



HAL
open science

Approche CAO de systèmes optiques-hyperfréquences incluant les performances en bruit

Houda Brahimi, Olivier Llopis

► **To cite this version:**

Houda Brahimi, Olivier Llopis. Approche CAO de systèmes optiques-hyperfréquences incluant les performances en bruit. Journées Nationales Microondes, May 2009, Grenoble, France. 4 p. hal-00379669

HAL Id: hal-00379669

<https://hal.science/hal-00379669>

Submitted on 29 Apr 2009

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.

Approche CAO de systèmes optiques-hyperfréquences incluant les performances en bruit

H.Brahimi, O.Llopis

LAAS-CNRS, Université de Toulouse ; 7 avenue du Colonel Roche, F-31077 Toulouse, France
hbrahimi@laas.fr

1. Introduction

Les composants optoélectroniques sont de plus en plus utilisés dans les systèmes microondes. Les liaisons par fibres optiques, permettent par exemple une réduction significative de la taille et de la masse des systèmes de distribution de signaux à bord des systèmes embarqués (avion, satellite, radar,...).

Cependant, les performances de ces systèmes dépendent des performances des dispositifs utilisés pour les conversions électrique/optique et optique/électrique, de la technique de modulation optique choisie, des amplificateurs micro-ondes utilisés, de la qualité de la fibre optique et, finalement, de la topologie choisie pour réaliser le système entier. Ceci explique l'importance de développer une approche de modélisation efficace pour ces systèmes, capable de traiter des configurations très différentes dans un temps raisonnable. Grâce à cette approche, nous pourrions en particulier déterminer les principales sources de bruit dans le système et aussi améliorer les performances de ce système en réduisant ces sources de bruit ou leur impact sur le bruit de phase. Nous avons donc tenté une approche de modélisation utilisant un logiciel dont nous disposons au laboratoire : le logiciel Agilent ADS. Il s'agit d'un logiciel de simulation de circuits hyperfréquences, comprenant différentes méthodes d'analyse du bruit dont le bruit de conversion (bruit dans les circuits non linéaires). L'originalité ici est de pouvoir simuler des composants optoélectroniques avec ce logiciel, en les décrivant avec des équivalents électriques ou mathématiques.

2. Étude d'une liaison optique utilisant un modulateur de Mach Zehnder : Gain RF

Nous nous sommes focalisés tout d'abord sur la réponse en puissance du Modulateur de Mach Zehnder (MMZ), ou plus exactement sur la simulation d'un lien optique complet utilisant ce modulateur et sur la simulation de la non-linéarité du système de transmission optique-hyperfréquence ainsi constitué [1]. Les résultats issus de la simulation sont ensuite comparés aux données expérimentales et aux modèles analytiques dont nous disposons [2], [3]. La figure 1 représente la réponse en puissance du MMZ, telle quelle est décrite dans le simulateur. Il s'agit bien d'une courbe de réponse non-linéaire, qui va générer des harmoniques en fort signal, et

même à faible signal suivant le choix du point de polarisation.

Deux types de modulations ont été étudiées : 1) la modulation classique du MMZ au voisinage de $V_{\pi/2}$, c'est-à-dire en régime linéaire à bas niveau (ML) ; 2) la modulation autour de V_{π} , correspondant à l'annulation de porteuse et à un doublement de fréquence pour la transmission micro-onde (DSB-CS).

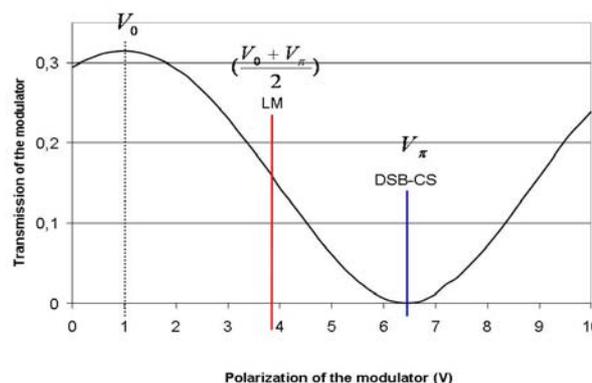


Figure 1: Réponse en puissance optique du MMZ en fonction de la tension de polarisation

La source optique est décrite par une simple source RF de la bibliothèque d'ADS (avec une fréquence de 200 THz).

Le MMZ est décrit sous la forme d'une équation mathématique à l'aide d'un composant non-linéaire d'ADS (un « SDD »). Le laser alimente le MMZ, qui reçoit également le signal RF (la fréquence du signal RF est de 10 GHz dans le cas ML et de 5 GHz dans le cas DSB-CS) et la polarisation DC. En sortie, une photodiode effectue une détection quadratique et délivre le signal sur une charge (cf. Figure 2).

Les paramètres d'entrée du modèle sont les pertes optiques L_{ins} , les tensions V_0 et V_{π} du MMZ, la sensibilité S de la photodiode ainsi que les réponses en fréquence du MMZ et de la photodiode.

La figure 3 montre le résultat d'une simulation ADS concernant la puissance RF de sortie en fonction de la puissance RF d'entrée pour ce système (lien optique avec MMZ) pour les deux types de modulations étudiées.

Les résultats sont en accord avec les mesures et avec les modèles analytiques jusqu'à des puissances RF assez élevées [2], [4], [5]. Toutefois, à très forts niveaux (aux alentours de 20 dBm), et en particulier dans le cas de la

modulation linéaire, des différences entre les simulations et les mesures sont apparues. Ces différences peuvent être dues aux effets thermiques dans le MMZ aux fortes puissances de modulation. Une étude est toujours en cours, afin de déterminer la cause de cette divergence.

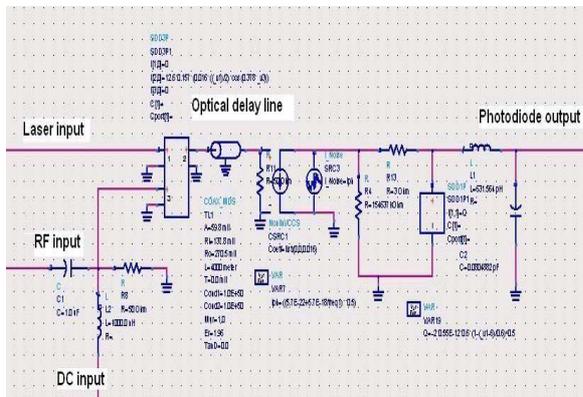


Figure 2: Modèle SDD du MMZ et modèle de la photodiode

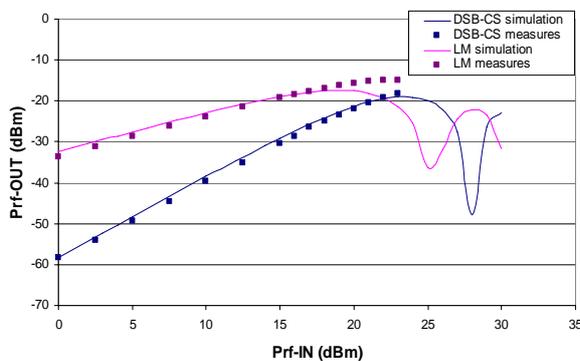


Figure 3 : Mesures et simulation ADS de la liaison optique à MMZ pour les deux types de modulation ($f_{RF\ out} = 10\text{ GHz}$)

L'interférence optique générée par le MMZ peut être également décrite par un modulateur de phase existant dans la bibliothèque d'ADS [1]. Le principal inconvénient de cette approche est que cet élément ne peut être utilisé qu'avec la simulation d'enveloppe. Or, la technique d'enveloppe traite les hyperfréquences comme une modulation par rapport au signal optique. Cependant, la réalité est plus complexe et nous avons en fait trois gammes de fréquences importantes dans cette étude : le continu, la fréquence RF et le voisinage de la porteuse optique. Décrire la porteuse micro-onde comme une modulation lente interdisait l'accès à la dernière bande de fréquence (la bande de base) pour des simulations de bruit, et en particulier la simulation de la conversion du bruit en $1/f$.

Pour cette raison, nous avons préféré une approche de modélisation qui ne donne aucun rôle prioritaire à chacune de ces trois fréquences fondamentales du système. La description mathématique de l'interféromètre du MMZ sous une boîte noire unique (SDD) autorise l'utilisation de la balance harmonique sous autre outil spécifique pour le calcul de la fonction de transfert RF, ce qui est parfaitement adapté à la

deuxième partie de l'étude qui concerne la simulation du bruit du système, et en particulier la simulation du bruit de phase.

La figure 4 décrit les processus de conversion en bruit en régime non-linéaire entre les trois différentes porteuses et leurs harmoniques.

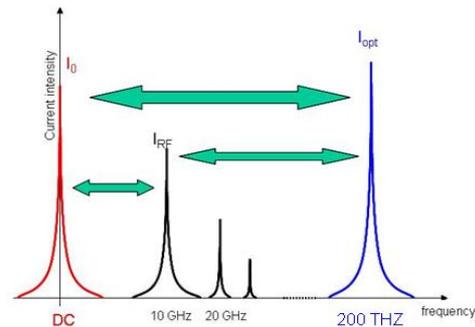


Figure 4: Processus de conversion en bruit entre différentes porteuses (DC, RF et l'optique) en simulation HB

3. Modélisation d'une liaison optique à base d'un MMZ: bruit RF et bruit de phase

Un de nos objectifs étant la simulation d'un oscillateur opto-électrique et de l'ensemble de ses composantes en bruit, il était donc essentiel d'introduire le bruit dans nos simulations. Comme il a été mentionné auparavant, l'intérêt d'utiliser le logiciel ADS pour cette étude réside principalement dans ses capacités à décrire les conversions de bruit en régime non-linéaire entre différentes porteuses. Dans ce cas, le laser sera décrit par une source de fréquence avec son bruit de phase associé, suivi d'un modulateur AM pour décrire son bruit d'amplitude (RIN). La figure 5 représente le modèle du laser et ses deux contributions au bruit implémenté sous ADS. Quant au modèle de la photodiode, il comprend une source de bruit Schottky et une source de bruit en $1/f$. Les valeurs de ces grandeurs sont déterminées à partir des mesures [3], [1].

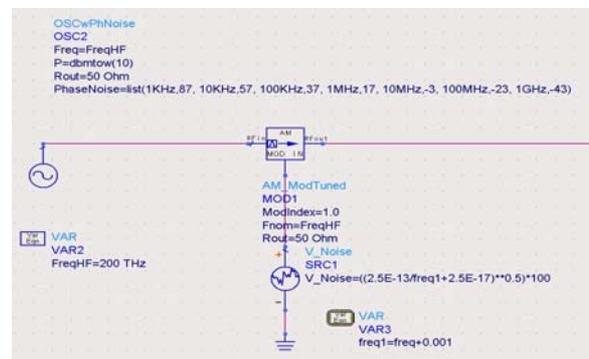


Figure 5: Modèle du laser implémenté sous ADS

La figure 6 représente le résultat de simulation de la composante de bruit autour du DC, divisée par la porteuse DC. On retrouve le RIN du laser (tel qu'il a été

défini dans le modèle du laser). L'affaiblissement en bout de bande (au voisinage de 10 GHz de ce spectre) est lié à la réponse en fréquence de la photodiode. L'intérêt de cette simulation est de pouvoir déterminer le plancher de bruit de phase de la liaison optique correspondant au rapport signal/bruit RF. Ce plancher peut être calculé à partir de la valeur du RIN à 10 GHz et de l'amplitude du signal RF en sortie à cette même fréquence.

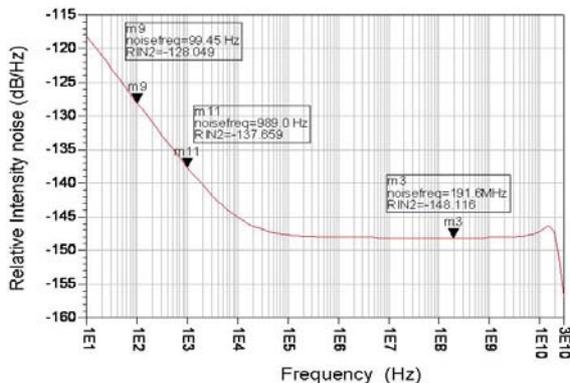


Figure 6: Bruit d'intensité relatif (RIN) simulé autour de la fréquence nulle (DC)

La figure 7 représente le résultat de la simulation en bruit de phase « pnm » et en bruit d'amplitude « anmx » autour de la porteuse RF à 10 GHz. Contrairement au résultat en bande de base, c'est-à-dire autour de l'harmonique DC (cf. figure 6), aucune composante de bruit en $1/f$ n'est visible sur la simulation du bruit de phase, et une composante en $1/f$ relativement faible est observée sur la simulation du bruit AM. Par contre, le plancher de bruit de phase observé correspond au rapport signal/bruit précédemment calculé à partir de la composante de bruit autour du DC.

L'absence de bruit de phase en $1/f$ nous a intrigué, surtout qu'au niveau expérimental, une composante de bruit de phase en $1/f$ était bien observée en sortie de ce type de liaison [2], [6], [7].

Au départ, le modèle comprenait uniquement le bruit d'amplitude en $1/f$ du laser et la non-linéarité du MMZ. Nous avons ajouté dans un premier temps les non-linéarités et les composantes de bruit associées à la photodiode. La conversion en bruit de phase au niveau de ce composant est possible, à condition qu'un élément réactif intervienne pour déphaser le signal (des éléments résistifs seuls ne génèrent pas de bruit de phase). Cet élément réactif peut être constitué par la capacité de la diode, qui est d'ailleurs elle-même non-linéaire. Une telle capacité non-linéaire est susceptible de convertir vers la fréquence RF des composantes de bruit en $1/f$ issues de la porteuse optique ou du DC (bruit en $1/f$ de la photodiode) [8]. Nous avons également effectué des mesures sur un composant dont nous disposons (photodiode rapide avec accès sous pointes). Le problème est que la capacité de la diode est quasiment constante dans la zone de travail habituelle pour une utilisation en photodiode (polarisation largement en inverse ; -6 V) [1]. Nous avons effectivement constaté que, malgré l'ajout de ces éléments au schéma équivalent, le bruit de phase en $1/f$ restait extrêmement

faible (pour des valeurs réalistes du bruit AM en $1/f$ du laser et de la photodiode). Le bruit FM du laser a ensuite été ajouté au modèle. Toutefois, nous ne disposons pas encore des données sur la composante en $1/f$ de ce bruit. Un banc de mesure spécifique a été mis en place, et nous espérons présenter lors de la conférence la simulation de certains mécanismes associés à ce type de bruit (démodulation du bruit FM par un interféromètre parasite).

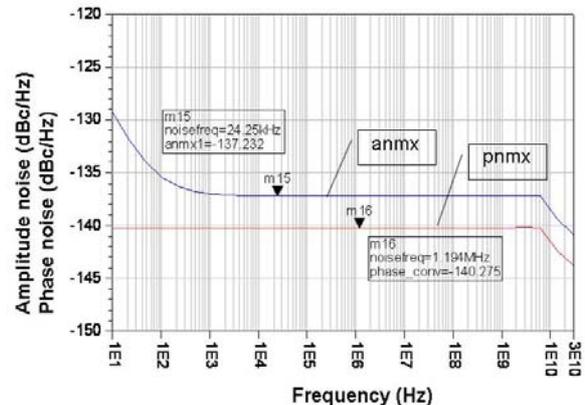


Figure 7 : Bruit de phase et bruit d'amplitude simulés autour de la porteuse RF (10 GHz)

4. Application de l'approche CAO à la modélisation en bruit d'un système complexe: le discriminateur de fréquence microondes à ligne à retard optique

Le système le plus complexe que nous avons été capable de modéliser jusqu'à maintenant, avec notre approche de CAO, est le banc de bruit de phase microonde à ligne à retard optique. Ce système a été réalisé au sein de notre laboratoire et a été décrit plus en détail dans un autre article [2].

L'objectif de la modélisation de ce système est la description des phénomènes de bruit déterminant le plancher de mesure de bruit de phase, et donc la possibilité ultérieure d'optimiser ce plancher de bruit.

La mesure du plancher de bruit de phase de ce type de système reste cependant assez délicate.

L'approche classique supprimait la ligne à retard, afin d'annuler la sensibilité du système au bruit de phase de la source. Cette technique est valable pour les discriminateurs de fréquence microondes classiques car la ligne à retard hyperfréquence n'apporte aucune contribution au bruit (ligne passive). Toutefois, dans le cas du discriminateur optique-microonde, il faut tenir compte du bruit qui peut être rajouté par la bobine de fibre optique. En effet, des phénomènes de dispersion, des réflexions parasites (bruit interférométrique) ou des non-linéarités peuvent, dans le cas de la fibre optique, amener une contribution directe au bruit de phase. Il est donc essentiel de caractériser en bruit le système complet, incluant la ligne à retard optique.

La seule technique dans ce cas consiste en l'utilisation d'une source à très haute pureté spectrale. Un oscillateur saphir microonde a donc été utilisé pour vérifier la

capacité du banc de mesure opto-hyper à caractériser les sources à très faible bruit de phase. Nous disposons d'un oscillateur de ce type à 4.86 GHz, réalisé en associant un amplificateur SiGe à faible bruit de phase et un résonateur saphir à modes de galeries (WGM : « Whispering gallery mode ») présentant un coefficient de qualité en charge de 60000 [9].

Le bruit de phase de cet oscillateur a préalablement été mesuré à l'aide d'un analyseur de signal Agilent E5052. Cet appareil, basé sur la technique de corrélation de deux oscillateurs de référence, présente en effet une sensibilité suffisante pour le test d'une telle source, du moins au voisinage de la porteuse (jusqu'à 2 kHz environ). Ensuite, l'oscillateur a été connecté au discriminateur de fréquence opto-microonde (cf. Figure 8). Le résultat de mesure du bruit de phase de cette liaison est représenté sur la figure 9. Cette mesure est réalisée dans une large gamme de fréquences, bien que le premier pic parasite causé par le retard de 4 km soit clairement visible sur la courbe aux alentours de 53 kHz, et empêche la mesure du bruit de phase en son voisinage. La figure 9 compare cette mesure avec la simulation de ce système.

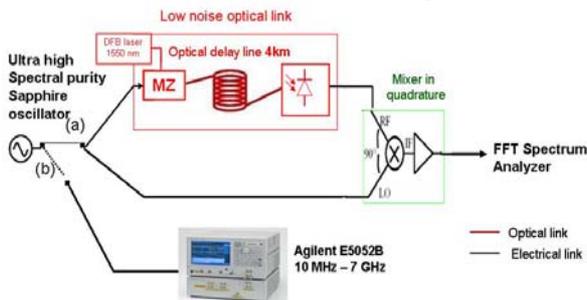


Figure 8 : (a) Caractérisation du plancher de bruit de phase du discriminateur à ligne optique (b) Caractérisation de l'oscillateur saphir avec le banc Agilent

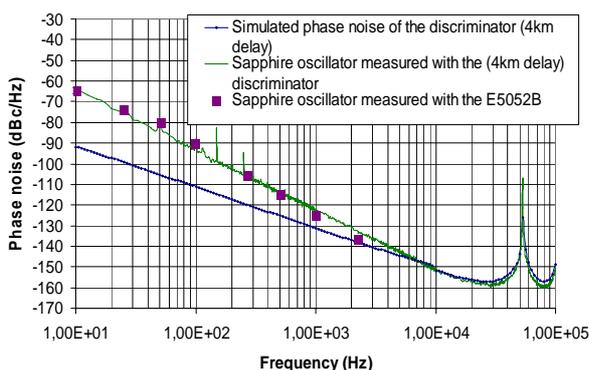


Figure 9 Résultats de la simulation et des mesures du bruit de phase du discriminateur de fréquence opto-hyper (avec ligne à retard de 4km)

Le principe de modélisation de ce système a été présenté dans le paragraphe précédent. La ligne à retard optique y est modélisée par une ligne hyperfréquence idéale de la bibliothèque d'ADS avec un indice de réfraction n de 1.46 et une longueur L de 4km.

Sur la courbe du plancher de bruit de phase du discriminateur simulé, l'absence de composante en $1/f$ est évidemment un peu trop optimiste (et non physique).

Toutefois, le bruit simulé au-delà de 10 kHz correspond bien au bruit mesuré.

5. Conclusion

Notre approche de modélisation est capable de décrire les paramètres principaux d'une liaison optique-hyperfréquence comme le gain en puissance ou le rapport signal à bruit. La simulation du bruit de phase additif de la liaison optique a aussi été réalisée, mais le résultat obtenu n'est pas encore satisfaisant en ce qui concerne la composante en $1/f$ autour de la porteuse RF. Cette approche est appliquée aujourd'hui à la modélisation de systèmes optiques microondes complexes. Elle a permis de décrire avec succès le comportement d'un discriminateur de fréquence à ligne à retard optique, et sera utilisée pour la modélisation des oscillateurs optiques-microondes.

6. Bibliographie

- [1] H. Brahimi, P.H. Merrer, O. Llopis, "CAD of microwave optical systems for time&frequency applications" Proc. of the European Frequency and Time and Forum (EFTF), Toulouse, April 2008.
- [2] B. Onillon, S. Constant, O. Llopis, "Optical links for ultra-low phase noise microwave oscillators measurement", Proc. of the IEEE Int. Freq. Control Symposium, Vancouver, 2005, pp. 545-50.
- [3] B. Onillon, S. Constant, G. Quadri, B. Benazet, O. Llopis, "Optical-microwave links for LO distribution in space systems", Proc. of the EuMA, 1(3), special issue on microwave for space, 2005, pp. 206-11.
- [4] Y. Le Guennec, et al. "Performance of interferometric systems for optical processing of microwave signals: influence of laser- and microwave-phase noises", Photonics Technology Letters, IEEE 16(9), Sept. 2004 pp. 2120-22.
- [5] A. Hilt, "Microwave harmonic generation in fiber-optical links", Microwaves, Radar and Wireless Communications. 2000. MICON-2000. 13th International Conference on Volume 2, 22-24 May 2000 pp. 693-98 vol.2.
- [6] E. Rubiola, et al. "Flicker noise in high-speed p-i-n photodiodes", Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on 54(2), Part 2, Feb. 2006, pp.816-20.
- [7] M.-B. Bibey, et al. "Very low phase-noise optical links-experiments and theory", Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on 47(12), Dec. 1999 pp.2257-62.
- [8] J. Dawidczyk, et al., "Investigation of Optical-Microwave Frequency Conversion Processes for PIN Photodiode", 1999, Proc. of EDMO 1999 Symposium, King's College London, p.103-07.
- [9] G. Cibiel et al., "Optimization of an ultra low phase noise Sapphire SiGe - HBT oscillator using nonlinear CAD", IEEE Transactions on Ultrasonics, Ferroelectrics and Frequency control, vol 51, n° 1, Janvier 2004, pp. 33-41