

## Multiplicateur d'impulsions Mach-Zehnder pour la génération optique de micro-ondes bas bruit

### Advanced Mach-Zehnder pulse multiplier for ultra-low noise photonic microwave generation

**Porteur(s) :** Y. Le Coq (SYRTE)

**Partenaire(s) :** G. Santarelli (LP2N)

#### Résumé du projet en Français :

Les sources micro-ondes à très bas bruit de phase autour de 10 GHz sont importantes aussi bien en recherche fondamentale, en l'astronomie, défense et sécurité (radar, etc.).

Différentes méthodes existent aujourd'hui pour générer ces signaux très purs. On citera tout particulièrement les oscillateurs micro-ondes à résonateur saphir à très forte surtension, les oscillateurs optoélectroniques et l'approche toute optique avec laser femtosecondes et cavités optiques ultra-stables. Les deux premières techniques font appel à un concept assez classique d'oscillateur basé sur un amplificateur et un résonateur avec un grand facteur de qualité. L'approche photonique est basée sur la division par un grand facteur de la fréquence d'un laser continu stabilisé sur une cavité de grande finesse. Cette division (facteur  $\sim 20000$ ) est réalisée à l'aide par peigne de fréquences femtoseconde, outils qui s'est imposé dans la communauté de la métrologie temps&fréquence comme le moyen le plus performant pour relier le domaine optique aux fréquences micro-ondes. Cette voie très innovante permet de générer des signaux avec un bruit de phase exceptionnellement bas à la fois loin et proche de la porteuse. Un point essentiel de cette méthode est la détection de trains haute cadence (4GHz) d'impulsions optiques courtes et intenses pour générer un signal micro-onde puissant ( $> 0$  dBm @ 12GHz). Le principe est assez simple il s'agit de séparer un train d'impulsions en deux parties et recombinaison ensuite avec un retard différentiel équivalent à la moitié de la période, le nouveau ainsi obtenu est à fréquence double. Avec plusieurs étages cascades il est ainsi possible atteindre un taux de répétition de 4 GHz. À cette cadence la photodiode de détection est moins saturée et délivre un signal micro-ondes plus important.

Les lasers femtosecondes basés sur une technologie fibrée à 1550nm sont désormais très fiables et des grands progrès vers la maîtrise de la consommation et du volume pour des applications embarquées ont été effectués. La réduction de volume et la fiabilisation des systèmes laser stabilisés sur cavité Fabry-Perot haute finesse ont été poussés par les projets spatiaux en physique fondamentale. Ces avancées ouvrent des perspectives intéressantes pour des systèmes phoniques de génération micro-onde bas bruit.

#### Abstract in English:

Optical frequency combs, in the past decade, have rapidly transformed from a laboratory tool in metrology and university laboratories to a commercial product that fills a growing demand from both industrial and military applications. A very prominent application of frequency combs is the generation of microwave radiation with unprecedented purity, by transferring the extremely low phase noise of optical frequency references to the microwave domain by optical frequency division. This produces signals with record low close-to-carrier phase noise unmatched by conventional microwave generation technology.

The principle of low-noise microwave generation with optical frequency combs is that of a frequency divider, where the phase noise of a state of the art optical cw reference is down-converted to the microwave domain with the corresponding decrease in phase noise. From a 194 THz cw laser to a 10 GHz microwave signal, the  $\sim 20,000$  frequency division ratio leads to a theoretical  $\sim 86$  dB phase noise reduction. A modern high quality Fabry-Perot stabilized laser exhibits flicker frequency noise limited frequency instability at or below  $1 \times 10^{-15}$ . The corresponding optical phase noise ( $S_{\phi}(f) \sim -(16 + 60 \times \log(f))$  dBc/Hz, where  $f$  is the Fourier frequency) may ultimately result in a 12 GHz microwave signal whose phase noise can be as low as  $-(102 + 20 \times \log(f))$  dBc/Hz after division. Of course, the frequency obtained with an optical frequency comb is corrupted by various sources of noise, thereby limiting the quality of the extracted microwave signal.

In practice, the frequency division process can be realized by phase locking a self-referenced optical frequency comb to an ultra-stable optical reference. The repetition rate of the femtosecond laser is servo-looped so as to maintain a constant frequency offset between the cw optical reference frequency  $f_{cw}$  and the nearest comb line

with optical frequency  $f_{\text{ceo}} + N \times f_{\text{rep}}$  (with  $N$  a large integer). The microwave signal is typically extracted by direct photodetection of the femtosecond laser pulse-train with a fast photodiode followed by band pass filtering of the harmonic of interest.

The principal challenges of the project are the extremely low phase noise requirements, both close to the carrier (1 Hz) and at high Fourier frequencies (i.e. 10 kHz)- never demonstrated before with any technology - as well as the desire to pave the way to a device perfectly suited for integration in future-generation RADAR devices, boosting visibility, range, and resolution. In the context of fundamental research, we expect our low phase noise devices to advance the performance of Very Long Baseline Interferometry (VLBI) techniques in Radio Astronomy by increasing the resolution and acquisition speed of these instruments. Beside the scientific and technical aspects the development of such device by an European team where the French contribution is far from being negligible and will increase the visibility and prestige of the T&F national community.

#### Résultats marquants :

Le soutien FIRST-TF a permis le développement de multiplicateurs de cadence optique par interféromètre Mach-Zehnder fibrés et en espace libre. Les équipes du SYRTE et du LP2N et leur partenaires industriels (MenloSystem, Discovery Semiconductors) ont démontré un synthétiseur optique de fréquences micro-ondes avec un bruit de phase à l'état de l'art de  $-106\text{dBc/Hz}@1\text{Hz}$  ( $-173\text{dBc/Hz}@10\text{kHz}$ ) pour une porteuse à 12GHz. Ce signal a le plus bas bruit de phase jamais obtenu (voir référence 4).

#### Highlights:

The devices that were produced in this study funded in part by FIRST-TF have been used in a research effort involving a team at SYRTE and at LP2N as well as other industrial partners (MenloSystems GmbH, Discovery Semiconductor), aiming at producing ultra-low phase noise microwave signals with optical frequency combs. This effort has produced the lowest microwave phase noise ever reported ( $-106\text{dBc/Hz}@1\text{Hz}$  and  $-173\text{dBc/Hz}@10\text{kHz}$ ) for a microwave carrier at 12GHz, see ref [4].

#### Publications and communications linked with the funded project:

- [1] R. Bouchand et al., "Compact Low-Noise Photonic Microwave Generation From Commercial Low-Noise Lasers," IEEE Phot. Tech. Lett., 29, 1403-1406, (2017)
- [2] R. Bouchand, D. Nicolodi, X. Xie, C. Alexandre, and Y Le Coq, "Accurate control of optoelectronic amplitude to phase noise conversion in photodetection of ultra-fast optical pulses," Opt. Express 25, 12268-12281 (2017)
- [3] X. Xie, R. Bouchand, D. Nicolodi, M. Lours, C. Alexandre, and Y. Le Coq, "Phase noise characterization of sub-hertz linewidth lasers via digital cross correlation," Opt. Lett. 42, 1217-1220 (2017)
- [4] X. Xie, et al., "Photonic microwave signals with zeptosecond-level absolute timing noise," Nat. Photonics 11, 44-47 (2017).

#### Invited talks:

- [1] Y. Le Coq, et al. "Ultra-low phase noise microwave signal from an optical frequency comb." CLEO Pacific Rim. Singapore. 2017.
- [2] Y. Le Coq et al, "Opto-electronic generation of microwave signals with zeptosecond level absolute timing noise and characterization." URSI GASS. Montreal, Canada. 2017.
- [3] Le Coq Yann. "Peignes de fréquences optiques pour génération micro-onde à très bas bruit de phase". Journées du Club Optique Micro-onde (JCOM) 2016. Nice. 2016.
- [4] G. Santarelli "Optical Frequency Combs for Ultra-low Phase-Noise Microwave Signal Generation", ITQW, Wien, 2015.
- [5] Y. Coq Yann, "Novel techniques for low noise microwave generation with optical frequency combs". Physics of Quantum Engineering 2014. Snowbird, Utah, USA.2014.
- [6] Y. Le Coq et al. "Optical frequency combs and optical frequency measurements". International Workshop on Optical Frequency Combs 2014.Toulouse. 2014.
- [7] Y. Le Coq Yann et al, "Novel techniques for low noise microwave generation and transfer of spectral purity with optical frequency combs" IFCS 2014, Taipei (Taiwan). 2014.

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

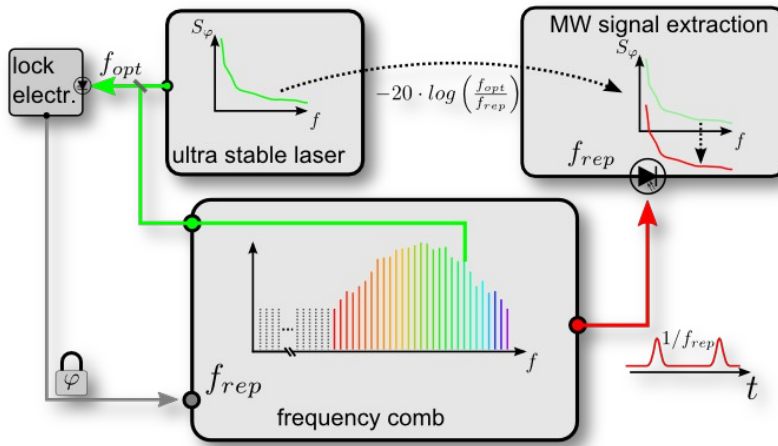


Figure 1: Operation Principle of a comb low phase noise microwave source

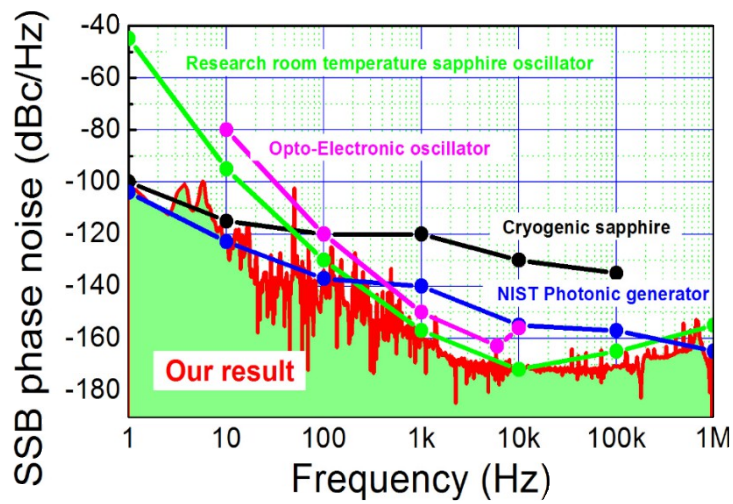
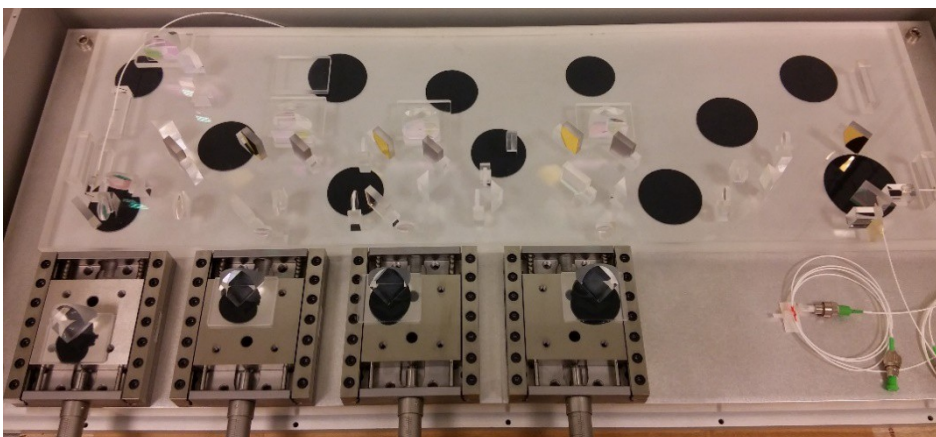


Figure 2 measured phase noise of the photonic generated microwave signal at 12GHz



Photograph of a free space interferometer (photo Kyla)