

Utilisation des formes d'ondes temporelles sur amplificateur de puissance : contribution à la production de modèle de vol en grande série pour applications spatiales

Tibault Reveyrand¹, Marc Zoyo², Jean-Luc Roux³, Denis Barataud¹, Jean-Michel Nébus¹, Jean Luc Muraro², Jean Louis Cazaux²

¹XLIM CNRS UMR 6172, 123 Av. Albert Thomas, 87000 Limoges

²Thales Alenia Space, 26 Av. Jean François Champollion, 31100 Toulouse

³CNES Toulouse, 18 Av. Edouard Belin, 31055 Toulouse
tibault.reveyrand@xlim.fr

Résumé

L'objectif de ces travaux s'inscrit dans la thématique de l'amélioration de la qualité des équipements hyperfréquence et plus particulièrement les amplificateurs de puissance pour application spatiale. Il répond à une préoccupation exprimée par les utilisateurs d'optimiser les coûts de production en minimisant les temps de réglage.

Notre objectif nécessite la maîtrise du design et des contraintes électriques appliquées au transistor. Pour cela nous allons nous appuyer sur une technique de mesure de formes d'ondes temporelles (FOT) que nous allons associer, dans un premier temps, à des mesures d'électroluminescence.

1. Introduction

Les modules amplificateurs RF de puissance sont constitués de transistors à fort développement de grille mis en parallèle. Ces modules nécessitent des réglages précis afin d'obtenir l'optimum en performance (rendement, linéarité) tout en respectant les règles de derating qui garantissent leur fiabilité. Toutefois, en raison de la dispersion entre composants et des dispersions de fabrication (report, câblage) il existe avant réglage des déséquilibres électriques entre transistors pouvant nécessiter des temps de réglage plus longs.

Sur le plan de la fiabilité, il est également très difficile de vérifier par des mesures que l'excursion RF du signal au plus près des transistors n'excède pas les limites définies (Safe Operating Area, règles de derating).

L'action proposée a pour objectif d'étudier les mécanismes mis en jeu lors de la mise en parallèle de transistors ou de modules de puissance.

Pour cela deux techniques d'analyse complémentaires seront mises en œuvre et comparées:

- l'électroluminescence qui permet de quantifier les recombinaisons des porteurs dans le semi-conducteur et qui produira une image de l'intensité du champ électrique local ;

- la mesure des formes d'ondes temporelles qui permet de mesurer la valeur des courants et tensions le plus proche possible de chaque transistor.

Les sorties attendues de cette action sont importantes et adressent plusieurs aspects complémentaires :

1. l'amélioration des modèles électriques des transistors ou des MMICs ;
2. une meilleure compréhension des mécanismes réellement mis en jeu dans la recombinaison de plusieurs composants RF de puissance et qui sont au cœur de la performance finale ;
3. l'optimisation de la production des SSPA (équipement d'amplification de forte puissance) conduisant à une diminution des temps de réglage ;
4. l'évaluation de techniques d'analyse nouvelles qui pourront également bénéficier aux fondeurs et aux agences dans la perspective d'améliorer les règles de derating*.

* le derating, pour les applications spatiales consiste à ne pas dépasser un pourcentage des valeurs électriques maximales fournies par le fondeur. Cette règle est parfois contraignante car elle peut limiter de façon significative les performances des produits hyperfréquences.

2. Description des travaux

8 amplificateurs de puissance 40 watts en bande S ont été fabriqués. Ces amplificateurs sont issus de la filière modèle de vol de Thales Alenia Space de façon à éviter d'éventuels écarts qui pourraient résulter d'une fabrication en filière prototype.

Chaque amplificateur est constitué de 4 transistors FET à base d'arséniure de gallium. Les modules réalisés suivront le processus itératif décrit figure 1. Le point de fonctionnement utilisé pour les mesures est non représentatif de celui appliqué en vol (au-delà du point nominal appliqué en vol) mais nécessaire pour faire apparaître l'électroluminescence des transistors avec laquelle nous souhaitons effectuer des analyses de corrélation. La figure 2 présente un exemple typique des

résultats obtenus.

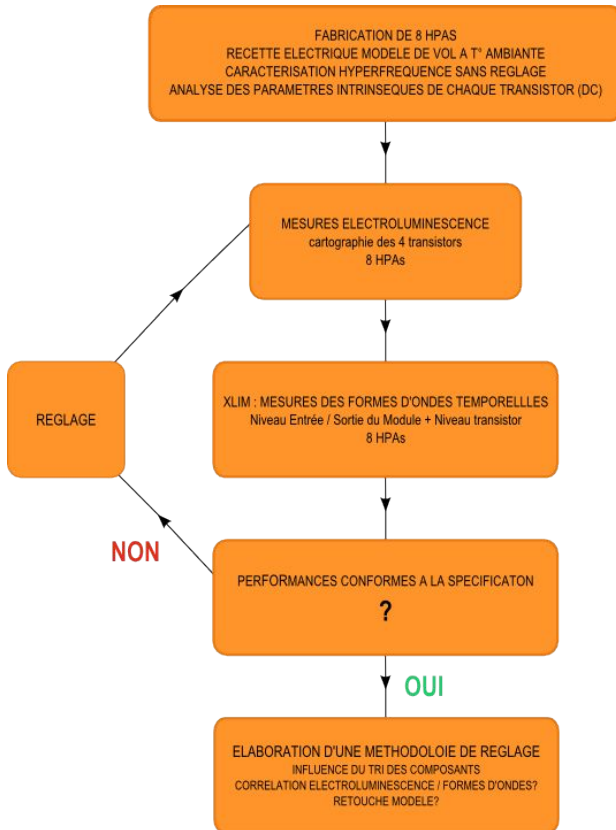


Figure 1. Description de la méthodologie

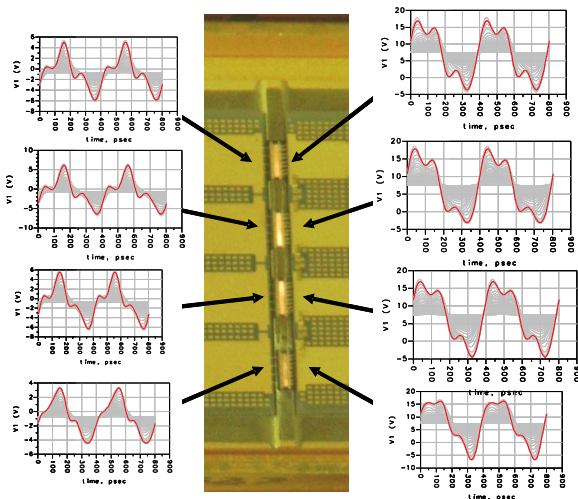


Figure 2. FOT et électroluminescence

3. Banc de mesure

3.a. Le LSNA

Le LSNA repose sur un processus de sous échantillonnage l'onde RF subie une compression et une translation d'un point de vue spectral. La fréquence de l'onde RF doit être inférieure à 40GHz. Le sous échantillonnage fournira une image de cette onde dans une bande de 10 MHz afin d'être acquis par un ADC

dont la fréquence d'échantillonnage est de 20MHz. Le processus de sous échantillonnage étant linéaire, il peut être appliqué à un sous échantillonnage harmonique permettant l'obtention d'un fondamental et de quelques harmoniques au même titre que l'équilibrage harmonique lors de simulations circuit.

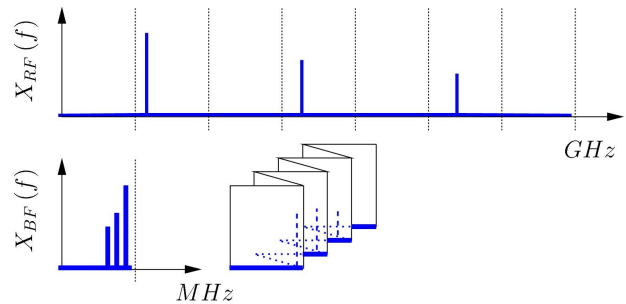


Figure 3. Principe de sous échantillonnage d'un signal RF $x(t)$ réalisé par un sampleur RF dont le LSNA est doté. Un spectre harmonique de plusieurs dizaines de GHz se retrouve intégralement dans une bande de 10MHz.

Dans notre cas, nous nous intéressons à un quadripôle à mesurer. Souhaitant connaître tension et courants aux ports d'entrée et de sortie du dispositif sous test, le sous échantillonnage est fait par 4 sampleurs RF indépendants. Le LSNA peut donc être vu comme un VNA pouvant mesurer simultanément et de façon étalonnée les ondes a_1, b_1, a_2 et b_2 d'un dispositif sous test ainsi que leurs harmoniques [1]. Afin d'y adjoindre une sonde haute impédance (HIP) [2], un switch RF est placé sur un des canaux permettant alors de basculer entre une mesure de type VNA (via les coupleurs) et une mesure « oscilloscope RF » via la sonde haute impédance. L'onde de référence de phase des signaux temporels dans les deux cas est une mesure commune : le fondamental de la tension de sortie. Ainsi, les deux types de mesure sont synchrones. Une description détaillée du principe de mesure a été publiée dans [3]. L'utilisation du LSNA plutôt qu'un oscilloscope permet de s'affranchir de la connaissance des paramètres [S] de la sonde HIP et de multiples connexions/déconnexions [4]. La matrice d'erreur du LSNA qui relie les tensions/courant RF au mesures brutes basse fréquence (r_i) est exprimé pour chaque fréquence d'analyse tel que :

$$\begin{pmatrix} v_1 \\ i_1 \\ v_2 \\ i_2 \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} \alpha_1 & \beta_1 & 0 & 0 \\ \gamma_1 & \delta_1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \alpha_2 & \beta_2 \\ 0 & 0 & \gamma_2 & \delta_2 \end{bmatrix} \cdot \begin{pmatrix} r_1 \\ r_2 \\ r_3 \\ r_4 \end{pmatrix}$$

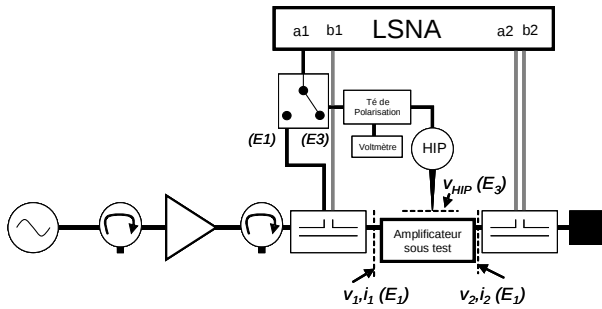


Figure 4. Banc de mesure pour la caractérisation des FOT aux accès des 4 transistors présents dans l'amplificateur sous test.

Le commutateur connecté au canal a_1 du LSNA est en position (E1). Dans un premier temps un étalonnage absolu coaxial est réalisé. Il correspond à la matrice d'erreur $[E_1]$ définie par 8 termes d'erreur selon l'équation précédente. Les plans de référence sont les connecteurs coaxiaux qui seront reliés à l'amplificateur sous test lors des mesures. Dans un second temps, on relie les connecteurs coaxiaux à des pointes GSG afin de réaliser un second étalonnage absolu sous pointe. On obtient alors une matrice d'erreur $[E_2]$. Enfin, le commutateur RF est basculé en position (E3) afin de pouvoir étalonner la sonde HIP. La sonde HIP est placée au plus près de la sonde GSG du port 2 (étalonné selon $[E_2]$) sur la ligne « Thru ». L'étalon est alors la valeur v_2 corrigée par la matrice $[E_2]$ [3].

On en déduit la matrice d'erreur E_3 de ce système hybride (port 1 en HIP et port 2 en GSG).

3.b. Mesure des FOT

Les mesures sont réalisées en balayant la puissance d'entrée présentée à l'amplificateur sous test. Pour chaque point de mesure, le commutateur est commuté. Une première position du commutateur permet d'avoir les FOT dans les plans coaxiaux via la matrice $[E_1]$ tandis que la seconde position fournit la forme de v là où est positionnée la sonde HIP (au plus près des transistors) grâce à la matrice d'erreur $[E_3]$.

L'ensemble des mesures est sauvegardé au format data-set d'Agilent ADS afin de faciliter la comparaison avec la simulation de l'amplificateur.

4. Export des mesures temporelles

Les mesures temporelles réalisées à XLIM sont systématiquement fournies sous forme d'un 'data-set' ADS. Le 'data-display' générique permettant d'afficher ces mesures est illustré figure 5. Cette stratégie permet au concepteur, d'une part, de comparer ses résultats de simulation aux mesures dans un même environnement et, d'autre part, de traiter les données mesurées comme bon lui semble en entrant des équations dans une feuille 'data-display'.

Les données de mesure (c'est à dire v_1 , i_1 , v_2 , i_2 et v_{HIP}) sont stockées dans ADS sous forme d'un data-set comme

s'il s'agissait d'une simulation en équilibrage harmonique. Le balayage en puissance, la position de la sonde haute impédance, la polarisation DC du dispositif sous test et éventuellement l'impédance de charge du dispositif sous test apparaissent comme des balayage de variable (bloc « Sweep » dans le cas d'une simulation).

Dans notre cas, la variable v_{HIP} est un tableau défini tel que $v_{HIP}[a ; b ; c]$ avec a , l'index représentant la position de la sonde sur le circuit ; b , l'index du point instantané dans le balayage en puissance opéré et c les fréquences mesurées par le LSNA (grille de fréquence de l'équilibrage harmonique).

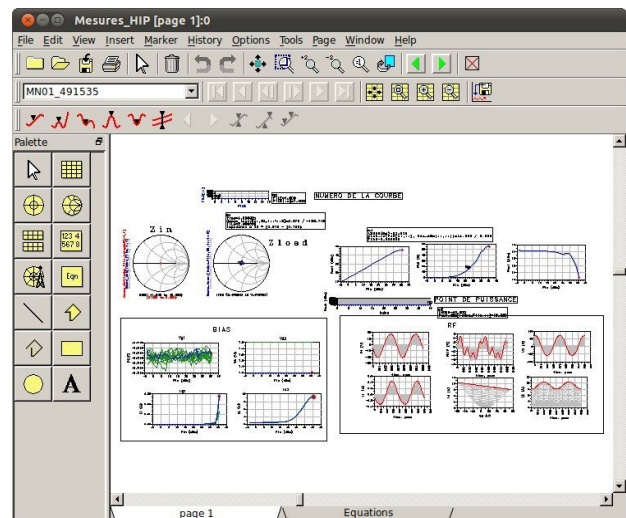


Figure 5. Données principales d'un amplificateur sous test affichées sous Agilent ADS.

5. Résultats

Les premiers résultats obtenus n'ont pas montré de relation évidente entre les FOTs et les mesures d'électroluminescences puisqu'à transistor donné, l'électroluminescence est différente selon le module mais les FOTs sont quasi-identiques. Ces formes temporelles sont illustrées figure 6 et 7. Cependant, en analysant la composante du fondamental RF sur ces formes d'ondes, on constate systématiquement un comportement atypique des transistors. Ces 2 constats nous ont amené à envisager une influence de la position de la sonde HIP sur les FOTs probablement due à un couplage. Initialement, cas de la figure 6, la sonde était perpendiculaire à l'axe du module alors que dans la nouvelle position, dont les FOTs sont illustrées figure 7, la sonde est parallèle à l'axe du module. Les résultats avec la sonde perpendiculaire montrent des résultats plus cohérents, avec des FOTs symétriques, une meilleure corrélation entre les mesures d'électroluminescence et les mesures de Formes d'Ondes Temporelles. De nouvelles mesures vont être mises en œuvre afin d'évaluer plus précisément l'influence de la sonde.

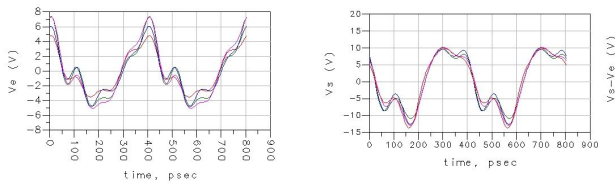


Figure 6. Formes d'ondes temporelles de tension RF (la composante DC n'est pas illustrée) mesurées en entrée et sortie des quatre transistors localisés en parallèle dans un des module sous test au point de compression. La sonde haute impédance est perpendiculaire à l'axe du module.

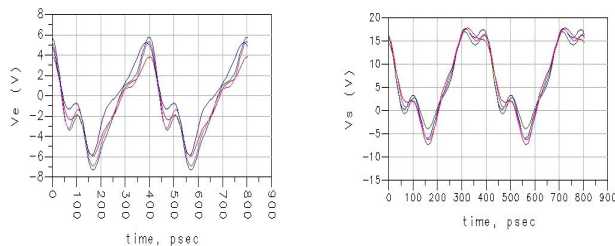


Figure 7. Mesures similaires à la figure 6 mais avec la sonde haute impédance placée parallèlement à l'axe du module.

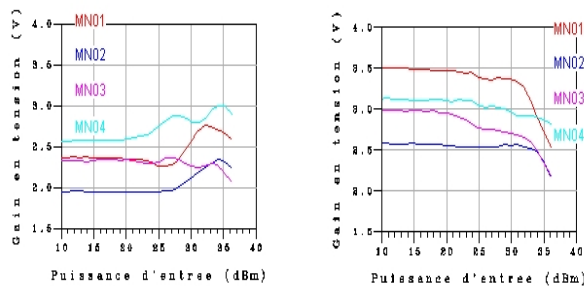


Figure 8. Gain en tension des 4 transistors présents dans le module sous test. A gauche, la sonde HIP est perpendiculaire à l'axe du module. A droite, la sonde est parallèle à l'axe du module. Cette dernière position est physiquement cohérente et doit être utilisée lors de mesures ultérieures.

6. Conclusion

Dans cet article, nous avons présenté une méthodologie innovante alliant une technique de caractérisation originale à une production de modèle de vol pour application spatiale.

A ce jour, trois campagnes de caractérisations ont été réalisées sur l'ensemble des modèles de vol conformément à la méthodologie décrite figure 1. Les résultats sont prometteurs. Toutefois des mesures complémentaires doivent donc être menées afin d'évaluer plus précisément l'influence des éléments parasites (sensibilité des FOTs à la position de la sonde et aux rayonnements, définition de la configuration adéquate).

Ces nouvelles mesures apporteront des informations

significatives pour la compréhension des mécanismes réellement mis en jeu lors de la combinaison de plusieurs transistors au sein d'un amplificateur de puissance et permettront de répondre aux objectifs initialement fixés. (amélioration des modèles électriques, analyse des tensions temporelles maximum dans l'optique d'une application pour les standards d'analyse de fiabilité pour applications spatiales, optimisation de la production avec l'analyse du réglage).

Ces premiers travaux ont démontré la faisabilité de la démarche et seront mis en pratique sur des nouveaux développements.

7. Bibliographie

- [1] J. Verspecht, « *Calibration of a measurement system for frequency nonlinear devices* », Ph.D. dissertation, Vrije Univ., Brussels, Belgium, Nov. 1995.
- [2] Cascade Microtech, « *Fine Pitch Microprobes* », <http://www.cmicro.com/products/probes/signal-integrity/fpm-probe>.
- [3] T. Reveyrand, A. Mallet, J.M. Nébus, M. Vanden Bosshe, « *Calibrated Measurements of Waveforms at Internal Nodes of MMICs with a LSNA and High Impedance Probes* », 62nd ARFTG Conference Digest, Boulder (CO), December 2003, pp. 71-76.
- [4] T. Reveyrand, M. Vanden Bossche, A. Mallet, F. Gizard, D. Barataud, J.M. Nébus, « Mesures étalonnées de formes d'ondes de tension dans un MMIC – Association du Large Signal Network Analyser (LSNA) aux sondes haute impédance (HIP) », 14eme JNM