

Horloge CPT à double modulation

Double modulation CPT clock

Porteur(s) : S. Guérandel (SYRTE)

Partenaire(s) : R. Boudot (FEMTO-ST)

Résumé du projet en Français :

Les références de fréquence sont les éléments indispensables au cœur de dispositifs civils et militaires toujours plus nombreux et toujours plus exigeants en termes de performances ou de miniaturisation. Elles peuvent être utilisées pour fournir une fréquence de référence, mais aussi comme horloges pour la synchronisation et la datation. Ces références sont naturellement nécessaires dans les systèmes de communication où le taux de transmission et réception des signaux est gouverné par une horloge dont la stabilité et l'exactitude déterminent l'efficacité et la capacité du canal. Elles sont ainsi utilisées dans les réseaux de communications numériques, les réseaux bancaires, les réseaux d'alimentation électriques, les téléphones cellulaires, etc. La navigation, depuis le 17^{ème} siècle jusqu'aux systèmes de navigation par satellites d'aujourd'hui et demain, comme GPS (Etats-Unis), GLONASS (Russie), Beidou (Chine) ou Galileo (Union Européenne), a été toujours plus exigeante en matière de qualités d'horloges.

Il est donc nécessaire de développer une grande variété d'horloges et de systèmes de dissémination du temps ou d'une fréquence stable pour le vaste domaine d'applications qui en ont besoin. Chaque application a ses exigences métrologiques (stabilité, exactitude, bruit de phase) mais aussi d'encombrement, de consommation, de résistance aux vibrations, de durée de vie ou de coût, etc...

Ce projet vise à permettre une nouvelle génération d'horloges compactes embarquables de très hautes performances amenée à succéder aux horloges atomiques actuelles à cellule de vapeur. L'objectif est de développer et caractériser une horloge atomique CPT à double modulation exploitant le piégeage cohérent de population en configuration push-pull sur vapeur de césium. Un premier modulateur électro-optique d'intensité type Mach-Zehnder est utilisé pour générer des bandes latérales séparées de 9.2 GHz sans porteuse. Un second modulateur d'amplitude placé en série est utilisé pour alterner la polarisation laser afin d'optimiser le pompage et l'interrogation atomique. Il s'agit d'aboutir à une horloge ayant une stabilité de fréquence similaire aux meilleures horloges compactes de laboratoire actuelles, avec une possibilité d'intégration dans un banc laser guidé ou fibré compatible avec les technologies miniatures.

Abstract in English:

Frequency references are the essential elements at the heart of ever-increasing numbers of civil and military devices, which are increasingly demanding in terms of performance and miniaturisation. They can be used to provide a reference frequency, but also as clocks for synchronization and dating. These references are of course necessary in communication systems where the rate of signal transmission and reception is governed by a clock whose stability and accuracy determine the channel's efficiency and capacity. They are thus used in digital communications networks, banking networks, power supply networks, cellular phones, etc. Navigation, from the 17th century to today's and tomorrow's satellite navigation systems, such as GPS (USA), GLONASS (Russia), Beidou (China) or Galileo (European Union), has been increasingly demanding in terms of clock quality.

It is therefore necessary to develop a wide variety of clocks and time dissemination systems or stable frequency for the wide range of applications that need them. Each application has its own metrological requirements (stability, accuracy, phase noise) but also dimensions, consumption, vibration resistance, life or cost, etc...

This project aims to enable a new generation of compact, very high-performance embedded compact clocks to succeed the current atomic clocks with steam cells. The objective is to develop and characterize a CPT dual-modulation atomic clock exploiting the coherent population trapping in push-pull configuration on cesium vapour. A first Mach-Zehnder type electro-optical intensity modulator is used to generate separate 9.2 GHz lateral bands without carrier. A second amplitude modulator in series is used to alternate the laser polarization to optimize pumping and atomic interrogation. The aim is to achieve a clock with frequency stability similar to the best laboratory compact clocks available today, with the possibility of integration into a guided or fiber laser bench compatible with miniature technologies.

Résultats marquants :

Un prototype d'horloge atomique à cellule de vapeur a été développé sur la base d'une technique d'interrogation continue et de double modulation par piégeage cohérent de population (DM-CPT). La technique DM-CPT utilise une modulation synchrone de polarisation et la phase relative d'un faisceau laser bi-chromatique pour augmenter le nombre d'atomes piégés dans un état noir. La résonance étroite, observée en transmission d'une cellule de vapeur de Cs, est utilisée comme discriminateur de fréquence dans une horloge atomique. Une stabilité relative de fréquence à court terme de $3,2 \cdot 10^{-13} \tau^{-1/2}$ a été mesurée jusqu'à 100 s d'intégration. Cette performance est supérieure de plus d'un ordre de grandeur à celle des horloges Rb industrielles, et comparable à celle des meilleures horloges à cellule de vapeur de laboratoire. Ces résultats démontrent que la technique DM-CPT est bien adaptée au développement d'une horloge atomique de haute performance, avec l'avantage d'un dispositif compact robuste grâce à son architecture linéaire. Cette horloge pourrait trouver des applications futures dans l'industrie, les télécommunications, l'instrumentation ou les systèmes mondiaux de navigation par satellite.

Highlights:

A vapor-cell atomic clock prototype has been developed based on a continuous-wave interrogation and double-modulation coherent population trapping (DM-CPT) technique. The DM-CPT technique uses a synchronous modulation of polarization and the relative phase of a bichromatic laser beam in order to increase the number of atoms trapped in a dark state. The narrow resonance, observed in the transmission of a Cs vapor cell, is used as a narrow frequency discriminator in an atomic clock. A short-term fractional-frequency stability of $3.2 \cdot 10^{-13} \tau^{-1/2}$ up to a 100 s averaging time is measured. This performance is more than one order of magnitude better than industrial Rb clocks and are comparable to those of the best laboratory-prototype vapor-cell clocks. These results demonstrate that the DM-CPT technique is well suited for the development of a high-performance atomic clock, with the potential compact and robust setup due to its linear architecture. This clock could find future applications in industry, telecommunications, instrumentation, or global navigation satellite systems.

Publications and communications linked with the funded project:

Peer-reviewed articles:

- High-performance coherent population trapping clock with polarization modulation
P. Yun, F. Tricot, C. Calosso, S. Micalizio, B. François, R. Boudot, S. Guerandel, E. de Clercq
Phys. Rev. Appl., 7, 014018 (2017)
<https://dx.doi.org/10.1103/PhysRevApplied.7.014018>
- Coherent population trapping with polarization modulation
P. Yun, S. Guérandel, E. De Clercq,
Journal of Applied Physics 119, 244502 (2016)
<https://dx.doi.org/10.1063/1.4954690>
- Double-modulation CPT cesium compact clock
P. Yun, S. Mejri, F. Tricot, M. A. Hafiz, R. Boudot, E. de Clercq, S. Guerandel
Journal of Physics: Conference Series 723 (2016) 012012
<https://dx.doi.org/10.1088/1742-6596/723/1/012012>
- Constructive polarization modulation for coherent population trapping clock
P. Yun, J-M Danet, D. Holleville, E. de Clercq, and S. Guerandel
Applied Physics Letters, Vol 105, 231106 (2014)
<https://dx.doi.org/10.1063/1.4903862>

Oral communications:

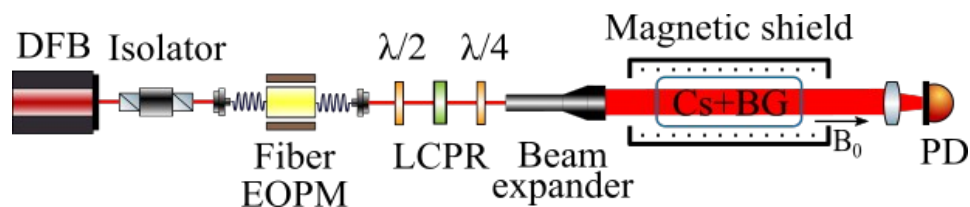
- Latest results of a double-modulation coherent population trapping clock
P. Yun, F. Tricot, D. Holleville, E. de Clercq, S. Guerandel
6th ESA International Galileo Science Colloquium (Valencia, Spain, 2017)
- Towards miniaturization of a high performance coherent population trapping clock
P. Yun, F. Tricot, C. E. Calosso, S. Micalizio, M. Abdel Hafiz, R. Boudot, E. de Clercq, S. Guerandel
IEEE International Frequency Control Symposium jointly with the European Time and Frequency Forum, (Besançon, France, 2017)
<https://doi.org/10.1109/FCS.2017.8088835>

- Double-modulation coherent population trapping clock
P. Yun, F. Tricot, E. de Clercq, S. Guerandel
11th International Conference on Space Optics (Biarritz, France, 2016)
- Progress toward a compact high performance coherent population trapping clock
P. Yun, F. Tricot, D. Holleville, E. de Clercq, S. Guerandel
IEEE International Frequency Control Symposium (New-Orleans, Louisiana USA, 2016)
<https://dx.doi.org/10.1109/FCS.2016.7563574>
- A compact setup for double-modulation coherent population trapping clock
P. Yun, F. Tricot, D. Holleville, E. de Clercq, S. Guerandel
30th European Time and Frequency Forum, (York, UK, 2016)
<https://dx.doi.org/10.1109/EFTF.2016.7477823>
- High stability double-modulation CPT Cs compact clock
P. Yun, S. Mejri, F. Tricot, E. De Clercq, S. Guerandel
5th ESA International Galileo Science Colloquium (Braunschweig, Germany, 2015)
- Study on double-modulation coherent population trapping resonance
P. Yun, S. Mejri, F. Tricot, D. Holleville, E. De Clercq, S. Guerandel
2015 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium & the European Frequency and Time Forum (Denver, Colorado USA, 2015)
<https://dx.doi.org/10.1109/FCS.2015.7138961>
- Compact clocks for industrial applications: The EMRP project IND 55 MClOCKs
S. Micalizio, F. Levi, A. Godone, C. E. Calosso, B. François, S. Guérandel, D. Holleville, E. De Clercq, L. De Sarlo, P. Yun, J. M. Danet, M. Langlois, R. Boudot, M A. Hafiz, E. Sahin, C. Affolderbach, S. Kang, F. Gruet, M. Gharavipour, G. Mileti, B. Desruelle
2015 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium & the European Frequency and Time Forum (Denver, Colorado USA, 2015)
<https://dx.doi.org/10.1109/FCS.2015.7138881>

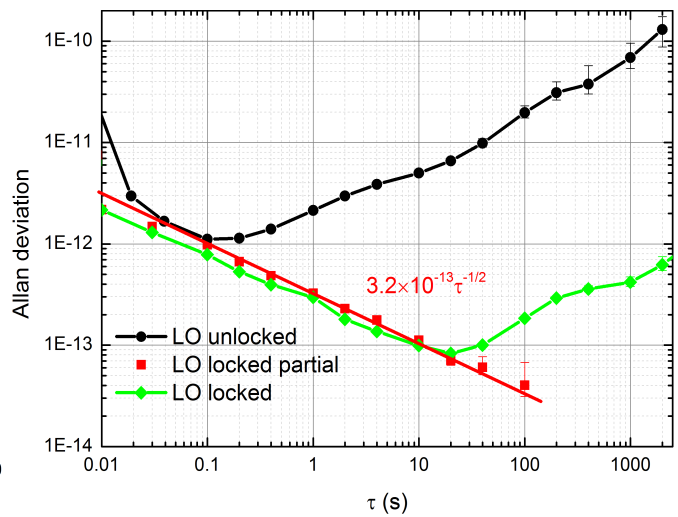
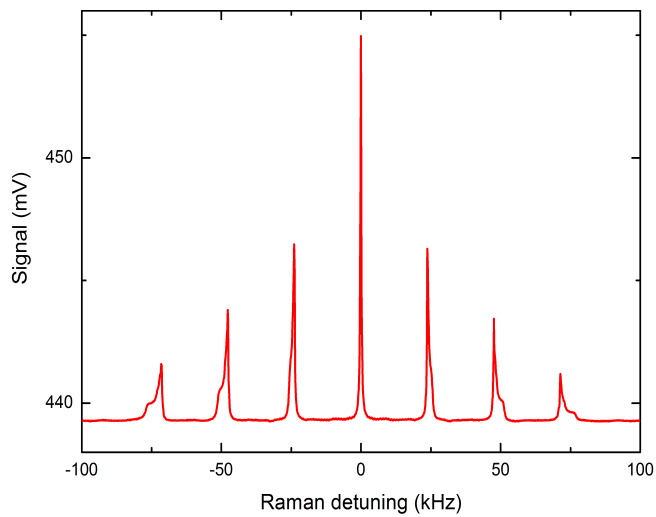
Invited talks:

- High performance compact atomic clock based on coherent population trapping
S. Guerandel, J-M Danet, P. Yun, E. de Clercq
IEEE International Frequency Control Symposium (Taipei, Taiwan, 2014)
<https://dx.doi.org/10.1109/FCS.2014.6859919>

Pictures with captions (curve, photo, scheme ...):



Sketch of the DM-CPT clock experiment



Left: Zeeman spectrum of the ground state CPT resonances in caesium. Note the high contrast of the clock central line.

Right: Allan deviation of the DM-CPT clock frequency measured against a H-maser reference frequency.