'oscillateur [5]. Ces résultats ont établi pour la première fois les bases théoriques de la stabilité spectrale de l'O²E, et ils ont été confirmés expérimentalement avec une remarquable précision.

Nous avons ensuite intégré des termes de bruit dans nos équations afin de déterminer les performances de bruit de phase de l'O²E. Ces équations, souvent appelées *équations de Langevin*, ont été analysées grâce à la théorie des équations différentielles stochastiques à retard, qui est très neuve et encore très largement incomplète. Nous avons réussi à déterminer très précisément les principales caractéristiques du spectre de bruit de phase des O²Es, à savoir le plancher de bruit de phase, la hauteur des pics parasites de cavité, ainsi que leur largeur de raie. Ici encore, la comparaison avec l'expérience s'est révélée concluante.

3. GENERATION DE PULSES OPTIQUES A GIGUE TEMPORELLE ULTRA-FAIBLE

Nous avons développé une architecture originale permettant de générer des pulses optiques dont la gigue temporelle est exceptionnellement faible. L'idée ici était d'utiliser le fait que le bruit de phase extrêmement réduit des micro-ondes obtenues avec l'O²E induirait automatiquement une gigue temporelle faible en boucle fermée. Les pulses sont obtenus avec un effet de lentille temporelle assistée par compression soliton. La modulation sinusoïdale à l'entrée RF sert à générer des « pré-pulses » optiques sinusoïdaux et chirpés, qui sont ensuite fortement amplifiés avant de parcourir la ligne à retard. Durant leur propagation, les effets combinés de la non-linéarité et de la dispersion peuvent (sous des conditions optimales) induire une forte compression tel que représenté à la Fig. 2. Grâce à cette méthode, nous avons obtenu des trains de pulses synchrones avec la micro-onde générée, et dotée d'une gigue temporelle particulièrement faible. Les résultats expérimentaux ont été concordants avec la modélisation, basée sur l'équation de Schrödinger non-linéaire [6].

4. UTILISATION DE RESONATEURS OPTIQUES A MODES DE GALERIES ET A FACTEUR DE QUALITE ULTRA-ELEVE

Il est particulièrement intéressant de pouvoir développer un O²E compact qui soit compatible avec les spécifications de volume restreintes des systèmes embarqués. Dans cette optique, une possibilité est de remplacer la ligne à retard fibrée par des résonateurs optiques à très haut facteur de qualité allant typiquement de 10^7 à 10^{10} selon les techniques de fabrication et le matériau utilisé (silice fondue, quartz, MgF₂, CaF₂, etc.).

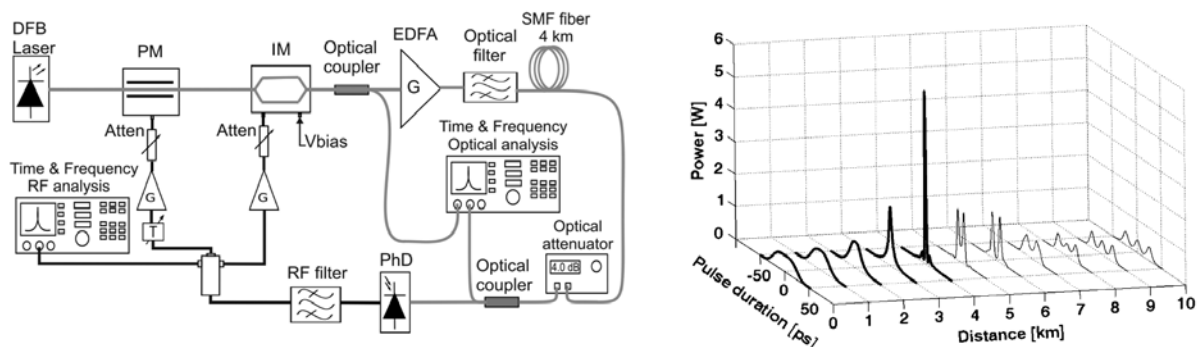


Fig. 2 : A gauche : architecture typique d'un O²E générant des pulses optiques à gigue ultra-faible. Noter le modulateur de phase en cascade avec le modulateur d'intensité. A droite : simulation numérique du processus de compression des pulses, avec une compression optimale à 4 km. Les pulses ont été expérimentalement compressés à 4.1 ps, avec une gigue temporelle égale à 2.7 fs dans la bande 1-10 kHz [6].

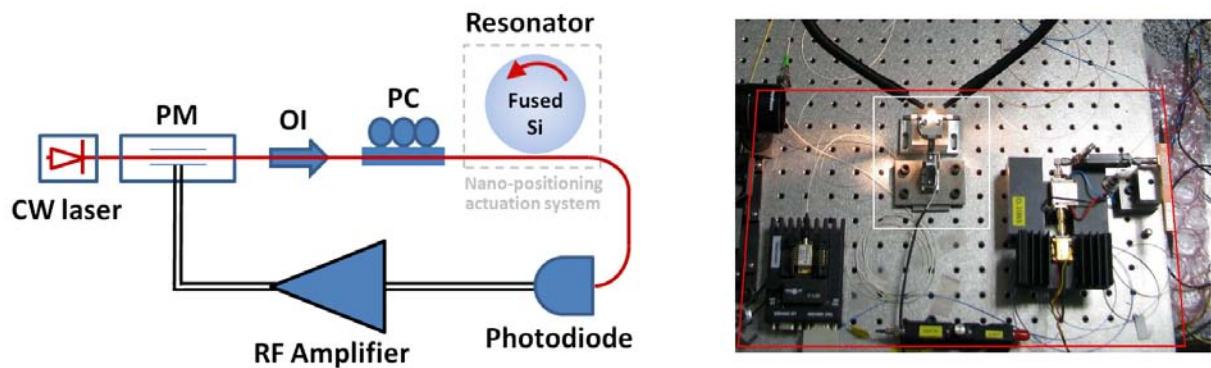


Fig. 3 : A gauche : architecture typique d'un O²E où un résonateur optique remplace la ligne à retard. Noter l'absence de modulateur d'intensité. A droite : Montage expérimental. Le carré clair représente le rectangle discontinu de la figure de gauche, tandis que le carré sombre représente le format A₃ (297×420 mm²). Ce système nous a permis d'obtenir un bruit de phase de -90 dBrad²/Hz à 10 kHz d'une porteuse à 10 GHz.

Nous avons développé ce type d'architecture d'O²E en utilisant un résonateur de silice fondue dont le facteur de qualité est égal à 10⁸ (Fig. 3). Pour générer des micro-ondes dans la bande X (8-12 GHz), il faut en général des résonateurs dont le diamètre est de l'ordre de 5 mm, avec une rugosité extrêmement faible, de l'ordre du nm. La performance en bruit de phase de cet O²E est certes plus faible que celle de l'oscillateur fibré, mais la marge d'amélioration est grande et nous anticipons qu'une réduction d'au moins 50 dB est possible si le couplage avec le résonateur pouvait être parfaitement optimisé, et l'environnement thermique/mécanique mieux contrôlé.

CONCLUSION

L'oscillateur optoélectronique est un système particulièrement intéressant, autant du point de vue de la physique fondamentale (systèmes complexes à retard) que de celui des applications. Nous avons pu explorer plusieurs aspects de ses performances et nos résultats permettent de mieux comprendre ce système qui sera probablement amené à jouer un rôle central pour la génération de micro-ondes ultra-pures dans les systèmes de navigation de prochaine génération. Plusieurs champs de recherche restent ouverts, notamment par rapport aux nouvelles architectures, et par rapport à l'optimisation des architectures déjà existantes. Notre objectif sera de contribuer à ces recherches en utilisant entre autre une approche inhabituelle qui a été fructueuse jusqu'à présent, celle des systèmes dynamiques non-linéaires et stochastiques.

REFERENCES

- [1] X. S. Yao and L. Maleki "High frequency optical subcarrier generator," *Electron. Lett.*, vol. 30, no. 18, p. 1525, 1994.
- [2] Y. K. Chembo, L. Larger, H. Tavernier, R. Bendoula, E. Rubiola, and P. Colet, "Dynamic instabilities of microwaves generated with optoelectronic oscillators," *Opt. Lett.*, vol. 32, no. 17, p. 2571, 2007.
- [3] Y. K. Chembo, K. Volyanskiy, L. Larger, E. Rubiola and P. Colet, "Determination of phase noise spectra in optoelectronic microwave oscillators: a Langevin approach," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 45, no. 2, p. 178, 2009.
- [4] Y. K. Chembo, L. Larger, and P. Colet, "Nonlinear dynamics and spectral stability of optoelectronic microwave oscillators," *IEEE J. Quantum Electron.*, vol. 44, no. 9, p. 858, 2008.
- [5] Y. K. Chembo, L. Larger, R. Bendoula and P. Colet, "Effects of gain and bandwidth on the multimode behavior of optoelectronic microwave oscillators," *Optics Express*, vol. 16, no. 12, p. 9067, 2008.
- [6] Y. K. Chembo, A. Hmima, P.-A. Lacourt, L. Larger, and J. M. Dudley, "Generation of ultra-low jitter optical pulses using optoelectronic oscillators with time-lens soliton-assisted compression," *IEEE J. Light Technol.*, vol. 27, no. 22, p. 5160, 2009.