

REALISATION D'UN AMPLIFICATEUR DE DISTRIBUTION POUR LES MESURES DE STABILITE COURT TERME DE FREQUENCE

Patrice Salzenstein et Franck Lardet-Vieudrin

Laboratoire Associé au Laboratoire National d'Essai (LNE), Accréditation COFRAC ISO 17025, Institut FEMTO-ST, UMR CNRS 6174, Département LPMO, 32 avenue de l'Observatoire, 25044 Besançon Cedex
Tel : 03 81 85 39 74 - Télécopie : 03 81 85 39 98 - Mél : patrice.salzenstein@lpmo.edu

I. Introduction

La détermination précise de la courbe de variance d'Allan pour des temps d'intégrations entre 0,1 et 100 s demeure, avec la mesure de densité spectrale de bruit de phase (domaine spectral), un des paramètres clefs dont les laboratoires ont besoin pour connaître les performances de leurs sources étalons. Tant pour les mesures de bruit de phase que pour celles de stabilité court terme, il est nécessaire de disposer des meilleures références. Toutefois, il importe de réaliser des amplificateurs de distributions à 5 et 10 MHz dont le bruit propre est le plus faible possible afin de ne pas masquer les performances des références disponibles.

II. Design et réalisation de l'amplificateur de distribution

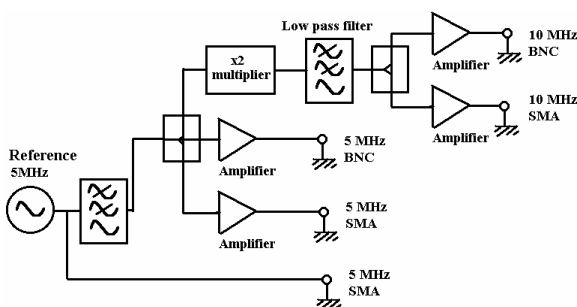


Figure 1. Schéma électrique de l'amplificateur de distribution 5 et 10 MHz

La figure 1 décrit le schéma électrique de l'amplificateur de distribution. Ses performances ont été préalablement évaluées à l'aide du logiciel SPICE. Le niveau d'isolation attendu à 5 MHz est de -107.9 dBc tandis que la phase du signal est proche de -180° . L'amplitude du signal délivré par l'amplificateur de distribution varie peu autour de 5 et de 10 MHz. Notre but consiste à optimiser les performances de ce composant de manière à pouvoir l'intégrer avec les

meilleurs oscillateurs commerciaux existant. De plus l'amplificateur de distribution possèdera quatre sorties deux de 5 MHz et deux autres de 10 MHz.

Le lay out de l'amplificateur de distribution est représenté sur la figure 2. Pour générer les signaux de sortie à 5 MHz nous avons fabriqué des amplificateurs à double étage, représentés à gauche sur le schéma. Les signaux à 10 MHz sont synthétisés par l'intermédiaire de deux multiplicateurs par deux représentés à droite de la figure.

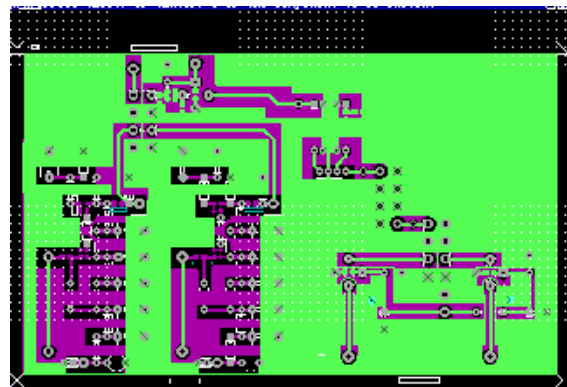


Figure 2. Lay out de l'amplificateur de distribution

Nous avons placé sur l'un des bras un multiplicateur par deux basé sur une jonction hybride afin de générer les signaux de sorties à 10 MHz. Les sorties 10 MHz sont disponibles après avoir été amplifiées en sortie du diviseur de puissance. Entre chacune des sorties 5 ou 10 MHz, l'amplificateur de distribution doit rejeter au mieux les harmoniques des signaux délivrés.

Le tableau I représente la réjection des harmoniques pour un signal d'entrée de 5 MHz et d'un niveau de puissance de $+7$ dBm généré par un synthétiseur de fréquence *Hewlett-Packard* de type '4643A'.

Fréquence (MHz)	Puissance de sortie (dBc)
20	-56
30	-63
40	-71
50	-91

Tableau 1. Niveau des harmoniques du 10 MHz

Afin d'améliorer les performances, il est nécessaire d'ajouter des éléments de filtrages, en particulier avant l'entrée de l'amplificateur de distribution. Le niveau de puissance des signaux indésirables en sortie diminue sensiblement pour atteindre -76 dBc et -91 dBc respectivement pour les fréquences 20 MHz et 30 MHz.

La multiplication par deux permet d'avoir un rendement optimal en puissance, associé à un excellent facteur de bruit. Il est réalisé en utilisant l'effet de redressement d'un pont de diode. Pour l'entrée d'un signal 5 MHz à un niveau de puissance de 0 dBm, le niveau des signaux de sorties à 5, 10, 15, 20, 25, 30 MHz est respectivement de -45, +8, -41, -8, -47, -18 dBm. Constatant une réjection insuffisante de certaines harmoniques du 10 MHz, les raies parasites à 20 et 30 MHz sont ensuite filtrées par un passe-bas.

III. Performances de l'amplificateur de distribution réalisé

Un amplificateur de distribution a donc été réalisé afin de disposer de plusieurs sorties distribuées en 5 et 10 MHz, à partir d'une source à 5 MHz pouvant être un oscillateur ultra-stable de type VCXO.

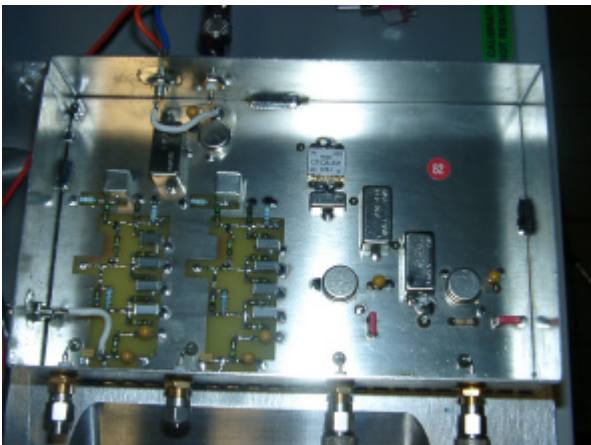


Figure 3. Photographie de l'amplificateur de distribution 5 et 10 MHz

Cet amplificateur de distribution contient en particulier des multiplicateurs par deux développés au laboratoire. La figure 3 est une photographie de l'amplificateur de distribution réalisé avec en haut l'entrée 5 MHz, en bas à gauche les deux sorties 5 MHz, et les deux sorties 10 MHz en bas à droite.

La mesure de la densité spectrale de bruit de phase de l'ampli de distribution a été réalisée en réjectant une source ultra-stable, en l'occurrence des oscillateurs Oscilloquartz ultra-stables de type OSA 8607 à 5 MHz sur le banc de mesure de bruit de phase du laboratoire, le banc *Hewlett-Packard* de type '3048'. Ces oscillateurs présentent une stabilité de fréquence de $8 \cdot 10^{-14}$ sur la seconde à 5 MHz. L'amplificateur de distribution ne doit aucunement dégrader les spécifications de la référence à distribuer sur les voies de sorties.

Nous avons tout d'abord mesuré la densité spectrale de bruit de phase de l'oscillateur à quartz commandé en tension (VCXO) sur le banc de mesure de bruit de phase. Nous avons obtenu $-127 \text{ dB}\cdot\text{rad}^2/\text{Hz}$ à 1 Hz de la porteuse à 5 MHz. Nous avons alors mesuré la variance d'Allan sur l'analyseur d'intervalle de temps *Timing Solutions* de type TSC 5110A et obtenu $8,8 \cdot 10^{-14}$ pour un temps d'intégration d'une seconde.

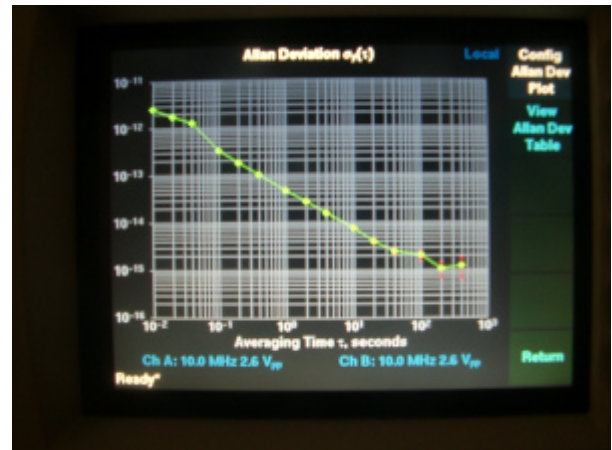


Figure 4. Distribution amplifiée mesurée sur l'analyseur de variance d'Allan à 10 MHz

Nos mesures montrent une bonne réjection du bruit de l'oscillateur à travers l'amplificateur de distribution. En effet, en connectant deux sorties d'amplificateur de distribution sur l'analyseur d'intervalle de temps, les variance d'Allan mesurées sont respectivement égales à $4,8 \cdot 10^{-14}$ et $2,3 \cdot 10^{-14}$ à 5 MHz et 10 MHz pour un temps d'intégration de une seconde. La courbe correspondante est représentée sur

la figure 4. Il se trouve que les résultats obtenus en terme de variance d'Allan $\sigma_y(\tau)$ correspondent quasiment aux planchers de bruit fournis par le constructeur du banc utilisé, c'est-à-dire $5 \cdot 10^{-14}$ et $2,5 \cdot 10^{-14}$ respectivement à 5 MHz et 10 MHz. Dans notre cas, la mesure de la variance d'Allan est en réalité calculée automatiquement à partir de la compilation des mesures issues du comptage de fréquence. Toutefois, nous constatons que la mesure est apparemment limitée par les performances du banc utilisé.

Avec cette méthode il ne nous est donc pas possible d'évaluer précisément les performances de l'amplificateur de distribution en terme de stabilité court terme de fréquence. Par contre nous allons voir que les performances en terme de variance d'Allan peuvent être déduites en analysant le résultat des mesures de bruit de phase. La mesure de stabilité directement déduite du système de comptage de fréquence étant limitée par les performances des moyens de mesures disponibles, il a été possible de déduire les performances en terme de stabilité temporelle en repartant des données obtenues sur la courbe de densité spectrale de bruit de phase mesurée. Nous avons donc procédé à la mesure de densité spectrale de bruit de phase des sorties identiques de l'amplificateur de distribution. Le principe correspondant est représenté sur la figure 5.

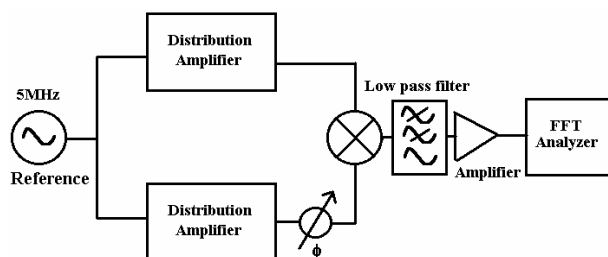


Figure 5. Principe de la mesure de densité spectrale de puissance de bruit de phase

Il consiste à déphaser l'une des deux voies sur le mélangeur du banc de mesure de bruit de phase, et analyser le bruit à l'aide d'un analyseur de spectre à Transformée de Fourier Rapide (FFT). Nous avons obtenus les courbes présentées en figures 6 et 7.

En considérant que les deux voies ont une contribution identique, les valeurs à 1 Hz de la porteuse sont les suivantes. $S\phi(1\text{Hz}) = -141,4 \text{ dB.rad}^2/\text{Hz}$ à 5 MHz et $-141 \text{ dB.rad}^2/\text{Hz}$ à 10 MHz avec une pente de densité spectrale en $1/f$.

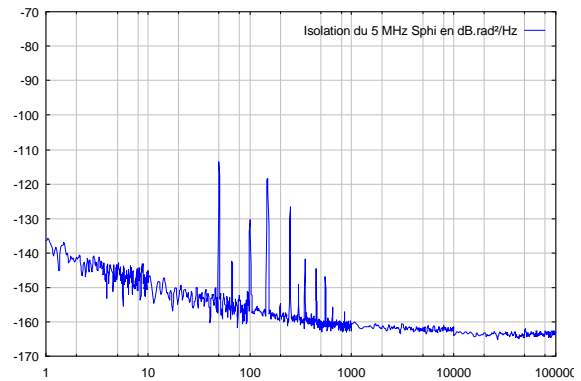


Figure 6. Mesure de densité spectrale de bruit de phase de l'amplificateur de distribution à 5 MHz sur le banc '3048'

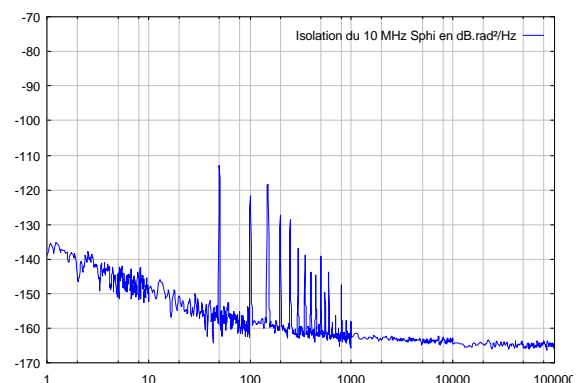


Figure 7. Mesure de densité spectrale de bruit de phase de l'amplificateur de distribution à 10 MHz sur le banc '3048'

Nous avons ensuite utilisé les formules d'équivalence entre le domaine spectral et le domaine temporel et déduit des mesures de bruit de phase, la valeur de la stabilité temporelle attendue. Celle-ci a ensuite été comparée aux résultats de mesures de l'analyseur de variance d'Allan.

Pour les bruit en $1/f$ dans le domaine spectral, il est possible d'utiliser la relation suivante [1] qui permet de retrouver $\sigma_y(\tau)$ en fonction de la densité spectrale de bruit de phase :

$$\sigma_y(\tau)^2 = h_1 / (4\pi^2 \cdot \tau^2) + [9/2 + 3 \text{Ln}(2\pi F_h \tau) - \text{Ln}2]$$

où h_1 représente le coefficient de la pente à 1Hz, τ le temps d'intégration, F_h la fréquence de coupure supérieure du bruit.

Nous déduisons donc les valeurs de stabilité de fréquence en terme de variance d'Allan, soit $\sigma_y(\tau) = 1,4 \cdot 10^{-14}$ à 1 s pour les signaux à 5 MHz, et $\sigma_y(\tau) = 7,3 \cdot 10^{-14}$ à 1 s pour 10 MHz

IV. Conclusion et perspectives

En terme de stabilité court terme, les performances d'isolation des amplificateurs de distribution que nous avons développés et réalisés pour notre application, sont, à 5 et 10 MHz, en terme de variance d'Allan sur une seconde, meilleures que $\sigma_y(\tau) = 1,4 \cdot 10^{-14}$ et $7,3 \cdot 10^{-15}$ respectivement, ce qui correspond à un niveau de bruit propre meilleur que $S\phi(1\text{Hz}) = -141,4$ dB.rad²/Hz à 5 MHz et que -141 dB.rad²/Hz à 10 MHz avec une pente en $1/f$, ce qui correspond à une performance comparable à l'état de l'art du NIST [2].

Ces travaux s'insèrent dans un effort du laboratoire pour améliorer ses moyens de mesures destinés aux étalonnages accrédités. Ainsi, des pré-multiplicateurs d'écart conçus au sein du laboratoire sont en cours de développement et présenteront des performances à l'état de l'art, avec en terme de stabilité court terme mieux que $5 \cdot 10^{-14}$ sur 1 s, inférieur à 10^{-14} sur 10 s et de $3,3 \cdot 10^{-15}$ sur 100 s [3]. Ces instruments seront à terme inclus dans la chaîne d'étalonnage de la stabilité court terme des sources de fréquences qui procède par

comparaison d'une source à étalonner avec un oscillateur de référence.

Références :

- [1] C. Audoin, M. Y. Bernard, R. Besson, J. J. Gagnepain, J. Gros Lambert M. Grandveaud, J.C. Naud, M. Olivier et J. Rutman, « *La mesure de la fréquence des oscillateurs* », CHRONOS, Collection technique et scientifique des télécommunications, MASSON, 1991, pp. 86-89
- [2] C. W. Nelson, F. L. Walls, M. Siccardi, A. DeMarchi, « *A new 5 and 10 MHz high isolation distribution amplifier* », IEEE Frequency Control Symposium, Boston, USA, 1-3 June 1994, pp. 567-571
- [3] P. Salzenstein, F. Lardet-Vieudrin, P. Vuillemin, G. Martin and V. Giordano, « *Development of a frequency difference multiplier and an isolation amplifier for short term frequency stability measurements* », Proceedings of the 12th International Metrology Congress, Lyon, France, 20-23 June 2005