



JCOM 2022
FEMTO-ST-ENSMM
Besançon
13 juin 2022



Réduction des déplacements lumineux dans une horloge à microcellule par méthodes d'interrogation impulsionnelles avancées

Clément Carlé, Moustafa Abdel Hafiz, Nicolas Passilly, Jean-Marie Danet, Claudio Calosso, Rodolphe Boudot
FEMTO-ST, CNRS, UBFC, ENSMM, Besançon, France
SYRLINKS, Cesson-Sévigné, France
INRIM, Strada delle Cacce 91, Turin, Italie

Les micro-horloges atomiques basées sur le phénomène de piégeage cohérent de population (CPT) reposent sur l'interaction d'atomes alcalins confinés dans une cellule micro-fabriquée avec un signal micro-onde porté optiquement. Ces horloges connaissent un large succès en raison de leur budget volume-consommation-stabilité sans égal [1] et sont aujourd'hui largement utilisées dans une multitude d'applications incluant la sécurisation des communications numériques ou les systèmes de navigation et positionnement.

Malgré ces performances remarquables, la stabilité de fréquence moyen et long-terme de ces horloges est dégradée par deux contributions majeures : les phénomènes de déplacement lumineux, soit la sensibilité de la fréquence d'horloge aux variations du champ laser d'interrogation (puissance, fréquence, indice de modulation), et une possible évolution de l'atmosphère interne de la microcellule. L'étude présentée ici traite les problèmes de déplacement lumineux.

Afin de réduire la contribution des déplacements lumineux, nous démontrons dans cette étude l'implémentation de protocoles d'interrogation impulsionnels avancés. En premier lieu, nous avons exploré la technique de spectroscopie Ramsey-CPT [2]. Dans cette dernière, les atomes interagissent avec une séquence d'impulsions optiques CPT, conduisant à la détection de franges d'interférence, dite franges Ramsey-CPT, dont la largeur est inversement proportionnelle à la durée du temps d'évolution libre « dans le noir » T expérimenté par les atomes entre deux impulsions optiques consécutives. La spectroscopie Ramsey, largement utilisée dans les horloges atomiques de laboratoire (fontaines atomiques, horloges optiques, etc.), permet de réduire, au cours d'un cycle d'horloge, le temps d'interaction des atomes avec le champ lumineux, atténuant par ce biais l'impact des déplacements lumineux.

Malgré cette sensibilité réduite, la spectroscopie Ramsey souffre d'une sensibilité résiduelle non-négligeable aux déplacements lumineux induits lors des impulsions optiques. Inspirés de travaux précédents [3,4], nous avons démontré récemment au sein d'une horloge à microcellule l'implémentation d'une séquence d'interrogation composite, nommée Symmetric Auto-Balanced Ramsey (SABR) [4]. Le concept fondateur de la spectroscopie ABR consiste à compenser le biais de phase ϕ_b subi par les atomes lors de l'interaction atomes-champ en appliquant, durant le temps noir T , une correction de phase ϕ_c au champ d'interrogation. Pour quantifier la correction de phase ϕ_c à appliquer, l'idée est de produire deux séquences de Ramsey consécutives, de temps noir différents, notés T_L (temps noir long) et T_S (temps noir court). Deux boucles d'asservissement sont alors gérées et permettent d'asservir la fréquence de l'oscillateur local sur une fréquence non-déplacée.

Le dispositif expérimental est le suivant. Une diode laser VCSEL à 895 nm est modulée à 4.596 GHz à l'aide d'une synthèse de fréquence microonde afin de créer deux bandes latérales optiques du premier ordre séparées de 9.192 GHz. Un AOM est ici utilisé pour générer la séquence d'impulsions optiques. Le faisceau est ultimement transmis dans une microcellule Cs, contenant une pression de Néon comme gaz tampon et chauffée à 70°C. La puissance laser transmise à travers la cellule est détectée par une photodiode. Le contrôle de l'horloge est assuré par une plateforme FPGA, faisant l'acquisition du signal de photodiode, et assurant d'une part la stabilisation de fréquence laser et d'autre part la stabilisation de fréquence du signal microonde, via une synthèse DDS (Direct Digital Synthesizer). La durée des impulsions optiques est de 150 μ s. Le temps noir court T_S est 100 μ s, le

temps noir long T_L est 250 μ s. Les signaux d'erreur, extraits des séquences Ramsey consécutives, sont alors habilement exploités pour compenser les déplacements lumineux.

La figure 1 montre les résultats obtenus pour la sensibilité de la fréquence d'horloge aux variations de puissance laser, pour différents modes d'interrogation.

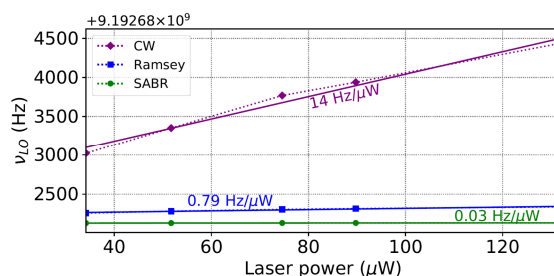


Figure 1. Sensibilité de la fréquence d'horloge à la puissance laser pour les régimes continu, Ramsey-CPT et SABR-CPT.

Cette dernière passe de 14 Hz/ μ W en mode continu à 0.03 Hz/ μ W en mode SABR, soit une réduction de sensibilité par un facteur 466. Nous avons aussi mesuré que la technique SABR réduit la sensibilité à la puissance microonde par un facteur 135. Des résultats comparables sont obtenus pour la sensibilité aux variations de fréquence laser [5]. Ces résultats confirment le bénéfice du protocole d'interrogation impulsionnel SABR pour tacler les déplacements lumineux au sein d'horloges atomiques à microcellule. Nous observons par ailleurs que la technique SABR améliore significativement la déviation d'Allan de l'horloge pour des temps d'intégration compris entre 100 et 10⁵ s. Des études additionnelles, axées sur l'amélioration de la stabilité de l'atmosphère interne de la cellule, sont actuellement menées. Les derniers résultats seront présentés à la journée JCOM22.

Références :

- [1] J. Kitching, "Chip-scale atomic devices", Appl. Phys. Rev., vol. 5, 031302, 2018.
- [2] C. Carlé, M. Petersen, N. Passilly, E. de Clercq, M. Abdel Hafiz and R. Boudot, Exploring the use of Ramsey-CPT spectroscopy for a microcell-based atomic clock, IEEE Transactions on Ultrasonics Ferroelectrics and Frequency Control 68, 10, 3249-3256 (2021). [10.1109/TUFFC.2021.3085249](https://doi.org/10.1109/TUFFC.2021.3085249)
- [3] C. Sanner: "Auto-balanced Ramsey spectroscopy", Phys. Rev. Lett., vol. 120, 053602, 2018.
- [4] M. Abdel Hafiz et al. "Symmetric auto-balanced Ramsey interrogation for high-performance coherent-population-trapping vapor-cell atomic clock", Appl. Phys. Lett., vol. 112, 244102, 2018.
- [5] M. Abdel Hafiz et al., "Light-shift mitigation in a microcell-based atomic clock with symmetric auto-balanced Ramsey spectroscopy", Appl. Phys. Lett., vol. 120, 044101, 2022.