

Etude théorique et expérimentale pour l'amélioration du bruit de phase des oscillateurs optoélectroniques basés sur des résonateurs optiques fibrés et évaluation de la stabilité thermique

Khaldoun Saleh^{1,2,3}, Aude Bouchier^{1,2}, Pierre-Henri Merrer^{1,2}, Olivier Llopis^{1,2}, Gilles Cibiel³

¹CNRS ; LAAS ; 7 avenue du colonel Roche, F-31077 Toulouse, France

²Université de Toulouse ; UPS, INSA, INP, ISAE ; LAAS ; F-31077 Toulouse, France

³CNES, 18 avenue Edouard Belin, 31410 Toulouse Cedex 4

ksaleh@laas.fr

Résumé

Dans le domaine des microondes, l'optique représente une solution élégante pour la montée en facteur de qualité dans les systèmes de génération de fréquence. Différents types de résonateurs optiques nous permettent d'atteindre des facteurs de qualité au delà de 10^9 et sont utilisés comme une alternative aux lignes à retard optiques utilisées dans les oscillateurs optoélectroniques (OEO) classiques. Les propriétés en termes de coefficient de qualité de boucles résonantes fibrées sont présentées et une application de l'utilisation de ces résonances pour la stabilisation d'oscillateurs microonde est détaillée. Les travaux concernent à la fois une étude théorique et une étude expérimentale du dispositif, avec comme paramètre principal l'étude de la stabilité de fréquence de l'oscillateur et de la contribution du bruit blanc de fréquence sur le bruit de phase de l'oscillateur. Une étude théorique et expérimentale sur la stabilité thermique de l'oscillateur est aussi présentée.

1. Introduction

Actuellement, les meilleurs oscillateurs dans le domaine des microondes sont basés sur des résonateurs diélectriques présentant de forts facteurs de qualité (ex : 10^5 à 10 GHz pour les résonateurs saphir à modes de galerie). Ces dispositifs ont cependant atteint leurs limites intrinsèques et deviennent moins performants lorsqu'on monte en fréquence (gamme millimétrique). Une méthode alternative pour améliorer la performance des résonateurs et des oscillateurs consiste à transposer l'onde hyperfréquence au voisinage d'une porteuse optique, ce qui permet de bénéficier des forts facteurs de qualité que présentent les résonateurs optiques actuels ($Q_{opt} > 10^9$), tels que les résonateurs de type disque ou sphère à modes de galerie [1,2] et les résonateurs à boucles résonantes fibrées. Ces résonateurs sont utilisés dans le domaine de l'opto-microonde comme une alternative à l'approche utilisant une ligne à retard optique, plus facile à mettre en œuvre mais qui reste peu compacte [3].

Le travail présenté dans cette communication est focalisé sur les oscillateurs optoélectroniques (OEO) basés sur des résonateurs optiques fibrés à fort Q. Les travaux concernent d'une part l'optimisation des paramètres du résonateur optique et d'autre part le test et la modélisation d'un système complet, utilisant une topologie particulière : la stabilisation de Pound Drever Hall (PDH) [4].

2. Résonateur optique à boucle fibrée et oscillateur optoélectronique

2.a. Résonateur optique à boucle fibrée

Ce résonateur est constitué d'un anneau fibré de quelques mètres couplé à deux fibres optiques d'accès via deux coupleurs optiques 2x2 (fig.1). Il génère un peigne de résonances optiques séparées par un intervalle spectral libre (ISL) dépendant de la longueur de la boucle. Le coefficient de qualité d'un tel résonateur atteint $Q_{opt} \sim 5 \cdot 10^9$ pour une boucle résonante de 20 mètres.

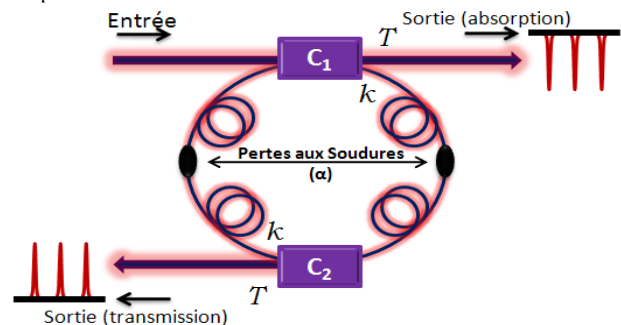


Figure 1. Résonateur optique à boucle fibrée

Il faut noter qu'au facteur de qualité optique Q_{opt} correspond un facteur de qualité hyperfréquence Q_{RF} lorsqu'on utilise deux modes du peigne de résonances distants de la fréquence microonde à filtrer (ou à stabiliser). Le coefficient de qualité hyperfréquence équivalent est égal au coefficient de qualité optique divisé par le rapport de fréquence entre l'onde optique f_{opt} et l'onde hyperfréquence f_{RF} (environ 10^4 , pour un signal hyperfréquence à 20 GHz) (1).

$$Q_{RF} = Q_{opt} \frac{f_{RF}}{f_{opt}} \quad (1)$$

Ainsi, et contrairement aux résonateurs microondes, leurs facteurs de qualité augmentent avec la fréquence RF. Plusieurs résonateurs ont été réalisés, avec des fibres de nature et de longueurs différentes, et avec chaque fois l'objectif de dépasser un coefficient de 10^9 en optique tout en minimisant les problèmes de bruit liés à la fibre.

2.b. Oscillateur optoélectronique OEO :

Le principe de notre oscillateur OEO est présenté sur la figure 2 et est détaillé dans la référence [5]. Le laser est un laser à faible largeur de raie stabilisé sur le résonateur par une boucle de contre réaction basse fréquence de type PDH. L'oscillation microonde est ensuite déclenchée par un deuxième boucle haute fréquence incluant un filtre, un amplificateur et un déphaseur.

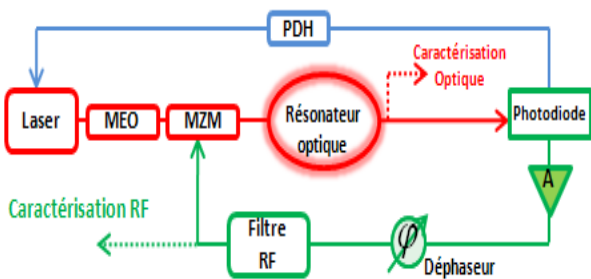


Figure 2. Oscillateur optoélectronique

3. Optimisation du résonateur et du bruit de phase de l'OEO

3.a. Etude théorique

La première réalisation présentée pour cet oscillateur était basée sur une boucle fibrée de 10 m, de coefficient de qualité quelque peu dégradé par la qualité des coupleurs optiques utilisés. Le bruit de phase de cet oscillateur est représenté en rouge sur la figure 4. Ce spectre est constitué d'une composante en $1/f$ et d'une composante de bruit blanc de fréquence. L'origine de la composante de bruit en $1/f$ étant mal identifiée, pour optimiser le bruit de phase de cet OEO, nous nous sommes concentrés pour une nouvelle réalisation sur une minimisation de la composante de bruit additif, par une étude de sa dépendance vis-à-vis des coefficients de couplage du résonateur [5].

Le résonateur a d'abord été modélisé en termes de champs électriques [6], pour pouvoir prédire son ISL et son facteur de qualité Q . Une fois le modèle est validé, nous avons modélisé la partie bruit blanc de fréquence du spectre de bruit de phase de l'OEO en s'inspirant d'un modèle simplifié du bruit dans les oscillateurs [7]. Le bruit blanc de fréquence de l'oscillateur est directement lié au rapport bruit sur signal (NCR) de la porteuse optique et dépend du facteur de qualité optique Q_{opt} du résonateur, de la fréquence optique f_{opt} et de la fréquence d'offset f_m par rapport à la porteuse comme nous montre la relation de Leeson suivante :

$$L(f_m) = 20 \cdot \log \left(\frac{f_{opt}}{2 \cdot \sqrt{2} \cdot Q_{opt} \cdot f_m} \right) + 10 \cdot \log (NCR) \quad (2)$$

avec $L(f_m)$ est le bruit de phase simple bande de l'OEO permettant de déduire la contribution du bruit blanc de fréquence au bruit de phase de l'OEO.

Le facteur de qualité du résonateur est lié à la longueur des fibres de l'anneau, aux caractéristiques des coupleurs (rapport de couplage, pertes en excès...) ainsi qu'aux pertes intrinsèques de l'anneau fibré. Si le rapport de couplage optique diminue, ainsi que les pertes dans les coupleurs et les pertes dans l'anneau, le facteur de qualité Q_{opt} va augmenter. Par contre, cette diminution du couplage va entraîner une dégradation du NCR . Un compromis a été trouvé grâce à notre étude théorique (valable seulement sur la partie bruit blanc de fréquence de l'OEO), pour obtenir simultanément un bon facteur de qualité et un bon NCR , en faisant plusieurs simulations sur les différents paramètres (rapport de couplage, pertes dans les coupleurs et dans l'anneau fibré...).

3.b. Résultat expérimental

Grâce à cette étude théorique, une nouvelle boucle de 20 mètres a été conçue. Le nouveau résonateur présente des performances remarquables en coefficient de qualité ($5 \cdot 10^9$), figure 3, et a permis également l'obtention d'un bruit de phase bien meilleur, où la composante de bruit additif n'est plus visible (courbe bleue sur la figure 4).

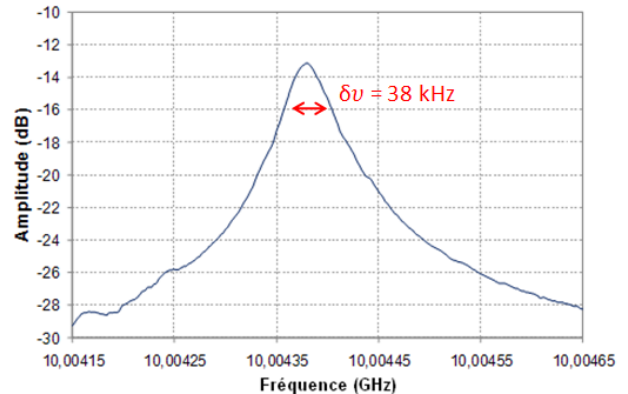


Figure 3. Largeur de la résonance de la nouvelle boucle de 20 mètres

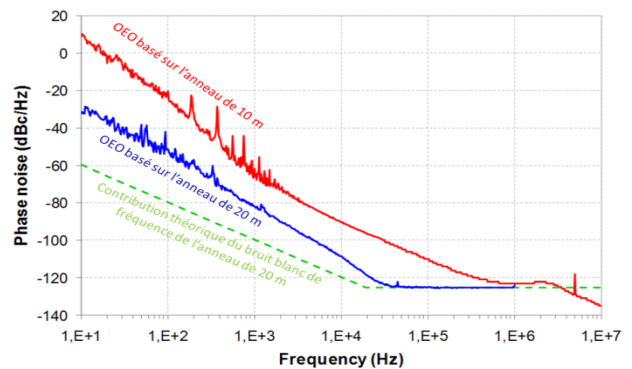


Figure 4. Bruit de phase de l'OEO, avant et après optimisation de l'anneau fibré

Il reste néanmoins une composante de bruit en $1/f$ encore trop importante, que nous tentons aujourd'hui de modéliser par une approche de description du système complet sous le logiciel ADS, incluant le bruit en $1/f$

(AM et FM) du laser et des autres composants actifs (amplificateurs, photodiode...). Le plancher de bruit de phase de cet OEO est limité à -125 dBc/Hz car une puissance optique excessive augmente la composante en 1/f. Ce problème sera également pris en compte dans nos prochaines réalisations.

D'autre part, le laser utilisé pour cet OEO est en cours de remplacement par un composant intégré, ce qui devrait encore modifier les performances en bruit de phase du système et constitue une étape importante vers un système compact.

4. Stabilité thermique des résonateurs optiques à boucle fibrée et des OEO

4.a. Etude théorique

Un des points critiques, pour l'utilisation dans un système, de ces dispositifs est leur stabilité thermique. Celle-ci peut être estimée théoriquement, à partir des propriétés connues de la fibre optique, et expérimentalement, en chauffant un résonateur [8].

Lorsque l'anneau fibré subit une variation thermique ΔT , l'indice de réfraction n et la longueur de la fibre L sont modifiés, ce qui entraîne un décalage de la fréquence de résonance $\Delta\vartheta_k$ et une variation de l'ISL qui est donnée par :

$$ISL = \frac{c}{nL} \quad (3)$$

avec c est la célérité de la lumière dans le vide.

Dans un anneau fibré, la fréquence de résonance ϑ_0 est un multiple k de l'ISL, (k entier), tel que :

$$\vartheta_0 = k ISL \quad (4)$$

Dans la fibre optique standard SMF 28, utilisée pour concevoir ce type de résonateur, la variation de l'indice de réfraction et la dilatation de la fibre avec la température sont données respectivement par, [9,10]:

$$\Delta n = 9.2 \cdot 10^{-6} * \Delta T \quad (5)$$

$$\Delta L = 0.5 \cdot 10^{-6} * L * \Delta T \text{ (m)} \quad (6)$$

où ΔT est la variation de la température en Kelvin.

Quand l'anneau fibré subira une variation thermique ΔT , l'indice de réfraction et la longueur de la fibre subiront un changement, ce qui entrainera un décalage de la fréquence de résonance ϑ_{0k} de $\Delta\vartheta_k$. Ce décalage fréquentiel sera donné en fonction de Δn et ΔL par :

$$\Delta\vartheta_k = -c k \frac{(L \Delta n + n \Delta L)}{(nL)^2} \text{ (Hz/K)} \quad (7)$$

L'ISL optique va changer lui aussi, suivant la relation qui suit :

$$\Delta ISL = -c \frac{(L \Delta n + n \Delta L)}{(nL)^2} \text{ (Hz/K)} \quad (8)$$

De (7) et (8) on peut déduire une relation entre le décalage de la fréquence de résonance $\Delta\vartheta_k$ et la variation de l'ISL, ΔISL , dans un anneau fibré subissant un changement thermique, tel que :

$$\Delta\vartheta_k = K \Delta ISL \quad (9)$$

La figure 5 donne une explication simplifiée de cette relation.

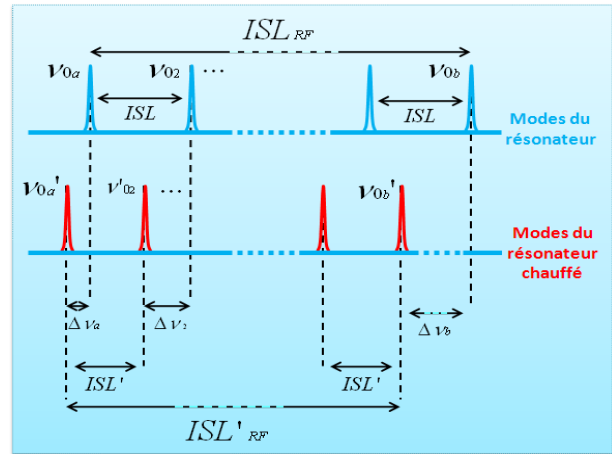


Figure 5. Relation entre le décalage de la résonance et la variation de l'ISL dans le résonateur

Dans le domaine optique, ΔISL sera très faible en fonction de ΔT . Par exemple, pour un résonateur de 20 mètres et avec un ΔT de 1K, on trouve un $\Delta ISL = 70 \text{ Hz/K}$. Par contre dans nos applications, on utilise le battement d'au moins deux raies optiques du résonateur, espacés de f_{RF} . D'où f_{RF} contiendra un nombre N d'ISL :

$$f_{RF} = N * ISL \quad (10)$$

Ainsi la variation globale de l'ISL mis en jeu, (ISL_{RF} , voir figure 5), sera N fois la variation d'un ISL.

Finalement, on obtient :

$$\frac{\Delta f_{RF}}{f_{RF}} = \frac{\Delta ISL}{ISL} \quad (11)$$

Et, la variation de la fréquence RF peut être estimée par :

$$\frac{\Delta f_{RF}}{f_{RF}} = -6.8 \text{ ppm/K} \quad (12)$$

Cette valeur théorique positionne ce type de résonateur ou d'oscillateur dans une gamme de stabilité comparable aux DRO commerciaux (environ 3 ppm/K).

4.b. Résultat expérimental

Le résonateur a été posé sur une plaque chauffante puis chauffé sur 95% de sa longueur totale pour pouvoir isoler les coupleurs optiques utilisés dans la boucle (voir figure 6).

Théoriquement, et pour un résonateur de 20 mètres chauffé sur 95% de sa longueur avec $\Delta T = 35 \text{ K}$ et $f_{RF} = 10.2 \text{ GHz}$, nous devons obtenir une variation de 2.4 MHz. Expérimentalement, le décalage mesuré de f_{RF} était de 2.5 MHz (figure 7).

Finalement, un résonateur de 1 mètre a été également testé pour valider le fait que la sensibilité thermique est la même dans ce type de résonateur, quelque soit la longueur de fibre utilisée, à condition d'avoir la même fréquence f_{RF} . Cette théorie a été expérimentalement validée.

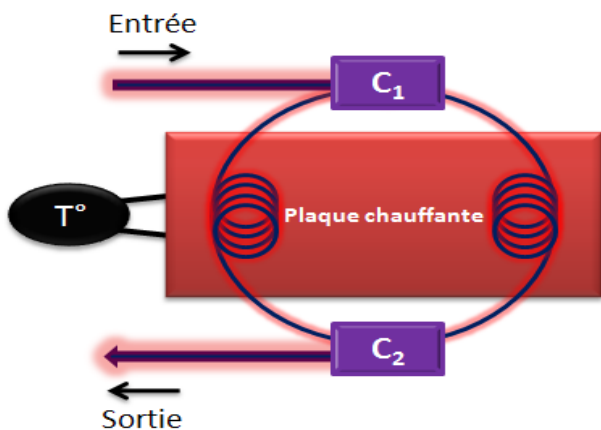


Figure 6. Banc de test de la stabilité thermique du résonateur (coupleurs optiques isolés)

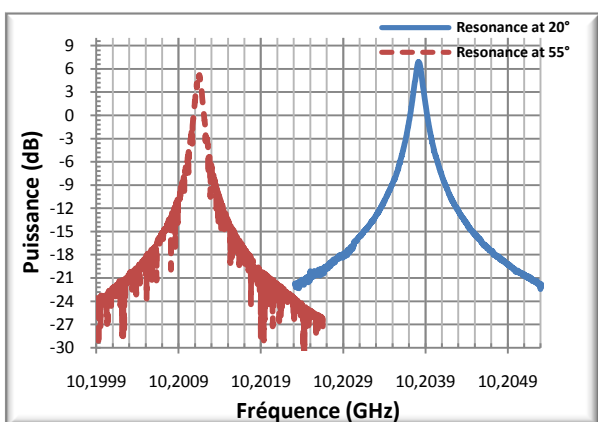


Figure 7. Décalage de 2.5 MHz de la résonance dans une boucle fibrée de 20 mètre pour $\Delta T = 35 \text{ K}$ et $f_{RF} = 10.2 \text{ GHz}$

5. Conclusion

Les résonateurs optiques fibrés conduisent à des facteurs de qualité sans équivalent dans le domaine des microondes. La réalisation d'oscillateurs basés sur ces résonateurs reste cependant difficile, de par les nombreuses contributions en bruit qui doivent être maîtrisées. Cette étude présente le bilan, à la fois théorique et expérimental, de ces contributions pour un système OEO particulier. Le modèle complet du système sera présenté lors de la conférence. La stabilité thermique du résonateur a été elle aussi théoriquement et expérimentalement étudiée, et on a pu démontrer une sensibilité thermique du système de -6.8 ppm/K .

Finalement, des facteurs Q élevés devraient ouvrir la voie à une meilleure performance à l'avenir si les mécanismes de bruit peuvent être suffisamment éclaircis.

6. Bibliographie

- [1] A. A. Savchenkov, V. S. Ilchenko, A. B. Matsko, L. Maleki, "Kilohertz optical resonances in dielectric crystal cavities" *Phys. Rev. A* 70, 05804, 2004.
- [2] A. A. Savchenkov, V. S. Ilchenko, W. Liang, D. Eliyahu, A. B. Matsko, D. Seidel, and L. Maleki, "Voltage-controlled photonic oscillator" *Optics Letters*, Vol. 35, No. 10, May 2010, pp. 1572-1574.
- [3] X.S. Yao and L. Maleki, "Progress in the optoelectronic oscillator - a ten year anniversary review", 2004 IEEE Microwave Theory and Tech. Symp. Digest, pp. 287-290.
- [4] R.W.P. Drever, J.L. Hall, F.V. Kowalski, J. Hough, G.M. Ford, A.J. Munley and H.Ward, "Laser phase and frequency stabilization using an optical-resonator" *Appl. Phys. B.*, vol. 31, no. 2, pp. 97-105, Jun. 1983.
- [5] A. Bouchier, K. Saleh, P.H. Merrer, O. Llopis, G. Cibiel, "Theoretical and experimental study of the phase noise of opto-electronic oscillators based on high quality factor optical resonators" *Proc. of the 2010 IEEE-IFCS*, pp. 544-548.
- [6] A. Yariv, "Critical coupling and its control in optical waveguide-ring resonator systems" *IEEE Photon. Technol. Lett.*, vol. 14, no. 4, pp 483-485, Apr. 2002.
- [7] J. Everard, "Low noise oscillators" in *Microwave Symposium Digest, 1992.*, IEEE MTT-S International, pp. 1077-1080 vol.2, 1992.
- [8] K. Saleh, A. Bouchier, P.H. Merrer, O. Llopis, G. Cibiel ; , "Fiber ring resonator based opto-electronic oscillator phase noise optimization and thermal stability study" *Proc. of the SPIE Photonics West 2011*.
- [9] S. Chang, C. C. Hsu, T. H. Huang, W. C. Chuang, Y. S. Tsai, J. Y. Shieh, and C. Y. Leung, "Heterodyne interferometric measurement of the thermo-optic coefficient of single mode fiber" *Chin. J. Phys.* 38, 437-442 (2000).
- [10] R. Wynne, J. L. Daneu, and T. Y. Fan, "Thermal coefficients of the expansion and refractive index in YAG" *Applied Optics / Vol. 38, No. 15 / 20 May 1999*.