XXI[èmes] Journées Nationales Microondes
14-17 mai 2019 – Caen

Mesures de Transitoires BF/RF Ultra Rapides (13ns). Application à la Caractérisation de Transistors GaN en Stabilité Pulse à Pulse.

M. Ben-Sassi, G. Neveux et D. Barataud

Univ. Limoges, CNRS, XLIM, UMR 7252, F-87000 Limoges, France
Marwen.ben-sassi@xlim.fr

Résumé – Cet article décrit un système de caractérisation étalonné sous pointes de transistors de puissance GaN pour l'extraction simultanée et cohérente des enveloppes complexes des tensions et courants microondes (RF) et des tensions et courants réels Basses Fréquences (BF) générés par les non linéarités des composants. Les enveloppes complexes RF des tensions et courants aux accès des Dispositifs Sous Test (DST) sont convertis numériquement par Digital Down Conversion (DDC) [1]. Les signaux BF après étalonnage sont obtenus dans les mêmes plans de référence que les signaux RF car le système de mesure est entièrement calibré sur une bande $[DC - f_{RF}]$. Un transistor HEMT GaN a été caractérisé avec une excitation de type rafale radar irrégulière périodique pour deux valeurs de temps de montée et de décente (13ns et 1µs). Une des originalités de cet article réside dans les mises en formes des signaux d'excitation pour éliminer le phénomène de Gibbs [2].

1. Introduction

Les systèmes de télécommunications actuels utilisent des modulations complexes, telles que les rafales radar irrégulières qui permettent la détermination des performances en stabilité Pulse à Pulse (P2P) [3, 4] et qui possèdent un spectre infini. En revanche, les équipements disponibles pour générer ce type de signaux, possèdent des bandes passantes limitées. Ceci provoque l'apparition de phénomènes de Gibbs : des oscillations qui apparaissent sur les formes d'ondes temporelles mesurées alors qu'elles ne font pas partie du signal émis initialement. Cet article montre que les effets du phénomène de Gibbs sur les formes d'ondes temporelles peuvent être considérablement réduits en appliquant des approximations mathématiques sur le spectre du signal de la rafale radar pour obtenir des mesures plus précises du critère de stabilité P2P.

2. Génération d'un train d'impulsions sans oscillation parasite et avec transitoires ultra courts (13ns)

La génération d'une rafale radar irrégulière périodique avec des temps de montée/descente (τ) ultra courts (figure 1) peuvent donner naissance à des phénomènes de Gibbs si le générateur introduit des discontinuités spectrales (limitation en bande). Ce phénomène se produit uniquement lorsqu'une partie du contenu spectral d'un signal est supprimée à la génération ou lors de l'acquisition des données. Les bandes passantes des équipements utilisés pour la génération ou la réception sont toujours limitées et donc conduisent systématiquement à l'obtention de phénomènes de Gibbs. Une comparaison est alors réalisée sur deux trains d'impulsions avec des temps de montée/descente (τ) différents (cas (a) : 13ns et cas (b) : 1µs) comme présenté sur la figure 1.

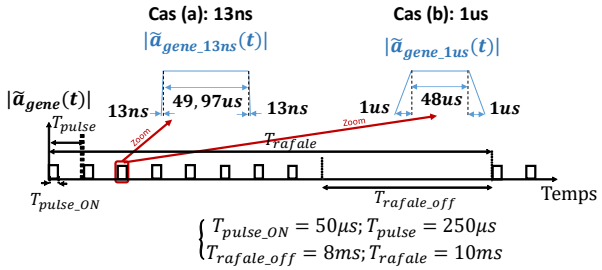


Figure 1. Définition des enveloppes des 2 trains d'impulsions.

Les figures 2 et 3 présentent une comparaison de 4 spectres théoriques des enveloppes des rafales radar obtenues avec τ = 13ns.

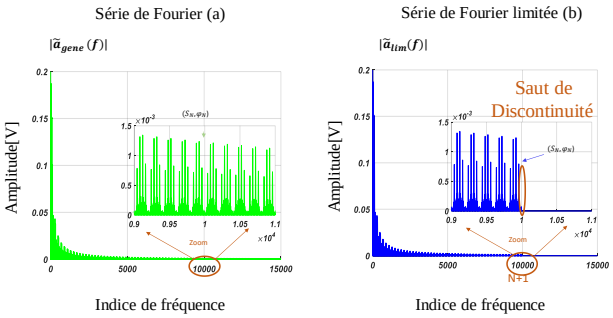


Figure 2. Comparaison des spectres théoriques des rafales radar théorique (a), à bande limitée (b).

Le spectre (a) de la figure 2 $|\tilde{a}_{gene}(f)|$, obtenu avec une série de Fourier classique conduit à un spectre infini. Le second spectre (b) de la figure 2 $|\tilde{a}_{lim}(f)|$ est identique à $|\tilde{a}_{gene}(f)|$ avec une discontinuité ajoutée (bande de fréquence limitée à $(N+1) \times \frac{1}{T_{rafale}}$ avec $N = 10000$ et $\frac{1}{T_{rafale}} = 100Hz$).

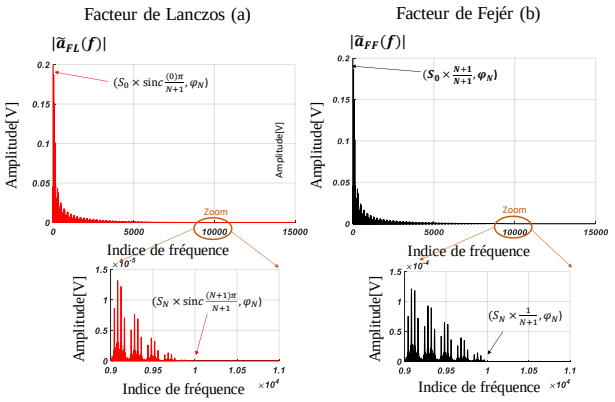


Figure 3. Comparaison des spectres théoriques des rafales radar avec les corrections par les facteurs de Lanczos (a) et de Fejér (b).

Le troisième spectre (a) de la figure 3 $|\tilde{a}_{FL}(f)|$ correspond au spectre $|\tilde{a}_{gene}(f)|$ de la figure 2 corrigé par la série de Lanczos défini par les équations (1), (2) et (3) suivantes.

$$S(t) = S_o + \sum_{k=1}^{+\infty} S_k(t) \quad (1)$$

$$S_k(t) = S_k \times \cos(2\pi k f_o t + \varphi_k) \quad (2)$$

$$k \in [0: N+1], [S_k, \varphi_k]$$

$$S_{Lanczos}(t) = \sum_{k=0}^{N+1} c_{kLanczos} \times S_k(t) \quad (3)$$

$$c_{kLanczos} = \frac{\sin\left(\frac{k\pi}{N+1}\right)}{\frac{k\pi}{N+1}}$$

Le quatrième spectre (b) de la figure 3, $|\tilde{a}_{FF}(f)|$ est celui obtenu avec la série de Fejér défini par l'équation (4).

$$S_{Fejer}(t) = \sum_{k=0}^{N+1} c_{kFejer} \times S_k(t) \quad (4)$$

$$c_{kFejer} = \frac{N+1-k}{N+1}$$

La discontinuité fréquentielle de $|\tilde{a}_{FL}(f)|$ et $|\tilde{a}_{FF}(f)|$ est adoucie en $(N+1) \times \frac{1}{T_{rafale}}$ par rapport à $|\tilde{a}_{lim}(f)|$.

Cela se traduit d'un point de vue temporel par les enveloppes théoriques (figures 4 et 5) pour lesquelles les facteurs de Lanczos ou Fejér permettent clairement de réduire les phénomènes de Gibbs. Les figures 4 et 5 montrent aussi la différence de correction entre les équations de Fejér et celles de Lanczos pour deux valeurs de temps de montée et de décente (13ns et 1µs). Cette dernière est choisie pour les mesures car elle conduit à une forme médiane par rapport à la rafale à bande limitée.

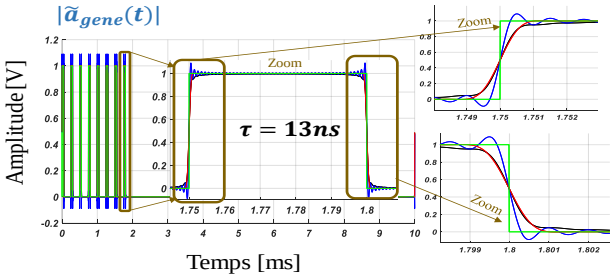


Figure 4. Comparaison des rafales radar avec et sans les corrections de Lanczos ou Fejér (cas a : 13ns).

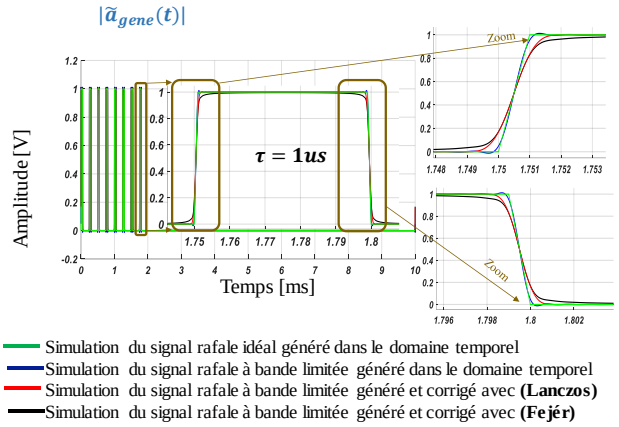


Figure 5. Comparaison des rafales radar avec et sans les corrections de Lanczos ou Fejér (cas a : 1µs).

Il apparait clairement sur cette les figures 4 et 5 que les enveloppes de la rafale données pour $\tau = 13ns$ donnent naissance à plus de phénomènes de Gibbs que celles pour τ=1µs. La correction des phénomènes de Gibbs est donc d'autant plus nécessaire que τ diminue.

3. Système de mesure 6-canaux

Le système de mesure temporelle sous pointes 6-canaux fondé sur l'utilisation de Track and Hold Amplifier (THA) [5, 6] et d'un numériseur 8 voies très large bande [DC − 1.6GHz] est présenté sur la figure 6. Ce système est utilisé pour mesurer la réponse temporelle calibrée [7] et simultanée des tensions et courants aux bornes de DST non linéaires, sous pointes et excités par des rafales radar injectées dans le plan π_{gene}.

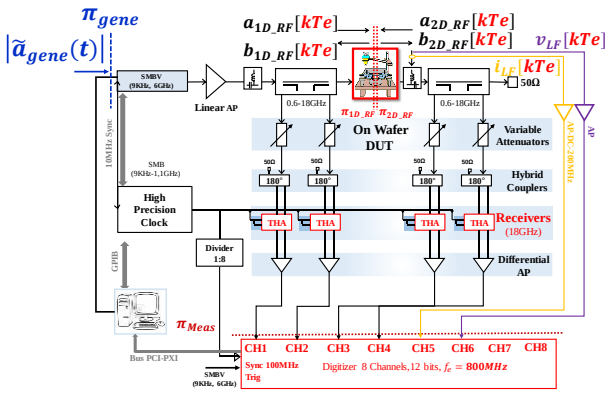


Figure 6. Schéma du système de mesure.

Le banc de mesure 6-canaux contient deux coupleurs bidirectionnels à large bande de 20dB, permettant la mesure simultanée des ondes de tension incidentes et réfléchies à l'entrée et à la sortie du DST. Des atténuateurs variables (pris en compte lors de l'étalonnage) sont nécessaires pour éviter la saturation des récepteurs à base de THAs. Le signal d'excitation est amplifié linéairement à l'aide d'un préamplificateur à haut gain à large bande (« Linear AP » sur la figure 6) avant d'attaquer le DST. Pour étalonner le banc 6 canaux avec une résolution haute fréquence, un signal RF multi-tons contenant toutes les composantes spectrales correspondant à la grille de fréquence d'analyse, est généré.

Ce signal correspond à une somme des sinusoïdes ayant une amplitude constante et des phases paraboliquement réparties entre 0 et 2π selon la technique de Schroeder [6], exprimée dans l'équation suivante (5) :

$$x(t) = \sum_{n=1}^{N} A \times \cos(2\pi f_n t + \varphi_n) \quad (5)$$

avec $N = [(f_{MAX} - f_{MIN})/\Delta f] + 1$

4. Résultats de mesure

Un transistor HEMT GaN est caractérisé avec la rafale radar irrégulière périodique de la figure 1 pour τ=13ns (a) avec une fréquence porteuse $f_{RF} = 3.3$ GHz. Les modules des enveloppes complexes de la tension $|\tilde{V}_{DS_RF}(t)|$ et du courant $|\tilde{I}_{DS_RF}(t)|$ sont présentés sur les figures 7 et 8 lorsque le transistor est chargé par $Z_L(f_{RF}) = 50\ \Omega$.

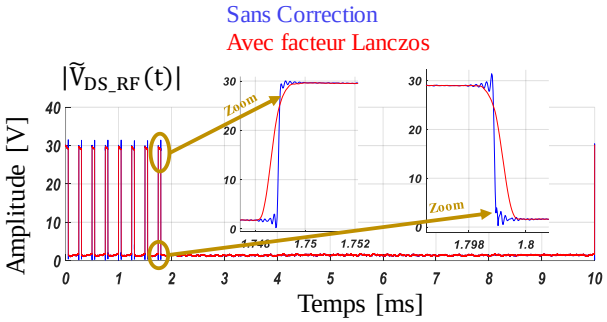


Figure 7. Enveloppes complexes de tension RF à la sortie du transistor (cas a : 13ns).

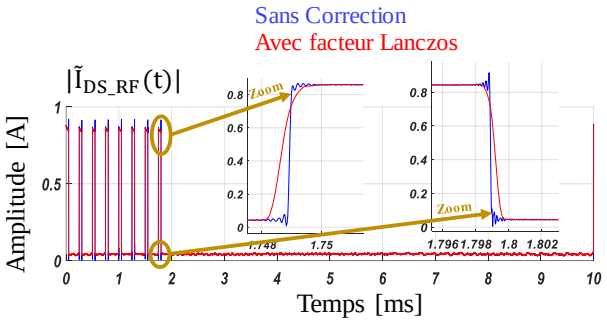


Figure 8. Enveloppes complexes de courant RF à la sortie du transistor (cas a : 13ns).

Le courant BF de drain (sortie) $i_{DS_BF}(t)$ du transistor est présenté dans les deux cas (a, b) de la rafale radar irrégulière sur les figures 9 et 10.

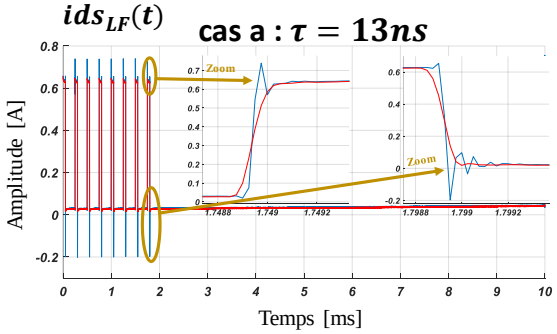


Figure 9. Enveloppes complexes de courant BF à la sortie du transistor (cas a : 13ns).

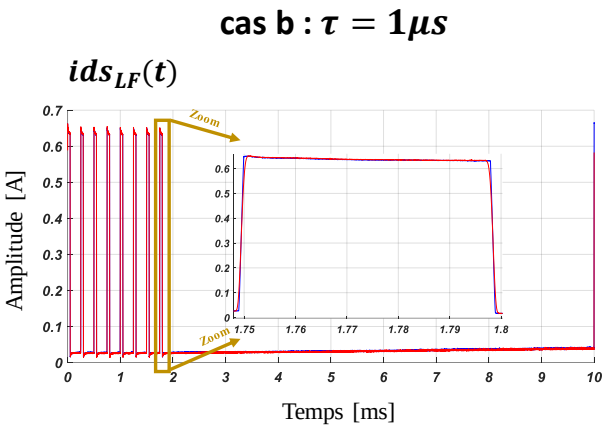


Figure 10. Enveloppes complexes de courant BF à la sortie du transistor (cas b : 1µs).

Les Figures 7, 8, 9 et 10 montrent que même avec des τ très faibles, l'application du facteur de Lanczos aux bornes de transistor permet d'obtenir des formes d'ondes temporelles mesurées BF et RF sans phénomène de Gibbs.

Pour extraire le critère de stabilité P2P, il est nécessaire d'effectuer une comparaison des 8 impulsions normalisées de l'onde radar mesurée. La superposition des 8 tensions de drain normalisées est illustrée sur la figure 11. Ces 8 impulsions sont normalisées pour les deux cas avec et sans facteur de Lanczos. On voit clairement que, dans les deux cas, la forme d'onde dans le domaine temporel de la première impulsion diffère de celle des autres impulsions. Mais les sept autres impulsions présentent des formes d'onde quasi identiques dans le domaine temporel.

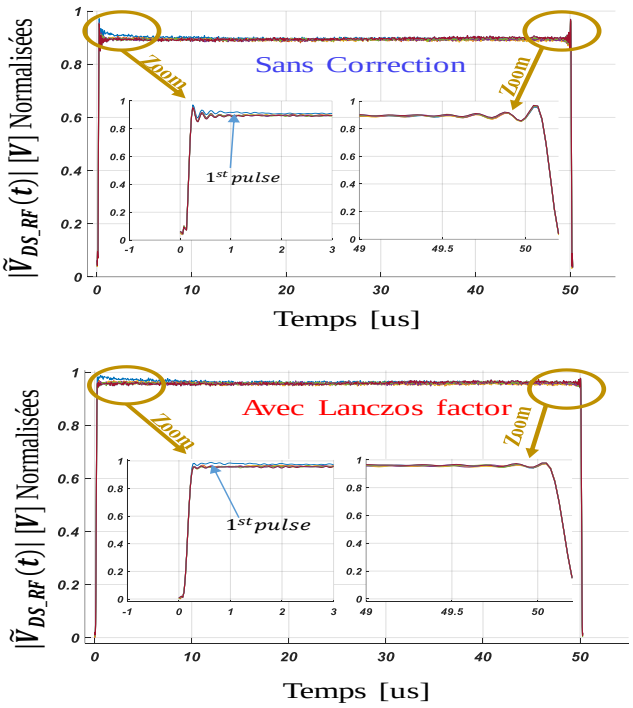


Figure 11. Comparaison des 8 impulsions de tension de drain normalisées RF mesurées avec et sans facteur de Lanczos (cas a : 13ns).

La stabilité P2P a été calculée pour évaluer l'impact réel du facteur Lanczos. Cette stabilité P2P globale s'écrit comme suit :

$$P2P_Stab_{Globale} = 10 \times \log(10^{\frac{Stab_Amp(dB)}{10}} + 10^{\frac{Stab_Phase(dB)}{10}}) \quad (6)$$

La figure 12 montre la stabilité globale du P2P calculée avec l'équation 6.

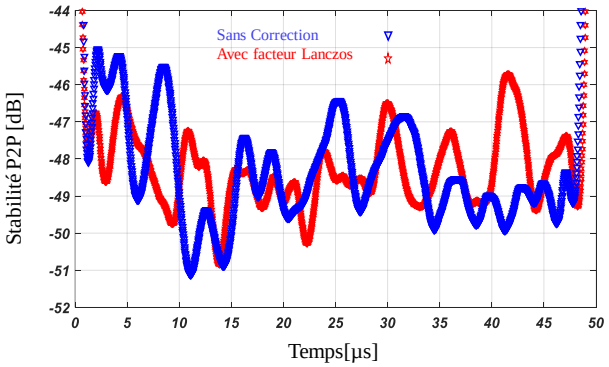


Figure 12. Comparaison de la Stabilité P2P sans et avec l'application du facteur Lanczos (cas a : 13ns).

Des performances de puissance élevée sont requises pour les radars pulsés transmis, mais leur stabilité P2P est la spécification la plus critique afin de ne considérer les cibles en mouvement qu'en supprimant les échos indésirables des objets fixes et d'assurer le rejet du fouillis [8], [9]. En effet, les variations de forme d'onde entre les impulsions successives reçues des cibles mobiles sont utilisées pour le traitement du signal radar, alors que les objets fixes devraient idéalement ne produire aucune variation dans le temps.

Par conséquent, une telle réponse idéale reçue d'objets fixes suppose que les formes d'onde d'impulsion successives émises par le radar démontrent une excellente répétabilité sans variations pour éviter une fausse détection.

5. Conclusion

Cet article présente la mesure très précise des enveloppes temporelles mesurées aux bornes d'un transistor GaN soumis à une excitation RF correspondant à une rafale de train d'impulsions irrégulière périodique.

L'originalité de ce travail réside dans la capacité du banc de mesure réalisé à pouvoir obtenir des enveloppes temporelles calibrées des tensions et courants RF et BF avec des temps de montée/descente ultra courts (13ns) tout en réduisant considérablement les phénomènes de Gibbs inhérents aux bandes passantes limitées des générateurs.

Cette réduction est obtenue en corrigeant les ondes générées avec les séries de Lanczos.

Cette mesure permet d'obtenir des caractéristiques de stabilité P2P beaucoup plus précises.

Références

[1] Bo Huang, *«Design and implementation of multi-channel digital down-converter based on DSP»,* 2011 International Conference on Computer Science and Network Technology, IEEE, DEC.2011, pp 24-26.

[2] H. Zhu, et al. *«Gibbs phenomenon for fractional Fourier series»,* IET Signal Processing, December 2011, pp 728-738.

[3] J. Delprato, et al. *« Time-domain envelope measurements and simulations of pulse-to-pulse stability in microwave power amplifiers»*, IEEE MTT-S International Microwave Symposium, 2014.

[4] S. Fakhfakh, et al. *«On-wafer time domain and low-frequency measurements of GaN HEMTs for accurate modeling of traps and its impact on pulse-to-pulse stability»*, in IEEE International Workshop on Integrated Nonlinear Microwave and Millimeter-wave Circuits, INMMiC 2018, Brive, France, 4-7 Jul 2018.

[5] S. Ahmed, et al., «Time-domain interleaved high sampling rate system for large signal characterization of non-linear devices», 79th ARFTG Microwave Measurement Conference, 2012, pp. 1-4.

[6] J. Verspecht, «*Calibration of a Measurement System for High Frequency Nonlinear Devices*», Doctoral Dissertation, Vrije Universiteit Brussel, 1995.

[7] M. Schroeder, *« Synthesis of low-peak factor signals and binary sequences with low autocorrelation»*, IEEE Trans. Information Theory, vol. 16, 1970, pp. 85-89.

[8] C. Salmer, et al. « *Pulse to Pulse Stability of Solid State Transmitter Module for Radars Application* », in 28th European Microwave Conference, vol. 2, Oct 1998, pp. 79-84.

[9] M. Cicolani, et al. «*Pulse to Pulse Stability Characteristics of Robots Design Centered High Perfermances /Low Cost T/R Module»,* in European Microwave Conference, Sept 2006, pp. 1802-1805.