Temps-fréquence: amélioration de la sensibilité des mesures de bruit de phase à l'aide de l'optique

SALZENSTEIN Patrice – Ingénieur EUDIL (École universitaire d'ingénieurs de Lille). Docteur en électronique de l'Université de Lille 1. Ingénieur de recherche au CNRS, Laboratoire FEMTO-ST (Franche-Comté électronique mécanique thermique optique. Sciences et technologies)

1 Introduction

1.1 Résumé

Les planchers de bruit des instruments sont considérablement améliorés par l'utilisation d'éléments optiques pour constituer des bancs optoélectroniques. L'intérêt de l'optique est la possibilité de moduler en intensité une porteuse optique avec un signal hyperfréquence, qui ne sera pas limité en montant en fréquence, un tel système fonctionnant sur le même principe à 10 GHz comme à 75 GHz, ou même à 110 GHz par exemple.

Les éléments limitant de ce type de banc se situent au niveau de la photodiode, du contrôle en température des lignes à retard optique, ou encore du bruit d'intensité relatif du laser utilisé (RIN), les modulateurs Mach Zehnder, les amplificateurs hyperfréquences ou les divers éléments de filtrages n'étant plus critiques. De plus le plancher des instruments peut être encore amélioré d'un facteur 1/racine N par inter-corrélation en effectuant N moyennages sur un grand nombre d'échantillons, un compromis étant à déterminer en fonction du temps d'acquisition et des dérives du système. L'utilisation de l'optique présente des potentialités importantes et permet de raccrocher les travaux menés dans le domaine hyperfréquence avec ceux des opticiens. Ces travaux sont essentiels en raison du développement des étalons de fréquences optiques pour le domaine temps-fréquence.

Nous développerons les applications et l'utilité de l'amélioration de ces mesures pour le développement des étalons de fréquence optiques pour le domaine temps-fréquence.

1.2 L'utilisation de l'optique

Les raisons principales d'utiliser une fibre optique avec un laser, un modulateur d'intensité et un photodétecteur, sont la possibilité de disposer d'une ligne à retard longue grâce aux faibles 1

Page

Page

Temps-fréquence: amélioration de la sensibilité des mesures de bruit de phase à l'aide de l'optique

pertes (typiquement de 0.2 dB/km), à la largeur de bande de la fibre optique, au très faible plancher de bruit, et à la faible sensibilité thermique du retard. Cette sensibilité est de l'ordre de 6,85.10⁻⁶/K, soit meilleur d'un facteur 10 qu'une cavité saphir diélectrique. Ces caractéristiques permettent de mettre en œuvre des oscillateurs et des instruments de mesures à haute sensibilité pour la mesure du bruit de phase. Dans les deux cas, le choix de la bande de fréquence micro-onde n'a pas d'impact sur le bruit de phase, ce qui permet de travailler aux très hautes fréquences. De plus, l'utilisation de techniques de cross-corrélation permet de réduire encore les planchers de bruit, comme nous le verrons dans cet article.

2 Rappels mathématiques

2.1 Pour le bruit de phase

Nous rappelons le vocabulaire et les grandeurs mesurées.

Le signal quasi sinusoïdal v(t) de fréquence v_0 peut être décomposé comme suit:

 $v(t) = [1 + \alpha(t)] \cos[2\pi v_0(t) + \phi(t)]$

où l'on fait intervenir une fluctuation d'amplitude aléatoire $\alpha(t)$ et une fluctuation de phase aléatoire $\alpha(t)$. Ces deux fluctuations sont généralement très petites devant 1 durant le temps de la mesure. Le bruit de phase est donné par une densité spectrale de bruit de phase $S\alpha(f)$ en dBrad²/Hz. Un modèle a été mis en œuvre qui donne la densité spectrale de bruit de phase comme la somme de différents types de bruit, en reliant le bruit blanc en f⁰ et le bruit flicker de en 1/f, et l'intégration en 1/f² qui est présente dans les oscillateurs. Le spectre S_y(f) des fluctuations de fréquences est en effet :

$$S_v(f) = (f/v_0)^2 \cdot S\phi(f) = \Sigma h_i \cdot f^i$$

pour *i* variant de - 2 a + 2 suivant les types de bruit.

Les types de bruit les plus fréquents sont:

- le bruit blanc de fréquence (i = 0);
- le bruit flicker de fréquence (i = -1) qui se traduit par une pente en f⁻³ dans le domaine spectral et un palier dans le domaine temporel ;
- la marche aléatoire de fréquence (i = -2) soit une pente en f⁻⁴ dans le domaine spectral.

2.2 Pour la technique de cross-corrélation

Afin d'améliorer les paliers de bruit de phase des instruments de mesures, nous utilisons des techniques dites de cross-corrélation. On appelle par exemple a(t) et b(t) le plancher de bruit de deux instruments et c(t) le bruit commun à ces deux instruments. Par définition, ces trois signaux sont statistiquement indépendants.

Les deux sorties du banc sont:

 $\mathbf{x}(t) = \mathbf{a}(t) + \mathbf{c}(t)$

$$\mathbf{y}(\mathbf{t}) = \mathbf{b}(\mathbf{t}) + \mathbf{c}(\mathbf{t})$$

Lorsque l'on effectue *m* mesures, et que le banc ne comporte pas de dispositif sous test (DST), la transformée de Fourier conduit à déterminer un plancher de bruit en fonction du nombre de mesures effectuées. Pour c(t) = 0, la limite statistique est :

 $S_{yx}(f) = \sqrt{[1/m \cdot S_a(f) \cdot S_b(f)]}$

Ainsi, lorsque l'on souhaite une amélioration de 5 dB sur la densité spectrale de bruit de phase, il nous en coûtera un facteur 10 en moyennage.

Si maintenant on considère c(t) comme le bruit corrélé de l'instrument, dû à notamment à l'environnement, nous avons une limite de la sensibilité de l'instrument qui sera :

 $S_{vx}(f) = S_c(f)$

Si le nombre de moyennages m est suffisamment grand pour que la limite statistique soit négligeable, et que le plancher soit négligeable face au bruit du DST, la cross-corrélation donne alors le bruit du DST, ce qui est l'utilisation normale de ce type d'instrumentation.

2.3 Bruit de phase de l'oscillateur

L'oscillateur est constitué d'un amplificateur de gain A et d'une fonction de transfert β dans la boucle. La fonction β sélectionne la fréquence de l'oscillateur dès que l'amplificateur compense les pertes dans la boucle. Ce modèle général est indépendant de la nature de l'amplificateur et de la fréquence sélectionnée. La condition de fonctionnement est donnée par la condition de Barkhausen pour une oscillation stationnaire $|A\beta| = 1$. Dans ces conditions, l'allure de la fonction de transfert du bruit de phase est donnée sur la Figure 2.1.





Dans cette représentation, le bruit de phase est toujours un bruit additif au regard des mécanismes physiques mis en jeu. Cela permet d'éliminer les difficultés mathématiques dues à la nature du bruit flicker et au bruit des fluctuations environnementales.

Page

Métrologie

Page

Temps-fréquence: amélioration de la sensibilité des mesures de bruit de phase à l'aide de l'optique

Dans le cas de l'oscillateur à ligne à retard, le retard τ_d permet de sélectionner, à l'aide d'un filtre passe-bande, tout multiple de $1/\tau_d$ sans préférence.

3 La ligne à retard à fibre optique

3.1 Historique de ces développements

Ces travaux ont été amorcés par Enrico Rubiola, professeur à l'Université de Franche-Comté, en relation avec l'équipe de Lute Maleki au *Jet Propulsion Laboratory* (JPL) de la NASA aux Etats-Unis [1]. Il s'agissait de pouvoir mesurer les oscillateurs opto-électroniques réalisés au JPL [2]. Les travaux sur le développement des bancs ont été poursuivis à Besançon [3-4].

3.2 Stratégie pour le choix de la ligne à retard

Cette ligne à retard est représentée sur la Figure 3.1 :



EOM = modulateur électro-optique Iso= Isolateur

Pour des raisons pratiques, les composants utilisés sont ceux qui existent et qui ont été développés pour les télécommunications spatiales. Les composants hyperfréquences pourront ainsi être centrés sur 10 GHz dans une bande de 4 à 5 GHz. L'instrumentation est dédiée avant tout au faible bruit de phase et à la recherche de la plus haute stabilité du retard.

La fibre optique est contrôlée en température au milliKelvin. En effet, comme nous utilisons une technique de cross-corrélation, il est nécessaire d'effectuer des mesures sur plusieurs heures. Ainsi, la grande masse thermique de la boîte en métal dans laquelle est placée la fibre optique permet de limiter les désagréments des fluctuations de température.

Le laser utilisé est de type CATV – contrôlé en température – et alimenté par un courant faible bruit. Ce choix est motivé par la nécessité de disposer d'un faible bruit d'intensité relative (RIN) tout en restant dans des coûts raisonnables. Des résultats montrent que la stabilité en fréquence du laser est inférieure à 100 kHz. La contribution du laser sera donc négligeable devant d'autres contributions.

Le modulateur électro-optique (EOM) utilisé est de type Mach Zehnder.

Les meilleurs photodétecteurs faible bruit pour des signaux de modulation hyperfréquences sont de technologie à diode p-i-n GaInAs. Nous privilégions le choix de ne pas utiliser de photodétecteur intégrant des éléments amplificateurs afin de maîtriser les amplificateurs faible bruit utilisés en sortie du photodétecteur.

4 Mesure de bruit de phase à l'aide d'une double ligne à retard optique

Le banc est schématisé sur la Figure 4.1.



Figure 4.1 Banc de mesure de bruit de phase à l'aide d'une double ligne à retard optique

Ce banc est constitué de deux bras égaux et symétriques qui mesurent l'oscillateur sous test (DST) par comparaison de sa phase avec une copie de sa phase.

En ne regardant qu'un bras, nous pouvons voir que le signal est divisé en deux dans chacun des deux bras avant le modulateur électro-optique, le bras long est constitué d'un modulateur, d'une fibre optique qui sert de ligne retard, d'un photodétecteur et d'un amplificateur micro-onde.

Nous remarquons que le banc, dans la configuration qui est donnée, n'a pas d'entrée optique, et donc ne permettra pas la mesure d'oscillateurs optiques tels que des faisceaux optiques modulés par un signal hyperfréquence. Toutefois, l'intérêt du banc est bien compréhensible : il sera possible de disposer de bancs opto-électroniques qui permettent la mesure de bruit de phase de tout signal hyperfréquence pour autant que l'on disposera des composants hyperfréquences à la fréquence désirée. Nous rappelons que la fréquence de travail choisie par commodité en bande 8-12 GHz aurait tout aussi bien pu être à de plus haute fréquences. La possibilité de moduler en intensité une porteuse optique avec un signal hyperfréquence sera par exemple la même à 75 GHz ou même à 110 GHz.

Page

5 Expériences permettant d'optimiser le banc et exemples de mesures réalisées

La Figure 5.1 montre le plancher de bruit avec deux fibres optiques courtes en guise de jonction pour remplacer la ligne à retard.



pour une configuration simple bras en éliminant la ligne à retard

Le fait d'éliminer le retard permet de se débarrasser de deux contributions au bruit : l'effet Rayleigh dans la fibre et les fluctuations aléatoires dues au bruit de fréquence du laser. La courbe rouge est le bruit mesuré après le mélangeur et les autres courbes sont données après calcul à l'aide de la fonction de transfert de la fibre optique qui relie le bruit de phase effectif à un facteur correctif de $4\sin^2(\pi f \tau)$, *f* étant la fréquence de Fourier (écart à la porteuse hyperfréquence) et τ le retard, d'où le changement de pente pour les autres courbes.

La seconde expérience montre l'effet du RIN du laser et du bruit de modulation d'amplitude (AM) du DST. Les courbes de mesures sont représentées sur la Figure 5.2.



Figure 5.2 Effet du RIN du laser et du bruit AM du DST, mesuré avec un retard nul

Page

Métrologie

La courbe la plus basse (en rouge) est la même que sur la figure précédente (Figure 4.1) où l'on a mesuré comme DST un oscillateur saphir à 10 GHz. En effectuant la même mesure mais avec un autre laser (courbe du milieu, en bleu) on voit l'effet du RIN du laser. En remplaçant pour le DST l'oscillateur saphir par un synthétiseur et en prenant le meilleur laser, on voit l'effet du bruit AM du DST.

Une troisième expérience (Figure 5.3) montre le bruit de phase de l'oscillateur saphir à température ambiante, connu pour être l'un des meilleurs à ces fréquences. Le bruit en $1/f^3$ domine sur cette figure. On voit l'effet du choix de la longueur de la ligne à retard pour faire en sorte de mesurer effectivement le DST. Ici cela est convenable à partir d'un retard de $\tau = 10 \ \mu s$, soit une longueur de fibre de 2 km.



Figure 5.3 Bruit de phase d'un oscillateur saphir mesuré à l'aide du banc

Dans une quatrième expérience, dont le résultat est donné sur la Figure 5.4, nous mesurons le bruit à l'aide de la configuration de la Figure 5.5. Cette configuration ne permet cependant pas de différencier le bruit des fibres optiques du bruit des autres contributions. De plus, nous ne pouvons pas appliquer de méthode de cross-corrélation. Toutefois, cette configuration permet de donner une borne haute du bruit atteignable par ce type de banc. Nous avons ainsi, sur la Figure 5.4, un bruit de phase en $1/f a - 110 dBrad^2/Hz$ ramené à 1 Hz de la porteuse de modulation hyperfréquence à 10 GHz. À un tel niveau, le bruit du mélangeur est négligeable.



Figure 5.4 Niveau de bruit résiduel des fibres optiques mesurées avec un oscillateur saphir

Page

Page

Article

Temps-fréquence: amélioration de la sensibilité des mesures de bruit de phase à l'aide de l'optique



Figure 5.5 Méthode de mesure du bruit résiduel du banc avec les fibres optiques



Figure 5.6 Schéma d'un oscillateur opto-électronique

La dernière expérience montre la mesure du bruit de phase d'un oscillateur opto-électronique dont la fréquence de modulation est de 10 GHz, et dont le schéma est donné sur la Figure 5.6. Le résultat de la mesure est donné sur la Figure 5.7. L'oscillateur opto-électronique mesuré est, en terme de bruit de phase, meilleur intrinsèquement que le meilleur des synthétiseurs hyperfréquence du commerce (courbe en rose) et même meilleur que le bruit du meilleur oscillateur 100 MHz ramené à 10 GHz (courbe en vert). Enfin, signalons que la fréquence de cet oscillateur opto-électronique opérant à 10 GHz peut être décalée par pas de 50 kHz sans en dégrader le bruit.



Figure 5.7 Bruit de phase d'un oscillateur opto-électronique

6 Potentialités des nouveaux types d'oscillateurs opto-électroniques à base de minirésonateurs

Nous tâchons ici de montrer les potentialités des oscillateurs opto-électroniques à base de minirésonateurs. La ligne à retard est remplacée par un élément résonant. Des minirésonateurs à base de MgF2 ont été réalisés. Un exemple est représenté Figure 6.1. Ces minirésonateurs sont utilisés comme résonateurs à mode de galerie, et il a été obtenu un facteur de qualité de $3,2.10^8$ à la longueur d'onde de $1,55 \mu$ m, le couplage optique ayant été réalisé à l'aide d'une fibre étirée [5] (Figure 6.2 et Figure 6.3).



Figure 6.1 Minirésonateur optique réalisé à l'aide d'un cylindre de MgF2 de 5,2 mm de diamètre sur son support métallique

II - 30 - 21

Page

9



Figure 6.2 Schéma du dispositif expérimental de couplage d'un minirésonateur optique



Figure 6.3 Anti-résonance d'un minirésonateur MgF2

7 Quelques mots sur les étalons de fréquence optique

Les étalons de fréquence optique sont depuis les années soixante à l'origine de la définition des unités de longueur du système international (SI). En effet, de 1960 à 1983, l'unité de longueur du SI, le mètre, a été défini comme étant 1 650 763,73 longueurs d'onde dans le vide de la ligne orange-rouge du krypton 86. Puis l'exactitude des techniques utilisées pour mesurer la fréquence de la lumière ayant dépassé celle des techniques utilisées pour mesurer

Page

Article II - 30 - 21

Article II - 30 - 21

Page

la longueur d'onde optique, en 1983, il a été convenu de redéfinir le mètre en fonction de l'unité de temps, la seconde du SI. La définition suivante a été alors adoptée : « Le mètre est la longueur du trajet sur lequel se déplace la lumière dans le vide pendant un intervalle de temps de 1/299 792 458 d'une seconde. » Actuellement, la seconde du SI st définie comme étant « la durée de 9 192 631 770 périodes du rayonnement correspondant à la transition entre les deux niveaux hyperfins du niveau fondamental de l'atome de césium-133 ». Les horloges au césium utilisent la fréquence d'oscillation naturelle des atomes de césium, qui est exactement de 9192631770 Hz par définition. En utilisant un circuit électronique pour compter 9192631770 oscillations, la fontaine au césium exploite le principe selon lequel la mesure d'une fréquence s'améliore avec le temps de la mesure. Il est possible d'atteindre des stabilités d'un meilleur niveau que 10⁻¹⁵. De là sont définies les unités de temps (la seconde) et de fréquence (le Hertz).

Les fréquences optiques sont récupérées dans un peigne de fréquence. Ainsi, pour un laser titane-saphir, des impulsions laser d'une durée de 30 à 50 femtosecondes, soit 30 à 50.10⁻¹⁵ s, générées à un taux de répétition de 700 MHz par un laser à mode bloqué sont focalisées dans une fibre microstructurée de l'ordre de 20 cm de long. Les impulsions du laser Ti:saphir sont centrées sur une longueur d'onde d'environ 800 nm, elles apparaissent en rouge. Au fur et à mesure que les impulsions se propagent dans la fibre, de nouvelles couleurs apparaissent à cause de l'automodulation de phase, un processus optique non linéaire, et la lumière à la sortie de la fibre apparaît jaune-vert. Pour visualiser le phénomène, un réseau de diffraction est utilisé pour étaler, sur un écran attaché sur l'extérieur de la boîte, le spectre des couleurs produit par la fibre.

Afin de relier ce type de peigne de fréquences optiques au domaine hyperfréquence, il est nécessaire de faire des synthèses de fréquences à partir de signaux d'interrogation. Il est plus que jamais nécessaire de maîtriser les niveaux de bruits et de limiter les sources de bruits environnementales afin de garder les informations avec un bon niveau d'incertitude. Le domaine temps-fréquence est donc résolument tourné vers l'optique.

8 Conclusion

Dans cet article nous avons pu voir l'intérêt que représente l'utilisation de l'optique dans le développement de nouveaux moyens de mesures métrologiques. Il est désormais possible de disposer de bancs de mesures qui sont capables de mesurer le bruit de phase de n'importe quel oscillateur hyperfréquence, et ce, jusqu'à des fréquences très élevées, sans pour autant dégrader les performances de l'instrumentation de mesure de bruit de phase, avec pour seule limitation la possibilité de disposer de composants hyperfréquences adaptés à la fréquence de l'oscillateur à mesurer. On voit les potentialités importantes d'un tel type de banc. De plus, cela permettra de raccrocher les travaux menés dans le domaine hyperfréquence avec ceux des opticiens. C'est deux mondes jusqu'alors distants qui se rencontrent. Celui des métrologues du temps-fréquence plutôt à l'aise jusqu'au domaine hyperfréquence avec celui des opticiens moins habitués à maîtriser la métrologie temps-fréquence. Ces travaux sont par ailleurs essentiels en raison du développement des étalons de fréquences optiques pour le domaine temps-fréquence.

9 Remerciements

L'auteur de l'article tient à adresser tous ses remerciements à Enrico Rubiola, professeur à l'Université de Franche-Comté et très impliqué dans les recherches sur ce type de banc de mesures.

10 Références

[1] E. Rubiola, E. Salik, S. Huang, N. Yu, L. Maleki, « Photonic delay technique for phase noise measurement of microwave oscillators », J. Opt. Soc. Am. B 22, 987 (2005)

[2] X.S. Yao, L. Maleki, J. Opt. Soc. Am. B 13, 1725 (1996).

[3] P. Salzenstein, J. Cussey, X. Jouvenceau, H. Tavernier, L. Larger, E. Rubiola, G. Sauvage, « Realization of a Phase Noise Measurement Bench Using Cross Correlation and Double Optical Delay Line », Acta Physica Polonica A, Vol. 112, pp. 1107-1111 (2007)

[4] K. Volyanski, J. Cussey, H. Tavernier, P. Salzenstein, G. Sauvage, L. Larger, E. Rubiola, « Applications of the optical fiber to generation and measurement of low phase noise microwaves », 22nd European Frequency and Time Forum, Toulouse, France; 22-25 april (2008)

[5] H. Tavernier, N. Nguyen Thi Kim, P. Féron, R. Bendoula, P. Salzenstein, E. Rubiola, L. Larger, « Optical disk resonators with microwave free spectral range for optoelectronic oscillator», 22nd European Frequency and Time Forum, Toulouse, France; 22-25 april (2008)

Page

Article II - 30 - 21