

Correction de chirps en fréquence d'un laser pour le retournement temporel de signaux radiofréquences

Thomas Llauze, Anne Louchet-Chauvet
Institut Langevin, ESPCI Paris, Université PSL, CNRS, 75005 Paris, France

thomas.llauze@espci.fr - anne.louchet-chauvet@espci.fr

RESUME

Nous présentons une architecture analogique permettant le retournement temporel de signaux radiofréquences sur porteuse optique. Cette architecture s'appuie sur le phénomène d'écho de photon dans un cristal dopé aux ions thulium, excité par un laser agile en fréquence dont nous proposons une technique de contrôle des excursions en fréquence.

MOTS-CLEFS : *échos de photons ; retournement temporel ; laser agile ; ions de terre-rare*

1. Introduction

Le retournement temporel (RT) est une opération de traitement d'un signal qui permet la génération à partir d'une onde se propageant dans un milieu, d'une onde « retournée » qui est chronologiquement inversée. Il se base sur l'invariance de l'équation de propagation d'une onde dans un milieu inhomogène. Après avoir enregistré une onde émise en un point dans un milieu, le RT permet de la re-focaliser à son point d'origine après sa ré-émission. Le RT nécessite d'enregistrer la signature du canal de transmission en mesurant sa réponse à une impulsion. La réponse du milieu de propagation étant changeante au cours du temps, il est nécessaire de limiter le temps de latence entre la mesure du signal et sa ré-émission dans le milieu de propagation après son retournement. Le RT d'ondes radiofréquences réalisé par une méthode numérique est limité au niveau du temps de latence et de sa bande-passante (BP), deux paramètres clés et interdépendants dans les convertisseurs analogiques-numériques : augmenter la BP augmente le temps de latence et inversement.

Nous développons une solution purement analogique originale permettant de s'affranchir de cette étape de conversion numérique et donc limiter le temps de latence. Cette architecture s'appuie sur le phénomène d'écho de photon dans des cristaux dopés avec des ions de terre-rare refroidis à quelques kelvins. Ce phénomène nécessite une séquence d'excitation du milieu atomique par un laser agile en fréquence qui comprend 3 impulsions de formes temporelles/spectrales contrôlées avec notamment des balayages en fréquence du laser (ou *chirps*) [1].

Pour atteindre une BP supérieure à la centaine de MHz il est nécessaire d'avoir un laser capable de réaliser des *chirps* de l'ordre de 1 GHz / 5 μ s de manière consécutive et de signe opposé avec une faible erreur en fréquence. Nous présentons une nouvelle technique permettant de caractériser les *chirps* en fréquence du laser par une analyse de la phase instantanée du laser avec un interféromètre de Mach-Zehnder (MZI) déséquilibré et de les corriger par une pré-correction appliquée aux *chirps* et une correction itérative des *chirps* du laser.

2. Méthode de pré-correction des excursions en fréquence

Nous utilisons un laser DBR (*Distributed Bragg Reflector*) permettant de réaliser des *chirps* rapides grâce à la grande BP de modulation de son alimentation (10 MHz). La mesure de la phase instantanée du laser est réalisée par auto-hétérodynage en utilisant un MZI dont un bras comprend un décalage de fréquence de 80 MHz et un retard optique de 60 ns. Quand une commande en fréquence $U(t)$ est envoyée dans l'entrée de modulation du laser, celui-ci répond avec une excursion en fréquence très déformée (voir fig.1 (i) et (ii)). Cette erreur du laser provient du caractère non-instantané de la réponse du laser. Elle peut être décrite au premier ordre par une fonction de transfert. On peut alors exprimer la réponse comme $U(t)*R(t)$ où $R(t)$ est la réponse impulsionnelle du laser et $H(f) = F[R(t)]$ sa fonction de transfert où F désigne la transformée de Fourier.

Pour déterminer la fonction de transfert du laser, on mesure sa réponse à une modulation sinusoïdale de fréquence f_{mod} et d'amplitude connue à l'aide du MZI. Le laser étant supposé être un système linéaire, sa réponse en fréquence est une sinusoïde de même fréquence. On en déduit alors la fonction de transfert en amplitude et phase.

Les mesures de la fonction de transfert sont réalisées entre 20 kHz et 20 MHz. On construit alors la commande pré-correctée $\chi_0(t)$ définie comme : $\chi_0(t) = F^{-1}\left[\frac{F[U(t)]}{H(f)}\right]$.

On observe sur la courbe (iii) de la figure 1 la réponse à la pré-correction. Elle permet de compenser en partie l'effet de la fonction de transfert.

3. Méthode de correction itérative des excursions en fréquence

Bien que la pré-correction limite l'erreur du laser, celle-ci reste importante. Elle provient des non-linéarités du laser qui ne sont pas corrigées par la pré-correction. Pour la limiter, on procède ainsi : pour chaque itération on génère une commande $\chi_i(t)$ avec l'erreur et la commande de l'itération précédente, soit: $\chi_i(t) = \chi_{i-1}(t) + \alpha \varepsilon_{i-1}$ avec α le facteur correctif compris entre 0 et 2 et ε_{i-1} la différence mesurée entre la commande $\chi_{i-1}(t)$ et la réponse du laser à cette commande.

Après quelques itérations, l'erreur décroît pour atteindre une valeur minimale de l'ordre du MHz. La vitesse de convergence vers l'erreur minimale dépend de la valeur du facteur α .

4. Résultats et Conclusion

Nous testons notre méthode de correction pour une excursion triangulaire en fréquence de 1 GHz d'amplitude sur 5 μ s. L'erreur est réduite significativement par l'utilisation de la pré-correction des commandes de balayage en fréquence et la méthode de correction itérative. On mesure une erreur maximale sans correction de 250 MHz contre 50 MHz en appliquant la pré-correction à la commande en fréquence et seulement 1.8 MHz pour la correction itérative.

L'utilisation de ces deux techniques combinées permet dans le cas d'un balayage en fréquence rapide 1 GHz / 5 μ s d'obtenir une erreur de l'ordre du MHz. Cependant, seules les erreurs systématiques peuvent être corrigées par cette méthode. La correction des erreurs aléatoires nécessitera d'utiliser une boucle d'asservissement [2].

Cette technique, applicable à toute excursion en fréquence, sera prochainement utilisée pour la séquence de retournement temporel de signaux radiofréquence, afin de tenter d'atteindre une BP de l'ordre du GHz.

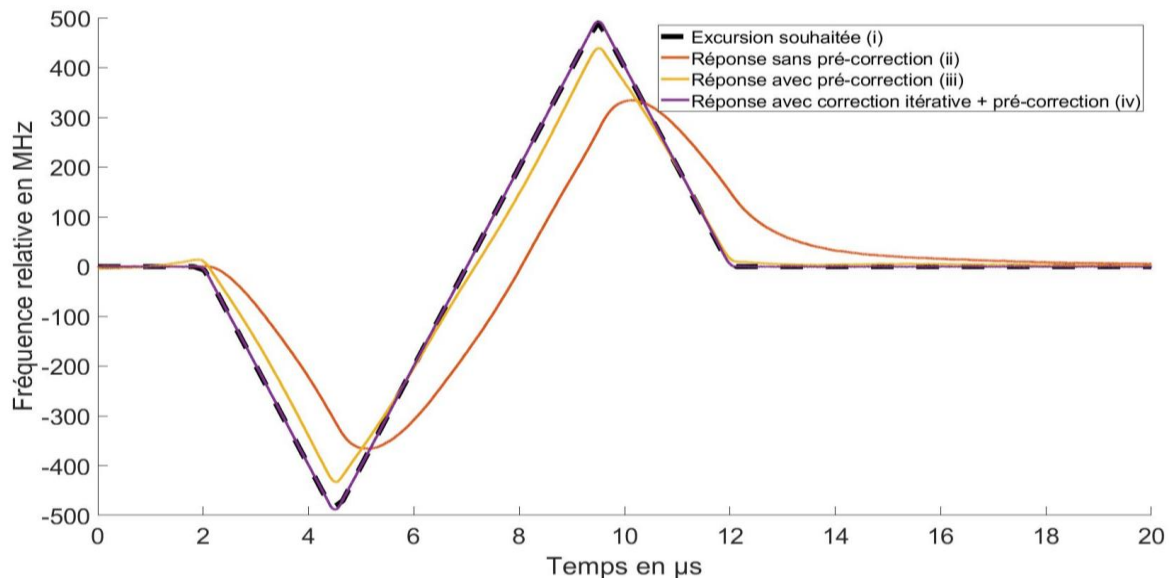


Figure 1. Comparaison de la réponse moyenne sur 10 mesures pour un balayage de 1 GHz avec et sans-précorrection puis avec correction itérative de 35 itérations ($\alpha = 0.15$) et pré-correction

Références :

- A. Louchet-Chauvet, Analog time-reversal of optically-carried RF signals with a rare earth ion-doped processor with broadband potential - *2018 International Topical Meeting on Microwave Photonics (2018)*.
- V. Crozatier, G. Gorju, F. Bretenaker, JL. Le Gouët, I. Lorgeré et al, Phase locking of a frequency agile laser - *Appl. Phys. Lett.* 89, 261115 (2006).