SPECTROSCOPIE DE FOURIER PAR PEIGNES DE FRÉQUENCES GÉNÉRÉS PAR UN LASER CONTINU

Stéphane Pitois¹, Philippe Morin¹, Gil Fanjoux², Nathalie Picqué³ et Guy Millot¹

¹ Laboratoire Interdisciplinaire Carnot de Bourgogne, UMR CNRS Université de Bourgogne 6303, 9 avenue Alain Savary, F-21078 DIJON, France

² Institut FEMTO-ST, UMR CNRS Université de Franche Comté 6174, UFR Sciences route de Gray, F-25030 BESANÇON, France

³ Max-Planck-Institut für Quantenoptik, Hans Kopfermann Str. 1, D-85748 GARCHING, Germany

Guy.Millot@u-bourgogne.fr

Résumé

Nous démontrons le principe de spectroscopie à deux peignes de fréquences générés à partir d'une seule source laser continue mono-fréquence modulée en intensité par deux modulateurs électro-optiques rapides délivrant des impulsions de 50 ps. Les impulsions sont élargies spectralement en exploitant le phénomène de « wave breaking » dans une fibre optique non linéaire à forte dispersion normale. Les spectres des deux peignes sont remarquablement plats. Notre dispositif s'affranchit de techniques complexes d'asservissement des peignes. La sensibilité du spectromètre est augmentée par l'utilisation d'une fibre creuse à cristal photonique de 48 m de long. Le dispositif compact et entièrement fibré est testé pour mesurer les raies d'absorption du dioxyde de carbone dans la région de 1570 nm. Le spectromètre tire profit des équipements télécoms disponibles commercialement.

MOTS-CLEFS : *spectroscopie par transformée de Fourier ; peignes de fréquences ; fibre à cristal photonique ; dioxyde de carbone.*

1. INTRODUCTION

La spectroscopie de Fourier basée sur l'emploi de deux peignes de fréquences [1-6] est une technique en plein développement, ouvrant de nouvelles perspectives en physique atomique et moléculaire: gain de six ordres de grandeur en terme de temps d'acquisition, sensibilité, résolution et étalonnage absolu des fréquences [5,6], spectroscopie linéaire et non-linéaire. La méthode, statique, ne fait plus usage de l'interféromètre de Michelson à balayage. Elle détecte les interférences dans le domaine temporel entre deux peignes avec des fréquences de répétition légèrement différentes. Jusqu'à présent, des oscillateurs femtosecondes ont été utilisés pour générer les peignes de fréquences. La nécessité de synchroniser, avec une précision interférométrique, les formes d'ondes émises par les deux lasers requiert des techniques expérimentales avancées de métrologie des fréquences et limite son potentiel d'application. Dans cette contribution, nous introduisons une nouvelle méthode de spectroscopie par peignes de fréquences. Les deux peignes de fréquences sont générés à partir d'un même laser mono-fréquence continu, évitant ainsi tout besoin d'asservissement. D'autre part la sensibilité du spectromètre est augmentée par l'utilisation d'une fibre creuse à cristal photonique [7] remplie de gaz permettant d'obtenir facilement de grands parcours d'absorption sans cuve à réflexions multiples. Notre spectromètre à transformée de Fourier à deux peignes de fréquences tout fibré et ultra-compact est testé pour la mesure des raies d'absorption du dioxyde de carbone au voisinage de 1570 nm.

2. MÉTHODE ET DISPOSITIF EXPÉRIMENTAL

La spectroscopie à deux peignes de fréquences consiste à faire battre les deux peignes -dont la différence de taux de répétition est bien choisie- sur un détecteur rapide. Les battements entre couples de raies adjacentes, une de chaque peigne, génèrent un peigne radiofréquence, plus facile à

analyser par les techniques rapides de traitement de signaux digitaux. Dans le domaine temporel, les impulsions d'un des peignes échantillonnent périodiquement (Fig.3) les impulsions du second peigne et le cas échéant la réponse transitoire, ou décroissance d'induction libre, du milieu absorbant, de façon semblable à un oscilloscope à échantillonnage optique.



Fig. 1 : Dispositif expérimental.



Fig. 2 : Spectres des impulsions avant et après élargissement dans la fibre DCF (échelle d'intensité logarithmique).

Notre objectif ici est de générer les deux peignes de fréquences à partir d'une seule source laser émettant une onde continue aux longueurs d'ondes télécom. Le schéma du dispositif expérimental est représenté sur la figure 1. Une diode laser émettant au voisinage de 1570 nm est modulée en intensité par deux modulateurs électro-optiques pilotés par des horloges électriques ultra-stables. Les peignes résultants sont ensuite amplifiés par deux amplificateurs à fibre dopée Erbium (EDFA). Des contrôleurs de polarisation (non représentés sur le schéma) permettent un alignement des directions de polarisation des peignes avant leur combinaison dans un coupleur fibré 2:1. Les caractéristiques des peignes ainsi obtenus sont les suivantes : taux de répétition de 300 MHz, impulsions super-gaussiennes de 50 ps, différence des taux de répétition Δf_{rep} =100 kHz, longueur d'onde centrale au voisinage de 1570 nm permettant l'emploi de matériels télécom, puissance maximale de 30 dBm. L'originalité du montage est de s'affranchir de toute technique complexe d'asservissement des deux peignes. En effet l'emploi d'une seule source laser continue confère automatiquement aux deux peignes la même fréquence porteuse. Par ailleurs la modulation de l'onde porteuse par des modulateurs pilotés par des horloges électriques ultrastables (précision absolue de 1 Hz) et l'usage d'une diode laser de grande pureté spectrale (de l'ordre de quelques kHz) permettent de contrôler avec précision la différence des taux de répétition des deux peignes. Afin d'assurer un fonctionnement du spectromètre sur une gamme spectrale de plusieurs nanomètres, les spectres des deux peignes sont élargis par « wave breaking » dans une fibre optique non linéaire à forte dispersion normale (D=-89 ps/nm/km) de 1.378 km (DCF) [8]. Le spectre des impulsions obtenu à la sortie de la DCF pour une puissance d'entrée de 21 dBm est représenté sur la figure 2 en comparaison avec le spectre initial. Notons la forme remarquable rectangulaire du spectre avec un plateau caractéristique d'un régime de « wave breaking ». Les oscillations du spectre initial sont caractéristiques quant à elles d'impulsions de forme super-gaussienne ainsi que celle représentée dans l'insert de la figure 2. Nous avons vérifié l'absence d'effet Brillouin durant la phase d'élargissement spectral. Notons que des spectres plus larges peuvent être obtenus en augmentant la puissance initiale.

Une grande longueur d'absorption est obtenue en injectant le gaz de dioxyde de carbone dans une fibre à cristal photonique creuse de 48 m de long (NKT Photonics HC 1550-02). Un filtre optique permet de conserver que la partie positive du spectre et de s'affranchir du phénomène de repliement spectral [5,6]. L'acquisition des interférogrammes est réalisée à l'aide d'une photodiode rapide et d'un oscilloscope de grande dynamique (Picoscope 5000, 16 bits). La figure 3 montre un exemple d'interférogramme obtenu à la sortie de la fibre creuse pour une pression de dioxyde de carbone de 1020 mbars. La figure 4 montre le spectre obtenu, à partir de ce type d'interférogramme, pour un temps de mesure de 5 ms. Le spectre met clairement en évidence les raies d'absorption R28 et R30 de la bande 30012–00001. Par comparaison le spectre du dessous est obtenu à l'entrée de la fibre creuse.



Fig. 3 : Exemple d'interférogramme obtenu à la sortie de la fibre creuse PCF remplie de CO_2 .



Fig. 4 : Exemple de spectres calculés à partir d'interférogrammes observés, tel que celui de la figure 3 (échelle d'intensité logarithmique). L'abscisse est l'écart de fréquence par rapport à la fréquence de la diode laser.

CONCLUSION

Nous avons développé un spectromètre à transformée de Fourier à deux peignes de fréquences générés à partir d'une seule source laser continue modulée en intensité par deux modulateurs électro-optiques. Nous avons optimisé le spectromètre aux longueurs d'ondes des télécommunications, profitant ainsi des équipements télécoms optoélectroniques et de notre savoir faire sur l'exploitation des effets non linéaires dans les fibres optiques. Une grande longueur d'absorption a été obtenue en injectant le gaz dans une fibre à cristal photonique creuse de 48 m de long. Le dispositif tout fibré a été testé en mesurant les raies d'absorption du dioxyde de carbone au voisinage de 1570 nm. De plus amples mesures seront présentées durant le colloque. Nous pensons que la sensibilité du spectromètre sera suffisante pour effectuer une mesure précise du rapport isotopique ¹³C/¹²C dans le dioxyde de carbone, ouvrant ainsi la voie à des applications médicales telle que la détection de la bactérie Helicobacter pylori présente dans l'air expiré chez les patients atteints de certaines affections chroniques de l'estomac.

Références

- [1] S. Schiller, "Spectrometry with frequency combs," Opt. Lett., vol. 27, no. 9, p. 766, 2002.
- [2] F. Keilmann, C. Gohle and R. Holzwarth "Time-domain mid-infrared frequency-comb spectrometer," *Opt. Lett.*, vol. 29, no. 13, p. 1542, 2004.
- [3] A. Schliesser, M. Brehm, F. Keilmann and D.W. van der Weide "Frequency-comb infrared spectrometer for rapid, remote chemical sensing," *Opt. Express*, vol. 13, no. 22, p. 9029, 2005.
- [4] I. Coddington, W.C. Swann and N.R. Newbury "Coherent multiheterodyne spectroscopy using stabilized optical frequency combs," *Phys. Rev. Lett.*, vol. 100, article n° 013902, 2008.
- [5] B. Bernhardt, A. Ozawa, P. Jacquet, M. Jacquey, Y. Kobayashi, T. Udem, R. Holzwarth, G. Guelachvili, Th.W. Hänsch and N. Picqué "Cavity-enhanced dual-comb spectroscopy," *Nat. Photon.*, vol. 4, p. 55, 2010.
- [6] T. Ideguchi, A. Poisson, G. Guelachvili, N. Picqué and Th.W. Hänsch "Adaptive real-time dual-comb spectroscopy," *Nat. Comm.*, vol. 5, article n° 3375, 2014.
- [7] F. Benabid, J.C. Knight, G. Antonopoulos and P.St.J. Russell "Stimulated Raman scattering in Hydrogen-filled hollow-core photonic crystal fiber," *Science*, vol. 298, article n° 5592, p. 399, 2002.
- [8] C. Finot, B. Kibler, L. Provost and S. Wabnitz, "Beneficial impact of wave-breaking for coherent continuum formation in normally dispersive nonlinear fibers," *J. Opt. Soc. Am. B.*, vol. 25, no. 11, p. 1938, 2008.