HAL
open science

Bruit des oscillateurs et des résonateurs à quartz

Patrice Salzenstein, Fabrice Sthal, Serge Galliou, Enrico Rubiola, Vincent Giordano, Rémi Brendel

To cite this version:

Patrice Salzenstein, Fabrice Sthal, Serge Galliou, Enrico Rubiola, Vincent Giordano, et al.. Bruit des oscillateurs et des résonateurs à quartz. Actes du Workshop Bruit en régime linéaire et non-linéaire dans les composants et circuits de télécommunications, La Grande Motte, France, 7-8 juin 2004, 2004, La Grande Motte, France. hal-00022887

HAL Id: hal-00022887

https://hal.science/hal-00022887v1

Submitted on 19 May 2006

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

WORKSHOP "Bruit en régime linéaire et non -linéaire dans les composants et circuits de télécommunications", La Grande Motte, France, 7-8 juin 2004

Bruit des oscillateurs et des résonateurs à quartz

P. Salzenstein[1], F. Sthal[2], S. Galliou[2], E. Rubiola[3], V. Giordano[1] et R. Brendel[1]

FEMTO Sciences et Technologies, CNRS UMR 6174
[1] Département LPMO, 32 avenue de l'Observatoire, 25044 Besançon Cedex
[2] Département LCEP, 26 chemin de l'Epitaphe, 25030 Besançon Cedex
Tél.: 03 81 85 39 99, Télécopie: 03 81 85 39 98
Mél: patrice.salzenstein@lpmo.edu

[3] ESSTIN – LPMI, Université Poincaré, 2 avenue Lamour, 54519 Vandoeuvre-les-Nancy

1. INTRODUCTION

Un des problèmes qui se posent au concepteur des oscillateurs à quartz de haute stabilité est le bruit propre des résonateurs. Nous effectuons tout d'abord une brève description des principaux mécanismes susceptibles d'affecter la stabilité des oscillateurs et des résonateurs à quartz. Ensuite sont explicitées les grandeurs mises en jeu dans la métrologie des fréquences : la densité spectrale de bruit de phase dans le domaine spectral et la variance d'Allan dans le domaine temporel. Enfin nous présentons l'instrumentation utilisée et développée pour la mesure du bruit des oscillateurs en général et des résonateurs en particulier.

2. SENSIBILITÉ DU QUARTZ A SON ENVIRONNEMENT

Le quartz possède des propriétés mécaniques très stables au cours du temps. Comme il est piézoélectrique, une vibration constante peut être entretenue à l'aide d'une tension électrique.

Plusieurs mécanismes sont à l'origine des fluctuations de fréquence des oscillateurs :

- La sensibilité du résonateur aux variations des grandeurs d'environnement (température, champs électromagnétiques statiques ou dynamiques, actions mécaniques telles que l'accélération, les chocs, les vibrations, sensibilité du matériau aux rayonnements ionisants, etc.)
- Les modifications plus ou moins rapides des caractéristiques métrologiques du résonateur dues à des défauts internes (relaxation de contraintes, migration d'impuretés au cœur ou en surface, etc.)
- L'électronique d'entretien contribue également en partie à fixer la fréquence des oscillations et son bruit propre influe sur la stabilité de l'ensemble par les mécanismes habituels : bruit thermique, bruit de grenaille, bruit en 1/f, auxquels il faut ajouter la sensibilité propre du circuit aux perturbations extérieures (variation de tension, humidité, etc.)

3. GRANDEURS CARACTERISTIQUES DE L'INSTABILITÉ DES QUARTZ

Quelle que soit la stabilité en fréquence du signal de sortie d'un oscillateur, on peut toujours considérer qu'il est le résultat d'une onde pure infiniment stable modulée en amplitude, en fréquence ou en phase. La stabilité de fréquence sera d'autant meilleure que la modulation sera faible. Cela permet de comprendre que l'on peut caractériser les instabilités de fréquence dans le domaine fréquentiel par l'étude du spectre ou dans le domaine temporel par l'étude statistique des différents résultats de comptage de la fréquence de ce signal. La densité spectrale de bruit de phase est définie en intégrant le rapport bandes latérales sur porteuse donné en fonction de l'écart à la porteuse, c'est-à-dire en fonction des fréquences de Fourier. Dans le domaine temporel, la variance d'Allan résulte de l'étude statistique des résultats de comptages de la fréquence, et permet de caractériser l'instabilité de l'oscillateur en fonction du temps de comptage.

Un oscillateur présente généralement près de la porteuse un bruit de fréquence en 1/f, à savoir un bruit Flicker en $1/f^3$ pour la densité spectrale de bruit de phase, équivalent à un

palier Flicker pour la variance d'Allan dans le domaine temporel.

4. MOYENS DE MESURES DU BRUIT DES RESONATEURS ET DES OSCILLATEURS

Les fluctuations de la fréquence de résonance du résonateur à quartz limitent la stabilité de fréquence ultime de l'oscillateur. Or ces fluctuations sont difficiles à mesurer car on doit limiter la puissance injectée dans le résonateur au détriment de la sensibilité de la détection de phase. Nous nous proposons d'expliquer le fonctionnement d'un banc de mesure traditionnel à mélangeur saturé utilisé au département LCEP.

L'idée générale des bancs de mesure passifs consiste à réduire le plus possible le bruit de la source. En effet, dans le cas d'une mesure de résonateur très faible bruit, le bruit de la source est toujours supérieur à celui du quartz. Une mesure directe avec un seul résonateur ne permet donc pas de mesurer son bruit propre. Ainsi, la mesure est effectuée par couple de résonateurs (QX_1 et QX_2). La contribution de la source est éliminée par suppression de la porteuse, c'est-à-dire par soustraction de deux signaux quasi-identiques si l'on utilise deux résonateurs dont les paramètres motionnels sont très voisins. Les bruits propres de chacun des résonateurs étant différents, ils ne sont pas éliminés par cette opération. Dans le cas idéal d'une suppression complète, le signal d'entrée de l'amplificateur, uniquement constitué par le bruit des résonateurs, peut être fortement amplifié sans saturer l'amplificateur. La détection de phase permet ensuite de ramener le bruit des résonateurs en basse fréquence pour en faire une analyse spectrale. Cela suppose que l'amplification amène le bruit des résonateurs à un niveau supérieur à celui de la source. Pour l'étalonnage, le banc peut fonctionner en utilisant deux méthodes différentes. La première méthode consiste à injecter sur la source une raie latérale de modulation de fréquence dans la bande passante du résonateur dont on connaît l'atténuation par rapport à la porteuse pour obtenir un coefficient correcteur d'étalonnage. La deuxième méthode d'étalonnage utilise une source de bruit blanc large bande connue placée à l'entrée d'une des branches du banc. Le banc commercial *Femtosecond CR200A*, basé sur ce principe est schématisé sur la figure 1.

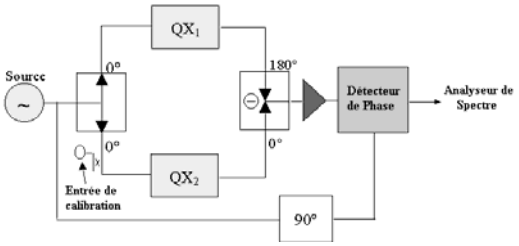

Figure 1. – *Principe du banc de mesure CR200A.*

Toutefois, il ne permet pas toujours la détermination du bruit intrinsèque des résonateurs métrologiques actuels. Le principe du banc de mesure [1] mis au point au département LPMO et fonctionnant à 5 et 10 MHz (voir la figure 2) est le suivant : le signal fourni par une source de référence est divisé entre les deux bras de l'instrument où sont montés deux résonateurs à quartz. Les éléments réglables permettent d'obtenir deux signaux de même amplitude mais en opposition de phase. A l'entrée de l'amplificateur, la porteuse est supprimée, et l'amplificateur qui fonctionne alors en régime linéaire n'apporte pas de bruit supplémentaire. Les bandes latérales de modulation de phase sont ensuite détectées après amplification dans un mélangeur pompé par le signal de référence. La sensibilité démontrée de ce banc permet la détection de fluctuations relatives de fréquence au niveau de quelques 10^{-14} pour une puissance dissipée dans le résonateur de 50 µW.

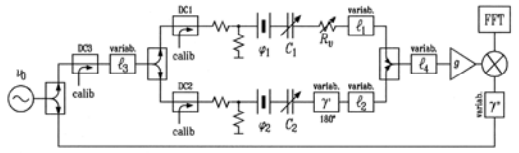

Figure 2. – *Principe du banc de mesure LPMO.*

Lorsque le résonateur est monté en oscillateur, la stabilité de sa fréquence d'oscillation peut être caractérisée en densité spectrale de bruit de phase par une démodulation de phase du signal à étudier en asservissant un signal de référence sur l'oscillateur au moyen d'une boucle de phase. La tension d'erreur de cet asservissement est alors proportionnelle aux fluctuations de phase de l'oscillateur à tester et de l'oscillateur de référence, pour les fréquences de Fourier situées à l'extérieur de la bande passante de l'asservissement. Cette tension amplifiée est envoyée sur un analyseur de spectre dynamique qui calcule et affiche la densité spectrale des fluctuations.

REFERENCES

[1] E. Rubiola, J. Groslambert, M. Brunet and V. Giordano, 'Flicker noise measurement of HF Quartz resonatirs', IEEE Trans. On UFFC, Vol. 47, No 2, march 2000, pp 361-368