

MESURES DE STABILITÉ DE FRÉQUENCE D'OSCILLATEURS BVA ULTRASTABLES

FREQUENCY STABILITY MEASUREMENTS OF ULTRA-STABLE BVA OSCILLATORS

Patrice SALZENSTEIN¹, Alexander KUNA², Jan CERMAK², Ludvik SOJDR², Nathalie FRANQUET¹, Fabrice STHAL¹, Xavier VACHERET¹ et Frederic LEVEBvre³

¹ FEMTO-ST UMR CNRS 6174 / LNE-LTFB (Laboratoire Temps Fréquence de Besançon)
ENSMM, 26 Chemin de l'épita phe, F25030 Besançon Cedex FRANCE, patrice.salzenstein@femto-st.fr Phone:
+33(0)3 81 40 28 49

² Time & Frequency Dpt., IPE, Czech Academy of Sciences, Czech Republic

³ Oscilloquartz S.A., Neuchatel, Switzerland

Résumé

Le but de ce papier est de présenter les performances des instruments développés pour la mesure des résonateurs ultra-stable à 5 MHz, avant et après avoir été intégrés en oscillateur et dans ce cas mesuré en tant qu'oscillateur. Le résonateur choisi pour cette étude a une stabilité de fréquence de quelques 10^{-14} . Le plancher de mesure des bancs utilisés va de 7 à $8 \cdot 10^{-15}$.

Abstract

The aim of this paper is to present the performances of the instruments developed for the measurement of 5 MHz ultra-stable resonators, before and after being integrated in an oscillator and then measured as an oscillator. The chosen resonator has an estimated stability of several 10^{-14} . Intrinsic noise floor of these benches are about 7 to $8 \cdot 10^{-15}$.

Introduction

L'idée de déterminer le bruit des résonateurs avant de les intégrer dans des oscillateurs, a été guidée par le souci des industriels impliqué dans la fabrication des oscillateurs, de disposer d'un outil qui permette d'évaluer les potentialité des lots de résonateurs afin d'optimiser les coûts de fabrication en effectuant un tri. En effet, l'intégration d'un résonateur dont les performances seraient moindres, représente un coût pénalisant. Il importe de disposer d'un outil qui permette de réaliser le tri des meilleurs résonateurs. Ainsi, le fabricant sélectionnera les bons résonateurs qui lui permettront de réaliser des oscillateurs ultra-stables. Ce travail est le fruit d'une collaboration entre l'institut FEMTO-ST de Besançon qui a notamment réalisé le banc de mesure de bruit de phase des résonateurs qui sera présenté dans la partie 1, et des mesures de bruit de phase de la partie 3, du département Temps-Fréquence de l'Institut de Photonique et d'Electronique de l'académie des sciences tchèques, dont le résultat des mesures effectuées sur le banc de stabilité de fréquence des oscillateurs fera l'objet de la partie 2, et de la société suisse Oscilloquartz qui fabrique les résonateurs et oscillateurs utilisés dans cette étude.

1. Mesure du bruit du résonateur

Le bruit des résonateurs peut être évalué avant d'être monté en oscillateur ce qui permet un tri des

résonateurs. Le principe du banc de mesure développé à Femto-ST à Besançon, et utilisé pour cette mesure est de rejeter le signal délivré par une source de fréquence à 5 MHz dans deux bras [1 - 4]. Cette source a été préalablement splittée et déphasée en quadrature afin de pomper le mélangeur qui permettra la mesure de bruit à l'analyseur de spectre à transformée de Fourier rapide (FFT). Par ailleurs, le signal qui traverse les deux bras est envoyé sur deux résonateurs quasi-identiques. Le principe est représenté sur le figure 1.

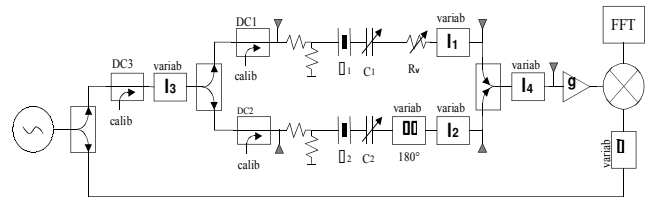


Fig. 1: Principe de fonctionnement du banc de mesure de bruit des résonateurs

Sur chaque bras, des capacités de tirage et une charge permettent d'ajuster les fréquences et les coefficients de surtension en charge. Les signaux disponibles aux sorties de chacun des bras sont ensuite recombinaés après avoir déphasé l'un des deux bras de 180° ce qui permet la suppression de la porteuse. Les bandes latérales de modulation de phase restent présentes et sont ensuite amplifiées avant d'attaquer le mélangeur pompé par le signal de référence.

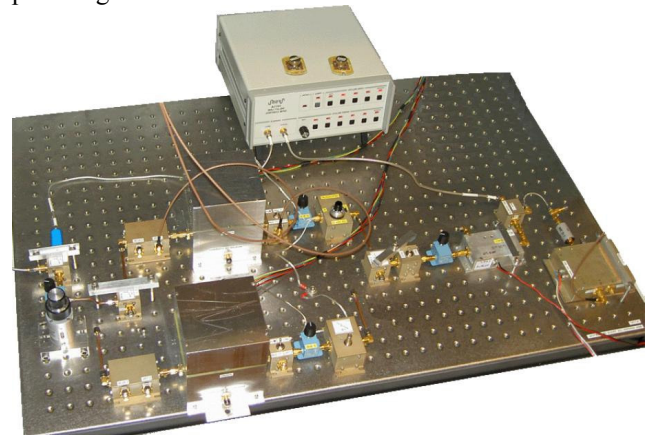


Fig. 2: Banc de mesure de bruit des résonateurs

Un analyseur de spectre couplé à un PC permet de traiter les données et d'accéder au spectre de densité

spectre de bruit de phase. Une photographie du banc de mesure est donnée en figure 2.

Les résonateurs à mesurer sont placés dans des thermostats adéquats car la fréquence du résonateur est sensible à la température et il importe de se placer autour d'un point d'inversion où le résonateur présentera une faible sensibilité aux variations de température. Pour le résonateur numéro 31 de la société Oscilloquartz, qui est l'un de ceux qui ont été étudié, le point d'inversion est situé à 79,8°C.

La figure 3 montre les thermostats spécialement développés par la société Oscilloquartz pour ce type de résonateurs.

Les thermostats utilisés sont très proches du thermostat qui sera utilisé lorsque les résonateurs seront montés en oscillateur pour s'approcher au mieux de la configuration en oscillateur.

Nous nous intéressons au spectre de bruit de phase qui sera obtenu pour le résonateur numéro 31 mesuré avec un autre car, il va ensuite être monté en oscillateur et mesuré à Prague et à Besançon.

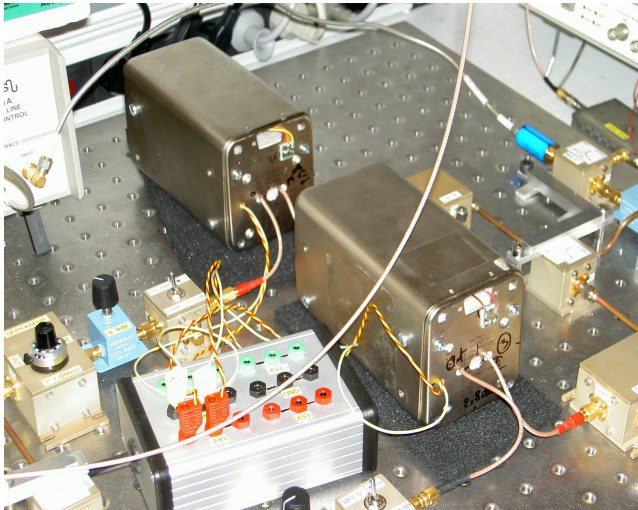


Fig. 3: Photographie des thermostats montés sur le banc de mesure de bruit des résonateurs, contenant chacun un résonateur de la société Oscilloquartz destiné à être monté en oscillateur

Le principe de détermination de la stabilité à partir du bruit de phase est le suivant.

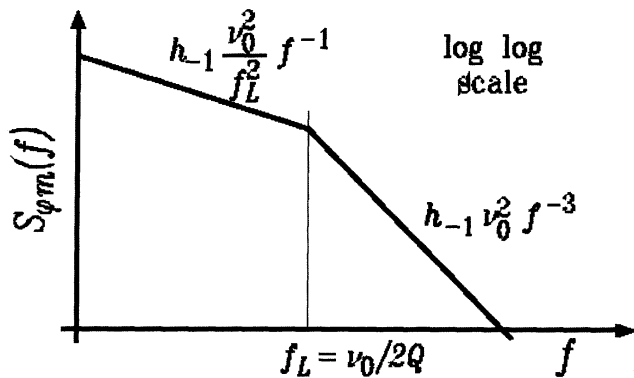


Fig. 4: Allure de la pente de la densité spectrale de bruit de phase mesurée sur une paire de résonateurs

Pour des fréquences de Fourier $f < f_L$, fréquence de coupure du résonateur, celui-ci filtre ses propres

fluctuations de fréquences conduisant à $S_\phi(f)$ à une pente en $1/f^3$. L'allure de la courbe est représentée sur la figure 3.

La fréquence de coupure du filtre passe-bas que constitue un résonateur est $f_L = \nu_0 / 2Q_L$ ce qui nous permet d'écrire que $S_y(f) = (f_L / \nu_0)^2 \cdot S_{\phi m}(f)$.

De $\sigma_y(\tau) = \sqrt{2 \cdot \text{Ln} 2 h^{-1}}$, avec $h^{-1} = f_L^2 / \nu_0^2 \cdot S_\phi(1\text{Hz})$. On en déduit la valeur de la stabilité de fréquence à une seconde.

Le coefficient de qualité de ce résonateur est $Q = 2,74 \cdot 10^6$. Il a été mesuré contre deux autres résonateurs du même lot de fabrication, le 27 et le 28. Nous présentons pour illustration la courbe de mesure du bruit de phase de la paire de résonateurs (31,28) pour une puissance d'entrée de 60 μW .

De cette courbe de mesure obtenue sur la paire (31,28), on déduit la valeur de la stabilité à $1,22 \cdot 10^{-13} \pm 3,1 \cdot 10^{-14}$ pour un temps d'intégration de une seconde. En effet, la valeur de la fréquence de coupure relevée est de 1,64 Hz, celle du bruit de phase de -130 dB.rad²/Hz, ce qui donne un coefficient de qualité de $1,52 \cdot 10^6$. On note que la mesure est obligatoirement faite sur deux résonateurs et qu'il n'est pas possible d'isoler le résonateur seul avec cette méthode.

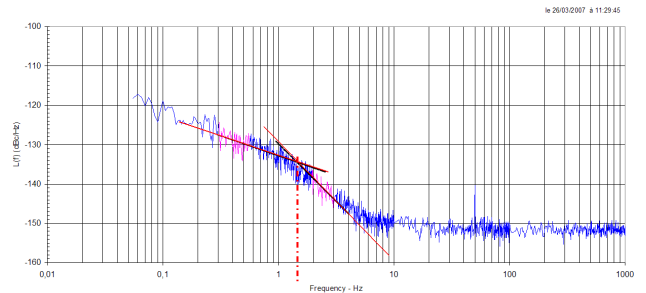


Fig. 5: Courbe de mesure du bruit de phase obtenue sur la paire de résonateurs (31,28)

Enfin, la mesure est sensible à la puissance d'attaque du résonateur. La stabilité apparente déduite s'améliore lorsque la puissance d'excitation est augmentée. Si deux résonateurs sont identiques, la stabilité de chacun serait obtenue en divisant par racine de deux. Toutefois lorsque l'un des deux présente des performances moins bonnes, c'est celui qui a la moins bonne stabilité qui limite la valeur obtenue. On obtient donc un majorant de la stabilité du résonateur numéro 31. La stabilité de ce résonateur semble se situer dans la gamme $7,5 \cdot 10^{-14}$ à $1,2 \cdot 10^{-13}$. Cela permet de donner une indication pour un tri favorable mais pas encore de déterminer quelle pourra être la valeur de la stabilité espérée pour ce résonateur monté en oscillateur. On notera également que le plancher de mesure du banc de mesure de bruit des résonateurs est de $8 \cdot 10^{-15}$.

2. Stabilité de fréquence

Pour faire suite à ces mesures de bruit sur les résonateurs, nous présentons dans cette partie ce qui concerne les mesures de stabilité court terme de fréquence réalisées au département temps-fréquence de l'institut de photonique et d'électronique (IPE) de l'académie des sciences thèque.

Une fois monté en oscillateur le résonateur 31 a été intégré dans un boîtier d'oscillateur et pris le numéro

691. Cet oscillateur a fait partie d'un lot de 5 oscillateurs Oscilloquartz de type 8607 emmenés à Prague pour être mesurés sur le banc à double mélangeur (numérotés 199, 543, 567, 691, 692). Trois de ces oscillateurs, les 199, 543, 567, avaient été mesurés lors d'une campagne précédente en octobre 2007 [5], et parmi eux, les oscillateurs 199 et 543 ont participé à la comparaison internationale [6, 7]. La répétabilité des mesures long terme a pu être démontrée.

Si les meilleurs oscillateurs ont montré des paliers inférieurs à 5.10^{-14} déduits par triangulation des mesures croisée entre plusieurs paires [8], il est intéressant de voir ce qu'il est advenu de l'oscillateur qui incluait le résonateur numéro 31 qui avait été mesuré sur le banc de bruit des résonateurs. Le 691 a été mesuré contre le 692 et contre les autres oscillateurs en juillet 2008. Le palier flicker de ces oscillateurs se situe dans les environs de 6.10^{-14} et les résultats ont été publiés [5, 8].

Le principe du banc de mesure à double mélangeur est rappelé sur la figure suivante. Il est basé sur la multiplication de différence de temps à double mélangeur, *dual-mixer time-difference multiplication* (DMTDM) avec une fréquence de battement de 5 Hz. Chaque mesure donne 10000 échantillons espacés d'un temps d'intégration de base de 200 ms.

Lorsqu'il est testé avec deux signaux provenant de la réjection d'un signal délivré par un seul oscillateur BVA, le flicker de phase déduit est de 7.10^{-15} à une seconde, qui peut être négligé dans la région qui nous intéresse lors des mesures du palier flicker entre 1 et 100 secondes. Enfin, il est à noter que toutes ces séries de mesures ont été réalisées avec des oscillateurs branchés sur batterie.

L'oscillateur 691 a été mesuré sur le banc schématisé à la figure 6 avec l'oscillateur 692. La courbe présente un palier flicker à $7,5.10^{-14}$ pour des temps d'intégration de la dizaine de secondes à 100 secondes.

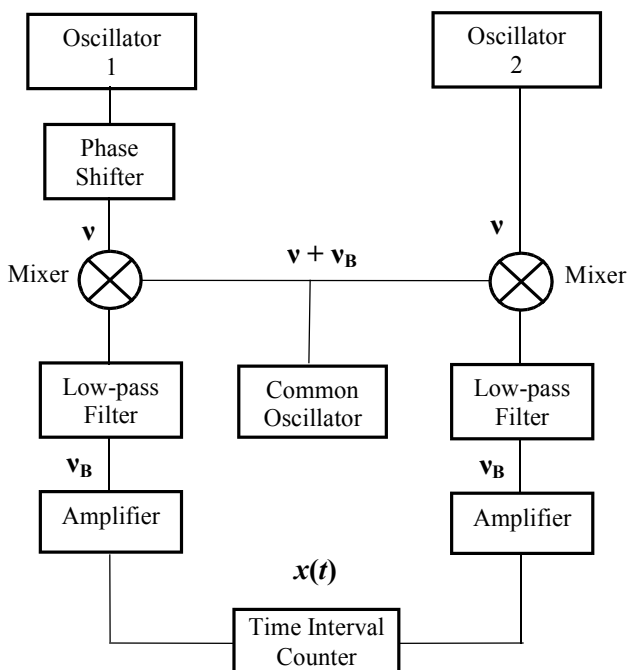


Fig. 6: Principe de mesure de la stabilité de fréquence avec le banc à DMTDM

La courbe de mesure de stabilité obtenue avec la paire (691,692) est présentée sur la figure 7.

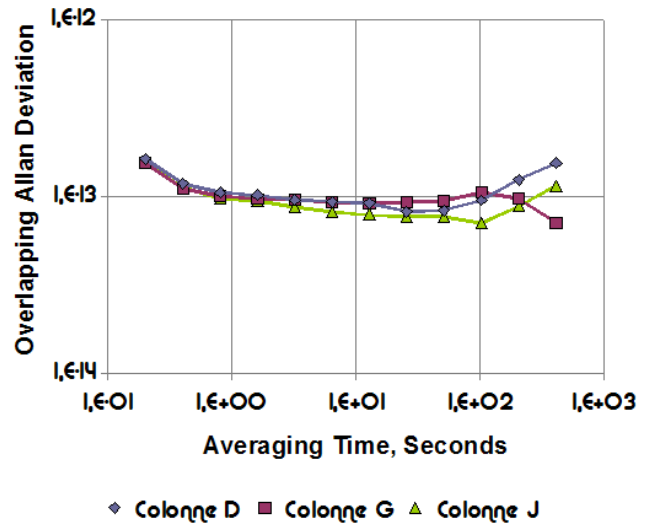


Fig. 7: Mesure de stabilité de fréquence sur les oscillateurs 691 et 692

Les trois courbes représentent des mesures effectuées à une semaine d'intervalle. On note que la stabilité s'est améliorée avec le temps. Même une micro-coupure peut avoir un effet négatif sur la stabilité. La stabilité de la paire mesurée à 1 s est de $9,5.10^{-14}$. Les deux oscillateurs présentant des performances sensiblement équivalentes, on peut les considérer comme de poids équivalent, et donc donner une valeur estimative de la stabilité de l'oscillateur à $6,7.10^{-14}$ à 1 s, avec un palier vers $5,5.10^{-14}$ sur l'intervalle 20-100 s. A ce résultat il faut par ailleurs associer une incertitude de $\pm 3.10^{-15}$ environ.

3. Mesures de bruit de phase

Les oscillateurs ont été mesurés en terme de bruit de phase et en particulier l'oscillateur numéro 691. Le principe de mesure est d'asservir l'un des deux oscillateurs sur l'autre comme schématisé sur la figure suivante.

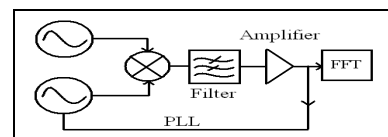


Fig. 8: Principe de mesure du bruit de phase d'une paire d'oscillateur

Ces mesures sont réalisées sur un banc commercial HP3048 de la société Hewlett Packard. Le signal de battement est ensuite filtré et amplifié vers l'analyseur de spectre à transformée de Fourier rapide de type HP3561A.

Nous présentons un exemple de courbe de bruit réalisé sur la paire d'oscillateur (691,692). On rappelle que l'oscillateur numéro 691 est construit à partir du résonateur numéro 31 mesuré dans la première partie de cette étude sur le banc de bruit des résonateurs.

Il est à noter que ce type de spectre présente de nombreux pics dont la droite qui relie les maxima décroît en $1/f^2$. A 10 Hz de la porteuse, la densité spectrale de bruit de phase mesurée est d'environ -140 dBc/rad²/Hz.

La courbe est donnée sur la figure suivante.

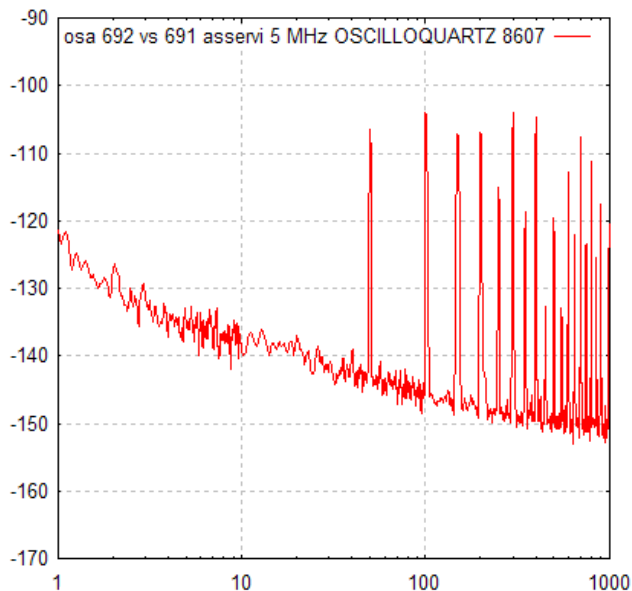


Fig. 9: Mesure de densité spectrale de bruit de phase sur les oscillateurs 691 et 692 (dBc/Hz versus Hz)

La valeur à 1 Hz est de -123,5 dBc/Hz ce qui correspond à $S_{\phi}(1\text{Hz}) = -126,5 \text{ dB}\cdot\text{rad}^2/\text{Hz}$, ce qui correspond à un palier flicker de $1,1\cdot 10^{-13}$. Toutefois la mesure de bruit pour des valeurs de fréquences de Fourier inférieures à quelques Hertz semble avoir été affectée par des instabilités, et il n'est pas possible de conclure avec certitude que l'on voit bien une pente en $1/f^3$ à 1 Hz. Enfin l'incertitude de cette mesure est de $\pm 2 \text{ dB}$.

4. Discussion et conclusion

Les valeurs de stabilité à une seconde mesurées sur les résonateurs dans la partie 1, montraient que l'on pouvait s'attendre à un palier de $8,7\cdot 10^{-14} \pm 2,1\cdot 10^{-14}$ - en prenant pour hypothèse que les deux résonateurs mesurés ensemble à $1,22\cdot 10^{-13}$ étaient de poids identique.

Dans la partie 2, le palier flicker déterminé lors des mesures de stabilité de la paire (691,692) était de $7,7\cdot 10^{-14}$ (soit $5,5\cdot 10^{-14} \pm 3\cdot 10^{-15}$) est devrait donc donner une pente en $1/f^3$ avec un terme de densité spectrale de bruit de phase $S_{\phi}(1\text{Hz}) = -129,5 \text{ dB}\cdot\text{rad}^2/\text{Hz}$. Pourtant il y a une différence de 3 dB par rapport ce qui peut être déduit des mesures effectuées à la partie 3. Toutefois, l'incertitude de 2 dB sur la mesure de bruit de phase et l'instabilité sur le spectre autour de 1 Hz nuance cette différence.

On pourra certainement discuter des valeurs de capacité de tirage qui ne sont pas optimisées, ou encore sur le fait que le résonateur monté en oscillateur voit plus de puissance que lorsqu'il a été mesuré dans le banc de mesure de bruit des résonateurs. Néanmoins, cette étude sur la mesure de la stabilité du résonateur puis du résonateur monté en oscillateur, à l'aide des moyens de mesures développés à Besançon et à Prague, constitue un succès dans la mesure où elle contribue à démontrer les performances des bancs. Les planchers respectifs des bancs de mesure de bruit de résonateurs à Besançon et d'oscillateurs à Prague sont respectivement de $8\cdot 10^{-15}$ et de $7\cdot 10^{-15}$. Ils sont adaptés à la mesure de résonateurs et d'oscillateurs à l'état de l'art tels que ceux développés par Oscilloquartz.

Remerciements

Outre le concours de la société Oscilloquartz, les auteurs tiennent à remercier Stéphane GILLE du laboratoire national de métrologie et d'essais (LNE) pour le soutien à ce projet dans le cadre du contrat LNE/DRST 08 7 002, ainsi que l'office tchèque pour les standards, la métrologie et les tests.

Références

- [1] E. Rubiola, J. Gros Lambert, M. Brunet and V. Giordano, "Flicker noise measurement of HF quartz resonators", IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr., vol. 47, p. 361-368 (2000)
- [2] F. Sthal, M. Mourey, F. Marionnet and W.F. Walls, "Phase noise measurements of 10 MHz BVA quartz crystal resonator", IEEE Trans. Ultrason. Ferroelec. Freq. Contr., vol. 47, p. 369-373 (2000)
- [3] F. Sthal, X. Vacheret, P. Salzenstein, S. Galliou, E. Rubiola and G. Cibiél, "Advanced bridge instrument for the measurement of the phase noise and of the short-term frequency stability of ultrastable quartz resonator", Proc. Joint Meeting IEEE Ann. Freq. Cont. Symp. and European Frequency and Time Forum, Genova, Switzerland, 29 May-1 June, pp. 254-260 (2007).
- [4] F. Sthal, S. Galliou, X. Vacheret, P. Salzenstein, R. Brendel, E. Rubiola and G. Cibiél, "analysis of noise origin in ultra stable resonators: Preliminary Results on Measurement bench", Proceeding of the 22nd European Frequency and Time Forum - Toulouse, France (2008)
- [5] A. Kuna, J. Cermak, L. Sojdr, P. Salzenstein and F. Lefebvre, "Comparison of ultra-stable BVA Oscillators", Proceeding of the 22nd European Frequency and Time Forum - Toulouse, France (2008)
- [6] P. Salzenstein, J. Cermak, R. Barillet, F. Lefebvre, W. Schaefer, G. Cibiél, G. Sauvage, O. Franquet, O. Llopis, F. Meyer, N. Franquet, A. Kuna, L. Sojdr and G. Hejc, "Spectral density of phase noise inter-laboratory comparison final results", 13th International Metrology Congress, Lille : France (2007)
- [7] P. Salzenstein, F. Lefebvre, R. Barillet, J. Čermak, W. Schaefer, G. Cibiél, G. Sauvage, O. Franquet, O. Llopis, F. Meyer, N. Franquet, X. Vacheret, A. Kuna, L. Šojdr, G. Hejc and S. Gribaldo, "Phase noise inter-laboratory comparison preliminary results", Proceedings of the 20th European Frequency and Time Forum, Braunschweig, Deutschland, 27-30 March 2006 - (2006)
- [8] A. Kuna, J. Čermak, L. Šojdr, P. Salzenstein, F. Lefebvre, "Lowest flicker frequency floor measured on BVA oscillator", Proc. Joint Meeting IEEE Ann. Freq. Cont. Symp. and European Frequency and Time Forum, Besançon, France, April 2009