

Modélisation CAO de la multiplication de fréquence par l'optique pour la génération de porteuses en gamme millimétrique

P. Martinet, H. Brahimi, K. Saleh, P.H. Merrer, O. Llopis

CNRS ; LAAS ; 7 avenue du colonel Roche, F-31077 Toulouse, France

Université de Toulouse ; UPS, INSA, INP, ISAE ; LAAS ; F-31077 Toulouse, France

Résumé

Une technique de simulation pour la prédiction des non-linéarités d'une liaison optique est présentée. Cette technique est basée sur un logiciel de CAO hyperfréquence. Elle est ensuite utilisée pour optimiser la génération harmonique dans la bande de fréquence 50-60 GHz.

1. Introduction

Les applications en gamme millimétrique de l'optique guidée sont nombreuses. La plus couramment évoquée est la radio sur fibre à 60 GHz [1], le signal se propageant dans ce système alternativement par la fibre (moyenne distance) ou en espace libre (courte distance). Une seconde application est la génération de signaux hyperfréquence à haute pureté spectrale par l'optique. En effet, certains résonateurs optiques, comme des minidisques monocristallins ou des boucles fibrées faiblement couplées [2], présentent en optique des coefficients de qualité exceptionnels ($\sim 10^9$ à 10^{11}). Les performances de ces résonateurs sont transposables en hyperfréquences, mais la performance conservée est la largeur à 3 dB du résonateur. Le coefficient de qualité d'un tel résonateur est donc bien meilleur en gamme millimétrique qu'aux fréquences basses des micro-ondes. Toutefois, pour être à même de l'utiliser, il faut définir une technique de modulation qui permette d'exciter efficacement deux modes successifs du résonateur espacés de plusieurs dizaines de GHz. D'autre part, pour être utilisable effectivement dans cette application, cette technique de modulation doit conserver un excellent rapport signal/bruit.

Nous présentons dans cette communication différentes approches de génération hyperfréquence d'oscillateurs locaux à 50 GHz ou 60 GHz sur porteuse optique. Ces approches utilisent les non-linéarités d'un modulateur de Mach-Zehnder (MZ) conventionnel, c'est-à-dire initialement prévu pour une utilisation à des fréquences inférieures à 20 GHz. Ces approches ne sont pas nouvelles : elles ont été utilisées avec succès jusqu'à des fréquences de l'ordre de 100 GHz [3,4], voire même 200 GHz [5] sous certaines conditions.

Plusieurs techniques de modulation sont tout d'abord testées à l'aide d'une approche de modélisation originale [6] développée sur le logiciel Agilent ADS, puis

comparées aux résultats expérimentaux. Les résultats sont proches de ceux obtenus par des approches conventionnelles (analytiques) de modélisation de ce type de modulateur [7-9], y compris pour la génération harmonique [10]. Un bilan est ensuite effectué pour l'application, définissant ainsi les conditions les plus appropriées pour l'obtention de la performance visée, en particulier en termes de rapport signal/bruit.

2. Simulation de la multiplication de fréquence RF à l'aide d'un modulateur de Mach-Zehnder

La liaison optique étudiée est une liaison conventionnelle utilisant pour l'émission un module laser DFB (Mitsubishi), suivi d'un modulateur de MZ (JDSU) et, à la réception, une photodiode rapide. Contrairement au modulateur, la photodiode doit permettre la conversion de fréquences très élevées, et nous avons opté pour une photodiode 75 GHz (U2T).

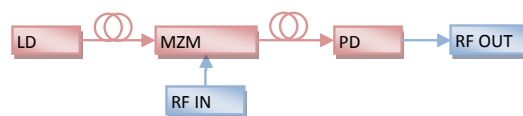


Figure 1. Liaison optique étudiée ; $f_{RFout} = N f_{RFin}$

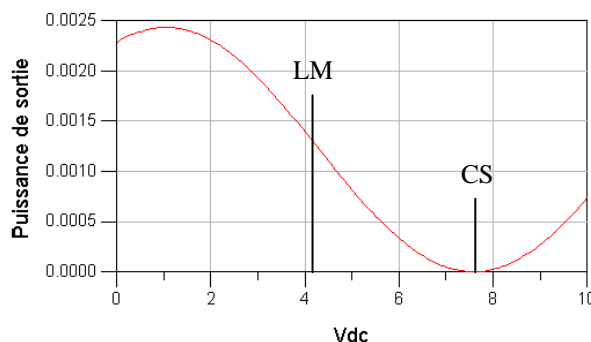


Figure 2. Caractéristique du modulateur MZ

La courbe caractéristique du modulateur de Mach-Zehnder est représentée en Figure 1. On distingue deux points de polarisation classiquement utilisés : la

modulation linéaire (LM), au voisinage de $V_{\pi/2}$, et la modulation à suppression de porteuse (CS), au voisinage de V_{π} .

Dans le premier cas (LM), lorsque le MZ est attaqué par le signal RF, la fonction de transfert est une fonction impaire et seuls les harmoniques impairs sont excités. A bas niveau RF, la modulation est quasi linéaire, puis à fort niveau, les harmoniques 3, 5... apparaissent. Dans le deuxième cas (CS), la fonction de transfert est une fonction paire et seuls les harmoniques pairs du signal RF sont générés : 2, 4, 6...

Le modèle du système développé sous ADS a déjà été décrit dans une publication précédente [6]. Il utilise, pour le modulateur MZ, une boîte noire (SDD) incluant l'équation non-linéaire en $1+\cos x$ représentée en Figure 2. La photodiode est quant à elle décrite par un simple détecteur quadratique. Le laser infrarouge est une simple source RF à 200 THz, la technique de simulation (balance harmonique) autorisant le traitement de signaux à des fréquences très différentes (en l'occurrence : DC, 10 GHz et 200 THz). Lors du fonctionnement non-linéaire, les harmoniques du signal à 10 GHz sont pris en compte par le logiciel. Enfin, des éléments passifs de type filtre passe bas sont ajoutés en entrée du modulateur et en sortie de photodiode pour rendre compte des fréquences de coupure de ces deux composants.

Les Figures 3 et 4 représentent la fonction de transfert simulée et mesurée de la liaison optique pour les deux cas de modulation étudiés (LM et CS), et pour deux fréquences d'entrée (10 GHz et 15 GHz). L'accord entre théorie et expérience est excellent, du moins dans la gamme des puissances accessibles par la mesure. Le seul décalage significatif est observé sur l'harmonique 5 dans le cas de la modulation LM. Ces courbes valident notre approche, et permettent d'envisager son utilisation pour l'optimisation du système complet.

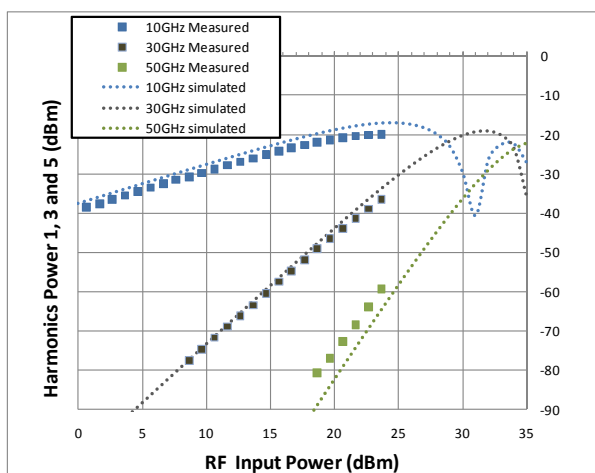


Figure 3. Puissance des harmoniques en sortie pour la modulation LM à 10 GHz

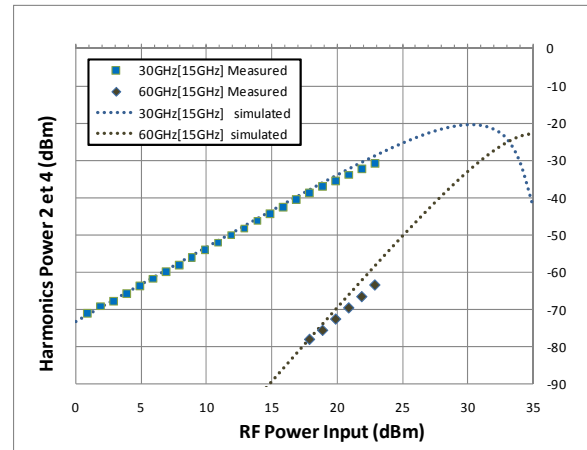


Figure 4. Puissance des harmoniques en sortie pour la modulation CS à 15 GHz

3. Optimisation de la génération 50-60 GHz

Nous avons retenu, pour la génération de signaux sur porteuse optique dans cette gamme de fréquence, quatre cas : la multiplication par 3 en modulation LM et avec une fréquence d'entrée de 16.6 GHz (sortie à 50 GHz) ou de 20 GHz (sortie à 60 GHz) ; la multiplication par 4 en modulation CS avec une fréquence d'entrée de 12.5 GHz (sortie à 50 GHz) ou de 15 GHz (sortie à 60 GHz).

La Figure 5 représente le bilan des simulations et des mesures menées dans ces quatre configurations. Il apparaît clairement que, à bas niveau, le choix de la multiplication par 3 est nettement plus efficace. A fort niveau d'attaque RF, ces différences s'estompent, mais il faut remarquer que le modulateur est spécifié pour une puissance RF d'attaque maximale de 27 dBm.

A la vue de ces résultats, nous avons choisi pour la suite de notre travail d'approvisionner un amplificateur présentant une puissance de sortie sur 50 Ω de 25 dBm sur la plage de fréquence 10-20 GHz. Un tel niveau d'attaque du modulateur doit nous permettre d'atteindre -40 dBm de puissance en sortie de photodiode à 50 GHz ou -45 dBm à 60 GHz.

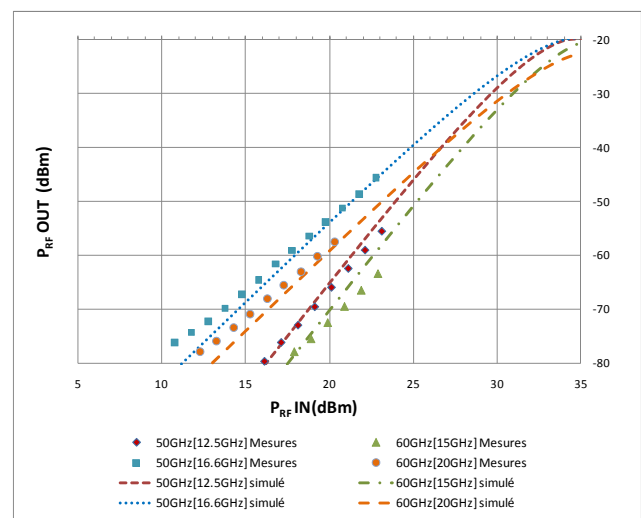


Figure 5. Puissance en sortie à 50 GHz et 60 GHz pour les quatre cas de modulation étudiés

Au final, le véritable élément discriminant pour notre application reste le rapport signal à bruit (ou Carrier to Noise Ratio - CNR en anglais). Il sera toujours possible en effet d'amplifier le signal en sortie de photodiode, mais on restera limité par le CNR de la liaison optique. La simulation de ce paramètre avec ADS ne pose pas de problème particulier (alors que l'approche expérimentale pour mesurer le CNR à 60 GHz est relativement complexe).

Nous avons pu démontrer que l'utilisation d'un signal d'attaque RF de 25 dBm permettait d'obtenir un CNR supérieur à 120 dB, ce qui est suffisant pour notre application (voir Figure 6).

Nous avons aujourd'hui mis en place un système de mesure de bruit de phase dans cette gamme de fréquence qui doit nous permettre de vérifier expérimentalement ce résultat, et également d'évaluer la composante de bruit de phase en $1/f$ d'une telle liaison à multiplication de fréquence. Le résultat expérimental en bruit sera présenté lors de la conférence.

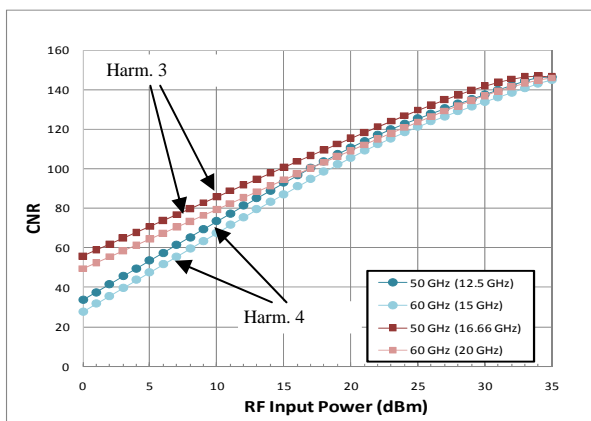


Figure 6. Rapport signal/bruit simulé sur ADS pour la génération de signaux à 50 GHz et à 60 GHz, utilisant l'harmonique 3 en modulation LM et l'harmonique 4 en modulation CS

4. Conclusion

L'approche de simulation sous ADS d'une liaison optique nous a permis de simuler avec succès l'attaque à fort niveau d'un modulateur MZ et la génération d'harmoniques dans la gamme 50-60 GHz à l'aide de ce modulateur. L'intérêt de la simulation est de fournir une information pour des niveaux de puissance qui n'étaient pas accessibles lors de la mesure, ainsi que de permettre la simulation en bruit. La configuration optimale pour l'application a ainsi été déterminée : un travail en modulation LM sur l'harmonique 3 et avec une puissance d'attaque du MZ de 25 dBm. De nouvelles mesures sont en cours, à plus forte puissance et en bruit, pour vérifier expérimentalement ces prédictions.

Cette étude, pour son application aux OEO, rentre dans le cadre d'un programme ANR, projet « ORA » 2010 BLAN 0312 03.

5. Bibliographie

- [1] C. Lim, B. Masuduzzaman, Y. Yizhuo, "Fiber-Wireless Networks and Subsystem Technologies", Journal of Lightwave Technology, Feb. 2010. - 4 : Vol. 28, pp. 390-405.
- [2] P.H. Merrer, A. Bouchier, H. Brahimi, O. Llopis, G. Cibiel, "High-Q optical resonators for stabilization of high spectral purity microwave oscillators" European Frequency and Time Forum – IEEE International Frequency Control Symposium (EFTF-IFCS 2009), Besançon (France), 21-14 Avril 2009, pp. 866-869..
- [3] H. Kiuchi, T. Kawanishi, M. Yamada, Sakamoto, M. Tsuchiya, J. Amagai, M. Izutsu, "High Extinction Ratio Mach-Zehnder Modulator Applied to a Highly Stable Optical Signal Generator", Microwave Theory and Techniques, IEEE Transactions on, Vol. 55, Issue 9, 2007, pp 1694-1972.
- [4] R.W. Ridgway, D.W. Nippa, S. Yen, "Data transmission using phase-shift keying on a 92 GHz carrier", IEEE Microwave Photonics 2009. MWP09. International Topical Meeting on, pp. 1-4
- [5] Po-Tsung Shih et al., "Optical Millimeter-Wave Signal Generation Via Frequency 12-Tupling" Journal of Lightwave Technology, Vol. 28, no. 1, January 2010, pp. 71-78.
- [6] H. Brahimi, H.L. Martinez-Reyes, P.H. Merrer, A. Bouchier, O. Llopis, "A CAD approach of microwave optical systems including noise performance", Proc. of the 2009 European Microwave Conf., Rome, oct. 2009, pp. 1642-1645.
- [7] E.L. Wooten, E.J. Murphy, D. Maack, "A review of lithium niobate modulators for fiber optic communications system", Quantum Electronics. - IEEE, 2000. - 1 : Vol. 6. - pp. 69-82.
- [8] P. Zandano, M. Pirola, G. Ghione, "A new compact model for high-speed electro-optic modulators fully integrated within a microwave CAD environment", 2001 IEEE MTT-Symposium Digest, pp. 559 – 562.
- [9] H. Chung, W.S.C. Chang, E.L. Adler, "Modeling and optimization of traveling wave LiNbO3 interferometric modulators", IEEE Journal of Quantum Electronics, Vol. 27, no 3, Mar. 1991, pp. 608-617 .
- [10] A. Hilt, "Microwave harmonic generation in fiber-optical links" Microwaves, Radar and Wireless Communications 2000. MIKON-2000. 13th International Conference on., Volume 2, May 2000, pp. 693-698.