

Evaluation de différentes techniques de mesure du bruit de phase de sources optiques et hyperfréquences utilisant une ligne à retard optique

O. Llopis, H. Brahimi, P. Lacroix

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

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

1. Introduction

La fibre optique possède dans ses pertes ultra-faibles une propriété unique qui est exploitée en métrologie pour obtenir des retards importants, c'est-à-dire l'équivalent de résonances à très fort coefficient de qualité. Il est donc possible de réaliser avec une bobine de fibre optique des références passives de fréquence, lesquelles servent ensuite à caractériser des sources, aussi bien dans le domaine de l'optique que celui des hyperfréquences. Dans les deux cas, le système de base est le discriminateur de fréquence : le signal est retardé dans une voie par rapport à la voie de référence grâce à une bobine de fibre optique de plusieurs kilomètres, puis les deux voies convergent vers un élément non-linéaire réalisant le mélange de fréquence (un mélangeur équilibré à diodes dans le cas hyperfréquence, une simple photodiode dans le cas optique). Cette présentation vise à faire le point sur les performances de différents bancs de mesure destinés à la caractérisation de sources à très haute pureté spectrale. Les contributions des éléments du banc au plancher de bruit et les problèmes de calibrage sont détaillés.

2. Mesure de sources hyperfréquences à très haute pureté spectrale

La mesure du bruit de phase d'une source hyperfréquence est classiquement réalisée avec un verrouillage de phase (PLL) à bande étroite sur une source de référence. Cette approche présente néanmoins plusieurs inconvénients : 1) elle nécessite de disposer d'une source à très haute pureté spectrale accordable en fréquence, ce qui est généralement coûteux ; 2) elle est peu tolérante aux dérives en fréquence de la source sous test (décrochages) et nécessite un calibrage complexe si on est amené à élargir la bande de verrouillage pour éviter les décrochages en cours de mesure. De ce fait, l'idée de revenir à la technique du discriminateur de fréquence à ligne à retard est intéressante, à condition de pouvoir améliorer la sensibilité de ce système. Le remplacement de la ligne à retard hyperfréquence (en général une dizaine de mètres de câble coaxial) par une ligne à retard optique permet une telle amélioration [1-3]. En effet, la sensibilité de la détection de fréquence est directement proportionnelle au retard. L'utilisation d'une bobine de fibre de plusieurs kilomètres permet un retard de plusieurs dizaines de micro-secondes alors que le banc « tout hyperfréquence » est limité à quelques dizaines de nano-secondes, d'où un gain de plus de 50 dB en sensibilité. Le passage par l'optique implique cependant des pertes supplémentaires, ainsi que l'insertion dans le banc de composants qui ne sont pas sans effet sur le plancher de bruit : laser, modulateur, photodiode et, éventuellement, un amplificateur.

Le banc de mesure développé au LAAS est représenté en Figure 1. Il comprend une ligne à retard optique de 4 km ($\sim 19 \mu\text{s}$). La porteuse optique est délivrée par un module laser DFB de télécommunications (EM4), de relativement forte puissance (60 mW). La conversion électrique-optique est réalisée avec un modulateur de Mach-Zehnder et la conversion optique-électrique en bout de ligne est effectuée par une photodiode rapide supportant une puissance optique élevée (Discovery DSC-30S) afin de conserver le meilleur rapport signal à bruit possible. Le laser a été choisi pour ses caractéristiques en bruit, et en particulier son faible niveau de bruit relatif d'amplitude (RIN) à haute fréquence. Après de multiples essais, nous avons décidé de nous passer de l'amplificateur habituellement utilisé en sortie de photodiode (voir Figure 1), car le bruit de phase en $1/f$ des

amplificateurs hyperfréquences s'est révélé plus élevé que le bruit de phase en $1/f$ de l'ensemble de la liaison optique.

Grâce au choix judicieux des différents composants, et l'optimisation de la longueur de la ligne à retard (4 km), ce banc présente un plancher de bruit à 10 kHz plus faible que celui des bancs de mesure basés sur des techniques classiques hyperfréquences (exemple : bancs commerciaux basés sur un verrouillage de phase sur un synthétiseur à haute pureté spectrale référencé sur une source à quartz). Un niveau de bruit de -151 dBc/Hz a en effet été mesuré à 10 kHz de la porteuse RF [3], celle-ci étant constituée d'une source micro-onde à 4.87 GHz basée sur un résonateur micro-onde saphir à très fort coefficient de qualité. On peut estimer le plancher de bruit en court-circuitant la ligne à retard optique, ce qui a pour effet de rendre le banc très peu sensible aux fluctuations de fréquence de la source RF. Toutefois, si cette technique prend bien en compte les bruits du laser et de la photodiode, elle a pour effet d'occulter totalement les problèmes de bruit ajouté par la fibre optique (qu'il s'agisse d'ailleurs de bruit propre à la fibre, ou de bruit converti par la fibre). L'utilisation d'une source à très haute pureté spectrale, comme un oscillateur saphir, permet le test du banc dans des conditions les plus complètes possibles. La disponibilité d'une telle source au LAAS [4], développée en commun avec le laboratoire FEMTO-ST à Besançon lors d'une étude CNES, a permis cette étude expérimentale détaillée du banc à ligne à retard optique. Les performances de la source saphir sont cependant très proches de celles du discriminateur de fréquence, et de nouveaux progrès sur le plancher de bruit de ce banc nécessiteront de revoir la technique de validation expérimentale.

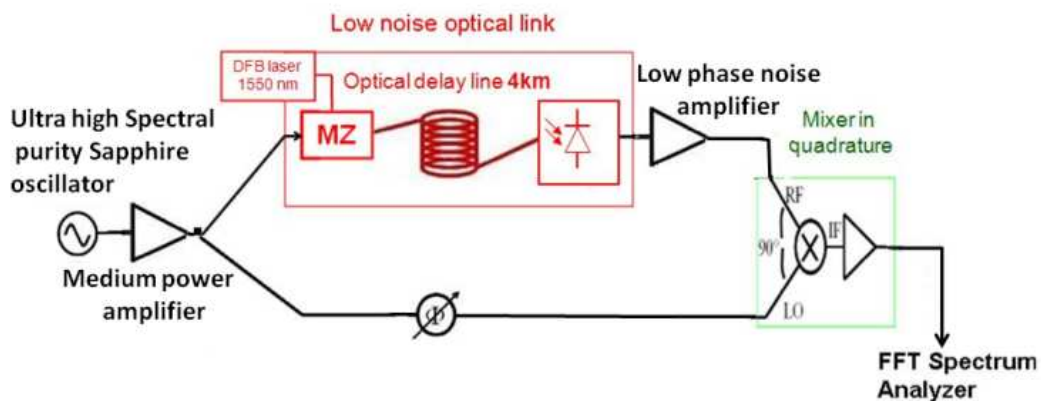


Figure 1

*Discriminateur de fréquence micro-onde à ligne à retard optique
Mesure des performances de ce système avec une source à résonateur saphir*

La figure 2 représente le plancher de bruit de phase hyperfréquence obtenu avec notre discriminateur de fréquence RF à ligne à retard optique, et les différentes contributions de bruit telles qu'elles ont pu être analysées grâce à une étude expérimentale de conversion du bruit AM et du bruit FM du laser [3]. Le bruit AM du laser à haute fréquence (ou RIN) détermine le plancher de bruit de phase additif loin de la porteuse. Pour le laser utilisé, il est largement inférieur à -160 dB/Hz à la fréquence de travail. On constate sur la Figure 2 que l'amplificateur situé avant la division de puissance (amplificateur de moyenne puissance) contribue également à ce plancher de bruit de phase, qui au final ne pourra que difficilement dépasser les -160 dBc/Hz à cause de ces deux contributions de bruit. La contribution du bruit AM et du bruit FM en $1/f$ du laser a été quant à elle étudiée par une technique de sensibilité. Nous avons mesuré ces deux types de bruit, puis nous avons perturbé l'amplitude ou la fréquence du laser et mesuré la perturbation occasionnée sur la phase RF de la liaison optique à l'aide d'un analyseur de réseaux. Ce travail nous a permis de constater que, si le bruit d'amplitude en $1/f$ du laser n'est que faiblement converti en fluctuations de phase, ce n'est pas le cas du bruit de fréquence du laser, qui semble bien constituer la principale contribution au plancher de bruit du dispositif. Le mécanisme de démodulation de ce bruit en $1/f$ du laser n'est pas encore

totallement expliqué. On peut supposer néanmoins que les phénomènes de dispersion dans la fibre optique y contribuent largement. Toutefois, un essai de remplacement de la bobine de fibre SMF28 par une fibre à dispersion décalée (fibre LEAF Corning) n'a pas conduit à de meilleurs résultats. Au contraire, une contribution supplémentaire de bruit a été observée, contribution très dépendante de la puissance optique injectée dans la fibre. Il y a donc encore de nouvelles études à mener pour optimiser complètement ce type de banc de mesure, et comprendre l'ensemble des mécanismes de conversion bruit qui restent relativement complexes par rapport à ceux intervenant dans un banc classique hyperfréquence.

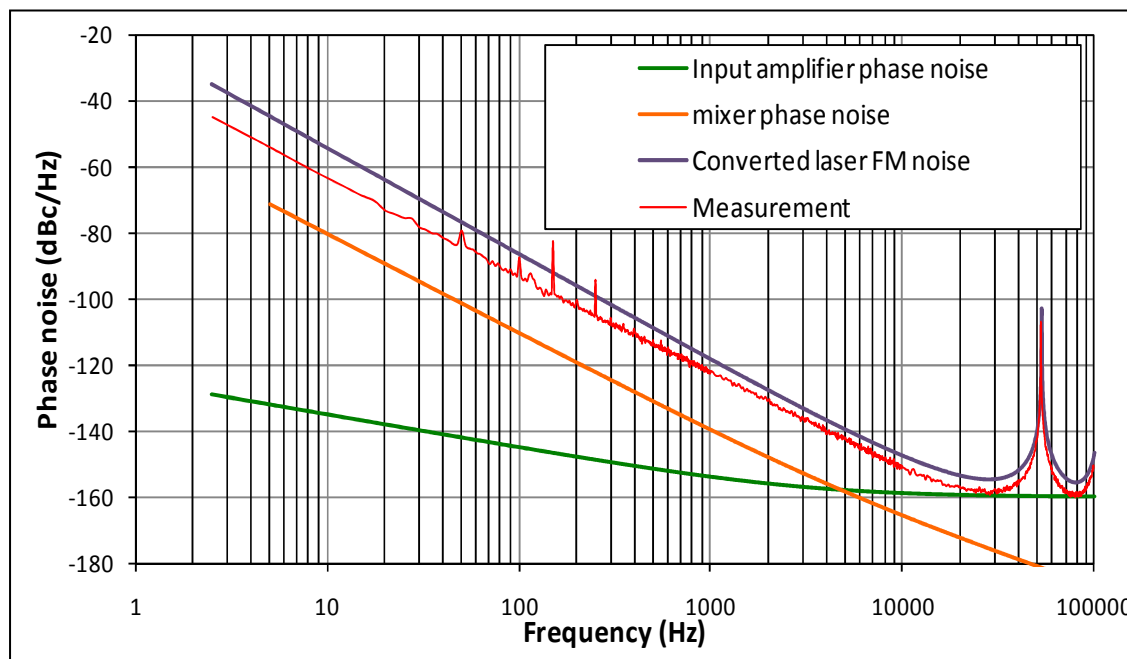


Figure 2

*Plancher de bruit de phase du banc à ligne à retard optique mesuré à 4.87 GHz (courbe rouge)
Etude de la contribution en bruit de différents éléments du banc (les trois autres courbes)*

3. Mesure de lasers à très faible largeur de raie

Le même système peut être utilisé pour mesurer le bruit de fréquence (ou de phase) des lasers, en restant cette fois dans le domaine optique de la source jusqu'au mélangeur, qui est réalisé avec une photodiode (c'est la réponse quadratique de la photodiode qui permet le mélange). Dans certains cas (ligne courte), l'utilisation d'une paire de photodiodes équilibrées peut se révéler utile, afin de minimiser la détection d'amplitude. Ce système est classiquement mis en oeuvre pour la mesure de la largeur de raie des lasers, avec une ligne à retard longue par rapport à la longueur de cohérence optique du laser. Dans ce cas, le spectre mesuré en sortie est le spectre de puissance du laser. Cependant, si le laser possède une largeur de raie très faible, on se trouve dans les mêmes conditions que pour le banc hyperfréquence : le système fonctionne en mode cohérent et c'est une détection des fluctuations de fréquence du laser qui est réalisée [5,6].

Par rapport à la mesure de sources hyperfréquences, le discriminateur de fréquence optique pose néanmoins des problèmes un peu différents. Avec une ligne longue (de l'ordre du km), la sensibilité du banc est excellente et largement suffisante pour la mesure de quasiment tout type de source optique. Cependant, la mesure de fréquence n'est optimale que si les signaux arrivent en quadrature de phase sur la photodiode. Cette condition, qui ne pose aucun problème en hyperfréquences, est très délicate

dans une approche optique. En particulier, le maintien de la condition de quadrature est quasiment impossible avec une ligne longue, ce qui pose de difficiles problèmes de calibrage.

Nous avons résolu ces problèmes avec différentes approches suivant le type de laser à mesurer. Pour la mesure du bruit de fluctuation de fréquence de lasers à semiconducteurs, nous utilisons une ligne courte, de 1 m de long, avec une isolation thermique du pont interférométrique (boîtier isolé et thermalisation passive en cuivre). Il est alors possible de maintenir la quadrature pendant la durée de la mesure (à condition d'effectuer peu de moyennage). Un exemple de ce type de mesure pour un laser DFB est présenté en référence [3].

Pour la mesure de lasers à haute pureté spectrale, nous utilisons une ligne longue (2 km). Le banc est un banc utilisé normalement pour la mesure de la largeur de raie des lasers à semiconducteurs (le retard de 2 km permettant la décorrélation des signaux pour ces lasers). Dans le cas d'un laser à fibre présentant une largeur de raie de l'ordre de 1 kHz, la longueur de cohérence du laser est très supérieure à la longueur de la ligne et le banc fonctionne en mode cohérent, c'est-à-dire en discriminateur de fréquence. La difficulté réside ici dans la stabilité du signal, et de la condition de phase, en sortie de la ligne longue de 2 km. Par simple effet thermique, la phase tourne constamment avec des rotations de 360° toutes les 200 ms environ. Lorsque la phase entre les deux bras est 0° ou 180° , la sensibilité du système est très faible. Lorsqu'elle est de $+90^\circ$ ou -90° , cette sensibilité est maximale. Nous avons pu montrer [7] qu'un moyennage sur un grand nombre d'états de phase conduisait à un spectre parfaitement défini et à une valeur du coefficient de détectivité en fréquence du banc simplement divisée par racine de 2 par rapport au coefficient optimal correspondant à la quadrature. Le spectre obtenu est également corrigé, au final, des creux de transmission liés à la réponse en $\sin(\pi f\tau)/(\pi f\tau)$ de la ligne à retard [5]. Cette approche a permis la mesure du bruit de phase d'un laser à fibre Koheras à $1.55 \mu\text{m}$, à très faible largeur de raie. Le spectre mesuré est représenté en Figure 3.

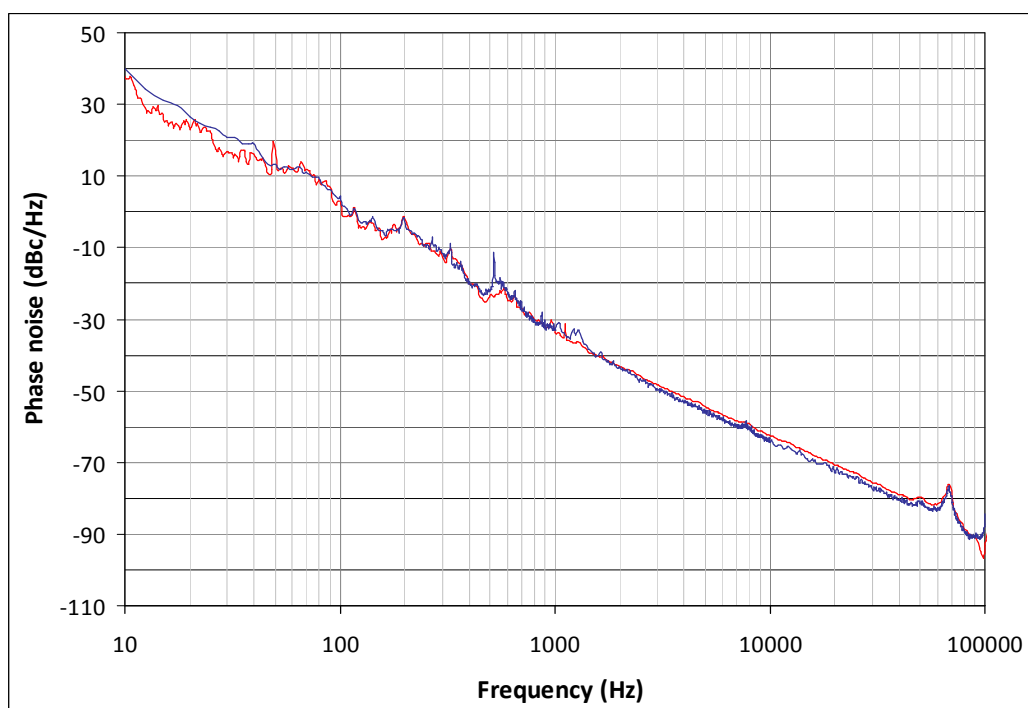


Figure 3

Mesure du bruit de phase d'un laser à fibre (Koheras) par deux techniques différentes basées sur une ligne à retard (2 km) ; mesure homodyne et mesure auto-hétérodyne utilisant un analyseur de signal

Afin de valider cette approche originale de mesure, nous l'avons comparée à une autre approche déjà publiée [8]. Cette seconde approche nécessite un matériel beaucoup plus conséquent, mais qui était à disposition dans le laboratoire. Elle consiste à décaler en fréquence le signal dans l'une des deux voies de l'interféromètre, à l'aide d'un cristal acousto-optique. Le banc utilisé est donc un

système dit « auto-hétérodyne », qui transpose le spectre au voisinage de la fréquence de décalage, dans notre cas 80 MHz. Dans le cas d'une mesure en mode cohérent, on peut montrer que le signal autour de 80 MHz issu d'un tel banc contient l'information de bruit de fréquence du laser, à condition de l'analyser avec un mesureur de bruit de phase (dans notre cas, un analyseur de signal Agilent E5052B). Le bruit de phase du laser est calculé à partir du bruit de phase mesuré du signal de sortie à 80 MHz grâce à une équation détaillée en référence [8]. Au final, la comparaison des deux techniques (Figure 3) montre tout l'intérêt de la première, qui ne nécessite ni synthétiseur RF, ni cristal acousto-optique, et pour laquelle le coûteux analyseur de signal en sortie est remplacé par un simple analyseur de spectre FFT.

4. Conclusion

Les techniques de mesure de bruit de phase (ou de fréquence) basées sur des lignes à retard sont assez similaires dans leur fonctionnement, qu'elles s'appliquent aux sources hyperfréquences ou aux lasers. Elles le sont d'autant plus que, pour ces techniques, l'utilisation d'une ligne à retard optique est aujourd'hui un point commun à ces deux domaines de la métrologie. Cependant, ces systèmes restent complexes si l'on veut comprendre tous les mécanismes de conversion de bruit qu'ils hébergent. Cette compréhension est cependant nécessaire à l'obtention de performances ultimes. Dans cette communication, un banc hyperfréquence particulièrement optimisé en bruit a été présenté, ainsi que des approches originales et peu publiées encore pour la mesure des lasers à très haute pureté spectrale. Des travaux sont en cours pour améliorer ces performances et pour appliquer ces techniques à la caractérisation de sources originales et difficilement testables par d'autres approches.

1. K. VOLYANSKIY, J. CUSSEY, H. TAVERNIER, P. SALZENSTEIN, G. SAUVAGE, L. LARGER, E. RUBIOLA, "Applications of the optical fiber to the generation and to the measurement of low-phase-noise microwave signals", J. Opt. Soc. Am B, vol 25, n° 12, dec. 2008.
2. B. ONILLON, S. CONSTANT, O. LLOPIS, "Optical links for ultra-low phase noise microwave oscillators measurement", Proc. of the IEEE Int. Freq. Control Symposium, Vancouver, 2005, pp. 545-50.
3. H. BRAHIMI, P. LACROIX, O. LLOPIS, "Optimisation of a microwave frequency discriminator based on an optical delay line", 2009 IEEE Int. Topical Meeting on Microwave Photonics, Oct. 2009, Valencia, ISBN 978-84-8363-424-0
4. G. CIBIEL, M. REGIS, O. LLOPIS, A. RENNANE, L. BARY, R. PLANA, Y. KERSALE, V. GIORDANO "Optimisation of an ultra low phase noise sapphire - SiGe HBT oscillator using nonlinear CAD" IEEE trans. on Ultrasonics Ferroelect. and Freq. Control, Vol. 51, n° 1, Jan. 2004, pp. 33-41.
5. W.V. SORIN, K.W. CHANG, G. A. CONRAD, P.R. HERNDAY, "Frequency domain analysis of an optical discriminator", Journal of Lightwave Technology, vol 10, n° 6, June 1992, pp. 787-793.
6. H. LUDVIGSEN, M. TOSSAVAINEN, M. KAIVOLA, "Laser linewidth measurements using self-homodyne detection with short delay", Optics Communications, Elsevier, 155(1998), pp. 180-186.
7. O. LLOPIS et al., to be published.
8. S. CAMATEL, V. FERRERO, "Narrow linewidth CW laser phase noise characterization methods for coherent transmission system applications", Journal of Lightwave Tech., vol 26, N° 17, Sept. 2008, pp. 3048-3055.