

Mesure du bruit de phase par inter-corrélation

Cross-Correlation Phase Noise Measurement

Porteur(s) : P.-Y. Bourgeois (FEMTO-ST)

Partenaire(s) : E. Rubiola (FEMTO-ST)

Résumé du projet en Français :

La mesure du bruit de phase par méthode d'inter-corrélation est une technique éprouvée et particulièrement utile lorsque le bruit de l'oscillateur à mesurer est du même ordre de grandeur voire inférieur à celui de l'oscillateur de référence. La méthode peut consister à comparer l'oscillateur à tester avec deux oscillateurs indépendants et à effectuer le calcul de l'intercorrélation. Pendant le processus de mesure, la contribution des références est progressivement rejetée et il devient possible de mesurer des niveaux de bruit inférieurs à ceux des références. Il est cependant nécessaire que les entrées de l'analyseur FFT soient statistiquement indépendantes. Depuis longtemps, cette condition a été admise comme naturelle et de nombreux instruments ont été développés. Récemment, Nelson et al. ont montré que cette condition est en pratique rarement vérifiée, pour des raisons non clairement expliquées. Poddar et Rohde ont mesuré un oscillateur avec plusieurs instruments et avec la troisième harmonique décalée en phase, et ils ont observé une dispersion des résultats de 12 dB à 10 kHz de la porteuse ! Contrairement à d'autres méthodes, l'erreur peut être négative (effets anti-corrélés). Ainsi, l'incertitude est loin d'être maîtrisée. L'objectif de ce projet est de démontrer qu'il est possible de réduire significativement les corrélations résiduelles en proposant une solution alternative. L'avènement de l'électronique numérique appliqué au temps-fréquence est un outil prometteur pouvant fournir des perspectives intéressantes dans ce sens.

Abstract in English:

The measurement of the phase noise by means of cross-correlation is a well-established technique that is particularly useful when the noise of the oscillator to be measured is of the same level or even better than that of the reference oscillator. It is based on the contemporary comparison of the oscillator under test with two independent oscillators and on the calculation of the cross-spectrum.

As measure progresses, the contribution of the references is reduced and it is possible to appreciate noise whose level is lower than those of the references. The necessary condition is that inputs of the FFT analyzer are statistically independent. For a long time, this condition has been taken as verified and many high resolution instruments have been developed with this principle. Recently, Nelson et al. demonstrated that this condition is, in practice, seldom verified, while the reasons are yet not fully explained. Poddar and Rohde have measured an oscillator with different instruments and the third harmonic phase shifted and have observed a discrepancy on the results of 12 dB at 10 kHz off the carrier. Unlike other methods, the error may be negative (anti-correlated effects).

Uncertainty is thus far from being mastered. The goal of the project is to demonstrate that it is possible to significantly reduce the residual correlations for we propose an alternate solution. The advent of digital electronics in time and frequency is a promising tool that can provide interesting insights in this direction.

Résultats marquants :

L'objectif principal de ce projet était d'évaluer la capacité des techniques numériques à effectuer des mesures de bruit de phase sensibles. Bien que l'estimation numérique de phase soit connue surtout dans certaines entreprises et certaines équipes comme le NIST, nous avons cherché à appréhender les techniques numériques modernes en utilisant diverses technologies comme les DDS (synthétiseurs numériques), FPGA (Field Programmable Gate Arrays) et CPU (Central Processing Units), en particulier pour ces deux derniers les nouveaux Socs (Systems on Chips) intégrant FPGA et CPU dans la même puce. Nous nous sommes ensuite concentrés sur l'accumulation de connaissances sur ces techniques modernes nécessitant (sans surprise) une courbe d'apprentissage abrupte.

Nous avons pour cela pu développer un écosystème comprenant chaque outil clé intégré dans un environnement cohérent, de la conception matérielle (portes logiques) à l'utilisateur final (espace utilisateur) avec lien vers les pilotes du noyau et les communications par bus de données. Comme nombre de technologies existantes sont issues de divers fondeurs, nous nous sommes attachés à nous concentrer sur un écosystème polyvalent et universel afin de pouvoir dans un proche avenir mettre en œuvre plus rapidement nos solutions aux matériels et dispositifs évolutifs.

La preuve fonctionnelle a été appliquée à la mesure du bruit de phase, grâce à une implémentation d'asservissement de DDS avec suppression de porteuse, une technique prometteuse pour estimer la fluctuation de phase de tout oscillateur ou dispositif. Tout le travail concernant ces nouvelles techniques reste confidentiel aujourd'hui.

Highlights:

The main goal of this project was to evaluate the capability of digital techniques to perform sensitive phase noise measurements. Although full digital estimation of phase is known especially in some companies and some teams like NIST, we targeted to apprehend modern digital techniques using various technologies like DDS (Direct Digital Synthesizers), FPGAs (Field Programmable Gate Arrays) and CPU (Central Processing Units), especially for the latter two the new SoCs (Systems on Chips) integrating FPGA and CPU within the same chip. We then were focused on accumulating knowledge on these modern techniques requiring (not surprisingly) a steep learning curve.

For we could develop an ecosystem comprising every key tool embedded in a coherent environment, from the Hardware design (logic gates) to the User-end (userspace) with link to the kernel drivers and data bus communications. As number of technologies exist from various (fondeurs), we attached ourselves to concentrate on versatile and universal ecosystem In order to be able in the near future to implement quicker our solutions to evolutive materials and devices.

Functionnal proof has been readily applied to the measurement of phase noise through a DDS-based servo implementation with carrier suppression, a promising technique to estimate the phase fluctuation of any oscillator or device. All the work concerning these new techniques stays confidential at present day.

Publications and communications linked with the funded project:

Peer-reviewed articles:

A. C. Cárdenas-Olaya, E. Rubiola, J.-M. Friedt, P.-Y. Bourgeois, M. Ortolano, S. Micalizio and C. E. Calosso, **Noise characterization of analog to digital converters for amplitude and phase noise measurements**, *Review of Scientific Instruments* (Volume 88, Issue (6), may 2017)

E. Rubiola, M. Lenczner, P.-Y. Bourgeois and F. Vernotte, **The Ω Counter, a Frequency Counter Based on the Linear Regression**, *IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency Control* (Volume 63, Issue (7), jul 2016)

Proceedings:

PY Bourgeois, G Goavec-Merou, JM Friedt, E Rubiola, **A fully-digital realtime SoC FPGA based phase noise analyzer with cross-correlation**, *2017 Joint Conference of the European Frequency and Time Forum and IEEE International Frequency Control Symposium (EFTF/IFC)*

P. Y. Bourgeois, T. Imaike, G. Goavec-Merou and E. Rubiola, **Noise in high-speed digital-to-analog converters**, *2015 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium & the European Frequency and Time Forum, Denver, CO, 2015*, pp. 672-675.

F Vernotte, M Lenczner, PY Bourgeois, E Rubiola, **Least-square fit, Ω counters, and quadratic variance**, *2015 Joint Conference of the IEEE International Frequency Control Symposium & the European Frequency and Time Forum (FCS)*

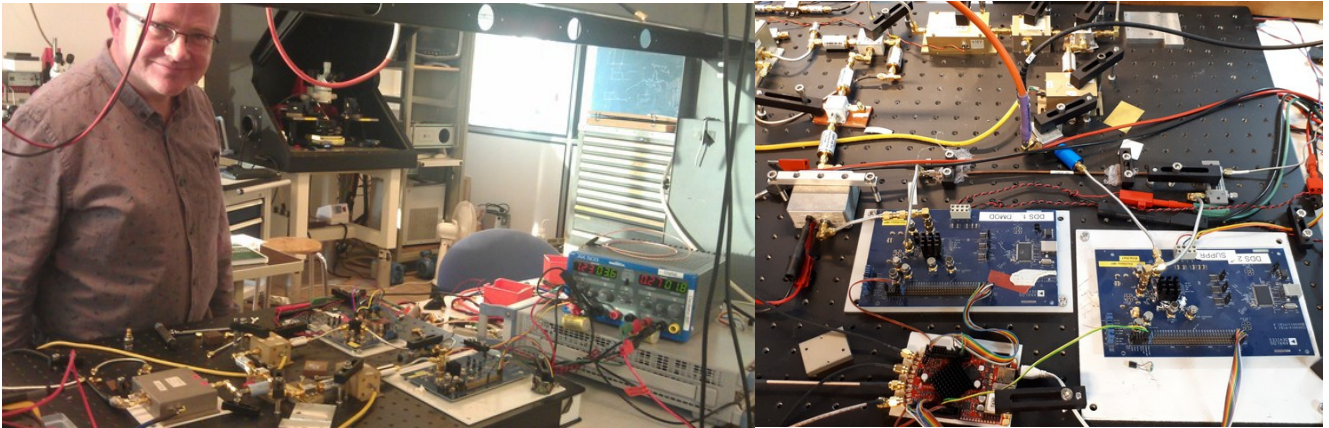
Oral communications:

P.-Y. Bourgeois, **Techniques numériques modernes pour la métrologie Temps-Fréquence**, *Rencontre des trappeurs d'ions français*, 23/24 mars 2017, Marseille

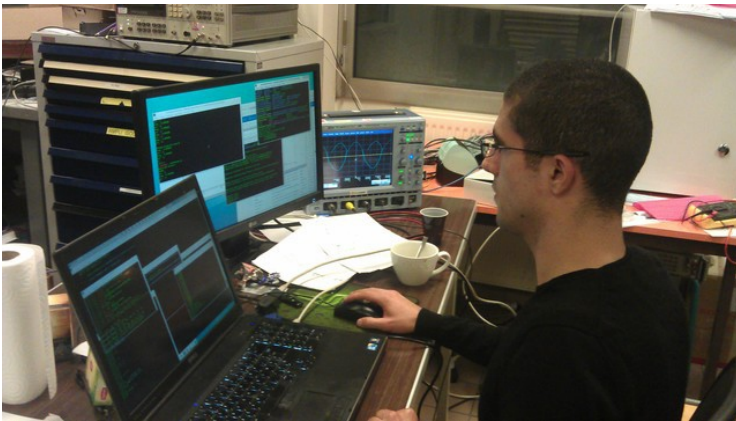
G. Goavec-Merou, P.-Y. Bourgeois, **Une méthodologie et un écosystème de co-design FPGA/CPU**, *1ère école technologique du Réseau National des électroniciens du CNRS*, 12 octobre 2016, Bordeaux

P.-Y. Bourgeois, **Traitement de signaux radiofréquences sur FPGA**, *AG First-TF*, 16 mars 2015, Besançon

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



Yannick Gruson, I.E CNRS, devant son montage du banc de mesure interférométrique



Marc Lamothe, récipiendaire des fonds CDD de First-TF (6 mois), programmant et pilotant le banc de mesure