

Amélioration des performances de la prédistorion numérique en bande de base par association de l' « Active Constellation Extension » pour un signal OFDM

MATHILDE BRANDON^{1,2}, MYRIAM ARIAUDO¹, SYLVAIN TRAVERSO², JESSICA BOUVIER², INBAR FIJALKOW¹, JEAN-LUC GAUTIER¹

¹ ETIS/ENSEA – Université de Cergy-Pontoise - CNRS
6 avenue du Ponceau, 95000 Cergy, France

² THALES Communications
146 boulevard de Valmy, 92700 Colombes, France

¹{mathilde.brandon, ariaudo, inbar.fijalkow, gautier}@ensea.fr,
²{mathilde.brandon, sylvain.traverso, jessica.bouvier}@fr.thalesgroup.com

Résumé – Les problèmes de non linéarité engendrés par les amplificateurs de puissance sont bien connus et beaucoup de techniques de linéarisation ont été proposées dans la littérature, dont une en particulier : la prédistorion numérique. La modulation multiporteuse Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) a une forte dynamique, caractérisée par son fort Peak-to-Average Power Ratio (PAPR), ce qui la rend très sensible à ces non linéarités. Nous avons choisi l'Active Constellation Extension (ACE) comme technique de réduction du facteur crête. Seule, cette technique n'est pas suffisante pour assurer une bonne linéarité. Dans ce papier, nous montrons que l'association de l'ACE avec la prédistorion numérique permet d'augmenter l'Adjacent Channel Power Ratio (ACPR) du signal et ainsi d'améliorer les performances de linéarité. Cette association est tout d'abord validée en simulation, puis des mesures sont effectuées. En mesure, pour une puissance moyenne de sortie fixée de 42.5dBm, ce qui représente la puissance nominale de l'amplificateur, les ACPR sont améliorés de 17dB grâce à l'ajout de l'ACE et de la prédistorion, en comparaison à une dégradation de plus de 15dB avec la prédistorion seule. Pour un ACPR donné de 35dBc, la puissance moyenne de sortie est augmentée de 2dB grâce à l'ajout de l'ACE à la prédistorion qui seule n'apporte pas de gain.

Abstract - Nonlinearity problems for power amplifiers are well known and many linearization techniques have been proposed in the literature, especially digital baseband predistortion. Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) has a very high Peak-to-Average Power Ratio (PAPR), making it very sensitive to non linearities. We have chosen the Active Constellation Extension (ACE) to reduce the crest factor, which is not sufficient. In this paper, we show that the association of ACE with digital predistortion helps to improve the Adjacent Channel Power Ratio (ACPR) and so permits a good linearity improvement. The association is first validated in simulation. In measurements, for 42.5dBm RMS output power, which represents the nominal power, the ACPR is increased by 17dB. With only predistortion, the ACPR is reduced by more than 15dB. For a given ACPR of 35dBc, the RMS output power is increased by 2dB with the two processing, but no improved with only predistortion.

1 Introduction

Dans les systèmes de télécommunication actuels, la modulation OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) est de plus en plus utilisée en partie du fait de sa forte efficacité spectrale et sa robustesse face aux problèmes d'évanouissement des canaux de propagation. Cependant cette modulation comporte un inconvénient majeur : une forte dynamique en puissance. Par rapport aux modulations séries, cet inconvénient rend l'OFDM bien plus sensible aux non linéarités des circuits, en particulier celles des amplificateurs de puissance.

De nombreuses méthodes existent pour d'une part réduire la dynamique des signaux [1], et d'autre part pour améliorer les performances de linéarité de l'amplificateur de puissance [2]. Parmi ces techniques, l'Active Constellation Extension (ACE) [3] a été choisie en tant que technique de réduction, en partie car c'est une technique dédiée à la modulation OFDM et qui

offre un bon compromis entre performances et complexité. De plus cette technique ne dégrade pas le taux d'erreur binaire (TEB). En tant que technique de linéarisation, la prédistorion numérique en bande de base [4] a été choisie pour sa capacité d'adaptation et ses bonnes performances.

Peu d'articles traitent de l'association d'une méthode de réduction de dynamique avec une méthode de linéarisation [5][6][7], mais aucun avec l'ACE.

Le but de cet article est de montrer le bénéfice de l'association de l'ACE avec la prédistorion numérique en bande de base sur les performances de linéarité. Celles-ci sont évaluées en simulation et en mesure.

L'article est organisé comme suit : la section 2 rappelle les problèmes de linéarité pour un signal OFDM. Les sections 3 et 4 présentent respectivement la technique ACE et la prédistorion numérique en bande de base. Les résultats de simulation et de mesure sont présentés dans la section 5. Enfin une conclusion est dressée en section 6.

2 Dynamique et linéarité des signaux OFDM

Un signal OFDM est une somme de N signaux indépendants modulés sur des sous-canaux de même largeur de bande. Le signal $x(t)$ dans le domaine temporel s'écrit :

$$x(t) = \frac{1}{\sqrt{N}} \sum_{k=-\frac{N}{2}}^{\frac{N}{2}-1} X_k e^{j2\pi kt/T}, 0 \leq t \leq T,$$

avec X_k les symboles complexes de données, N le nombre de sous-porteuses et T la période d'un symbole OFDM. Le PAPR représente le facteur crête du signal et est défini comme :

$$\xi = \frac{\max_{t \in [0, T]} |x(t)|^2}{P_{av}}$$

où P_{av} est la puissance moyenne du signal.

Pour de forts PAPR, un compromis est nécessaire entre linéarité et rendement. Une importante linéarité est classiquement obtenue en utilisant l'amplificateur de puissance dans sa zone linéaire, mais un fort recul en puissance est alors nécessaire. Ce recul en puissance a pour conséquence de fortement dégrader le rendement de l'amplificateur de puissance. Une métrique utilisée pour mesurer la linéarité d'un circuit sur le signal hors bande est l'ACPR. Il représente la différence de puissance entre la puissance dans le canal utile et la puissance dans un canal adjacent, droite ou gauche (fig. 1 et eq. 1). Cette notion est notamment très importante dans un contexte de cohabitation des transmissions.

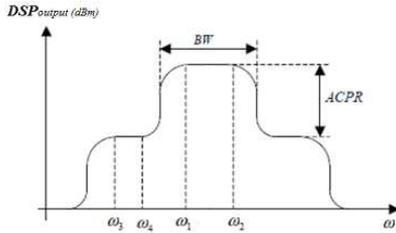


Figure 1: Schéma définissant l'ACPR

$$ACPR_{dB} = 10 \log \left\{ \frac{\int_{\omega_1}^{\omega_2} DSP_{main_channel}}{\int_{\omega_3}^{\omega_4} DSP_{adjacent_channel}} \right\} \quad (1)$$

3 Active Constellation Extension

La méthode ACE utilisée a été proposée dans [3]. Le principe consiste à autoriser une extension de la constellation utilisée sur chacune des sous-porteuses. Ce degré de liberté permet ainsi, sous certaines conditions, de diminuer le PAPR du signal OFDM résultant.

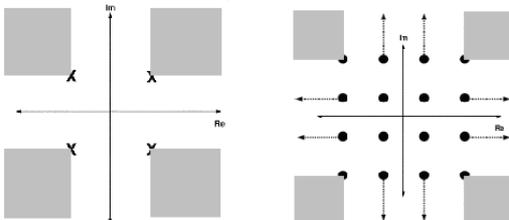


Figure 2 : Exemple d'une constellation QPSK (à gauche) et 16QAM (à droite) avec traitement ACE sur une sous-porteuse d'un signal OFDM

Cette modification de la constellation n'engendre pas de dégradation du TEB car la distance euclidienne entre les points de la constellation est conservée. Sur la fig. 2 sont représentées en gris et par des flèches, les nouvelles régions accordées par l'algorithme ACE pour une modulation 16QAM.

Le traitement ACE est effectué en bande de base, après IDFT à l'émetteur. Il nécessite un écrêtage du signal dans le domaine temporel et un traitement des constellations dans le domaine fréquentiel.

Nous avons choisi l'algorithme itératif proposé dans [4]. Le PAPR d'un signal OFDM comportant 64 sous-porteuses, peut par exemple être réduit de 9.65dB à 5.95dB après 3 itérations. Cependant l'utilisation seule de cette réduction de dynamique ne suffit pas à augmenter significativement l'ACPR du signal émis [8].

4 Prédistorsion numérique en bande de base

Dans cet article, nous utilisons l'algorithme de prédistorsion numérique présenté dans [9]. Il repose sur le calcul des caractéristiques inverses AM/AM et AM/PM en puissance instantanée de l'amplificateur de puissance par un polynôme à effet mémoire. La caractéristique AM/AM d'un amplificateur est une fonction non linéaire de l'amplitude du signal de sortie en fonction de l'amplitude du signal d'entrée. La caractéristique AM/PM est quant à elle une fonction non linéaire de la différence de phase entre les signaux d'entrée et de sortie en fonction de l'amplitude d'entrée.

Les caractéristiques inverses sont évaluées pour adapter les signaux I et Q entrant dans la chaîne amplificatrice corrigeant ainsi à la fois l'amplitude et la phase du signal OFDM. Le synoptique de la figure 3 présente la procédure de la prédistorsion.

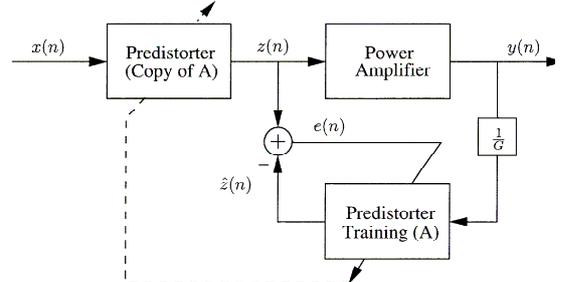


Figure 3: Synoptique de la procédure de prédistorsion

Avant d'appliquer la prédistorsion à un signal OFDM, elle a été validée avec un signal 16QAM pour s'assurer que sans problème de forte dynamique l'algorithme apporte de bons résultats en termes de linéarité.

Pour l'application à l'OFDM, une synchronisation temporelle très précise doit être effectuée entre les signaux d'entrée et de sortie de l'amplificateur.

Il est important de préciser que pour chaque point de polarisation et pour chaque type de signal transmis les caractéristiques de l'amplificateur évoluent.

5 Impacts de l'association des techniques d'ACE et de prédistorsion

5.1 Evaluation des performances de l'association des techniques en simulation

Les bénéfices de l'association sont quantifiés au moyen de simulations réalisées avec le simulateur Agilent Design System pour un modèle idéal d'amplificateur polarisé en classe A ayant un gain de 15dB et un point de compression à 1dB en sortie de 47dBm. Le signal OFDM comporte 64 sous-porteuses modulées en QPSK, une bande passante de 1,25MHz et un PAPR initial de 9,65dB. Après 3 itérations d'ACE, le PAPR a été réduit de 9,65dB à 5,95dB, soit une réduction de 3,7dB. Ces simulations ont pour but de valider l'association des algorithmes d'un point de vue théorique.

La figure 4 présente les résultats d'ACPR en fonction de la puissance moyenne de sortie de l'amplificateur lorsqu'aucun traitement n'est appliqué, lorsque seule la prédistorsion est appliquée et lorsque ACE et prédistorsion sont associées. Les valeurs d'ACPR obtenues en basse puissance correspondent à la valeur intrinsèque de la modulation à transmettre, donc à la valeur maximale atteignable même avec traitements. La technique ACE seule ne permet pas d'améliorer significativement les performances. L'amélioration de la linéarité par la prédistorsion apparaît clairement pour des puissances proches de la zone de saturation de l'amplificateur. En effet, la technique de prédistorsion permet de retrouver les 72dBc d'ACPR intrinsèques à la forme d'onde pour une puissance allant jusqu'à 38,8dBm au lieu de 20dBm sans prédistorsion. L'ajout de l'ACE permet d'augmenter la plage de puissance où les 72dBc d'ACPR sont assurés jusqu'à 42,4dBm, soit un gain en puissance de sortie de 3,7dB par rapport à la prédistorsion seule. Cette marge gagnée correspond à la réduction du facteur crête.

Ces résultats peuvent être interprétés selon 2 points de vue (tab. 1). L'association des techniques augmente la puissance moyenne de sortie maximale permettant de conserver l'ACPR intrinsèque de la forme d'onde, ou bien améliore les ACPR pour une puissance moyenne de sortie donnée.

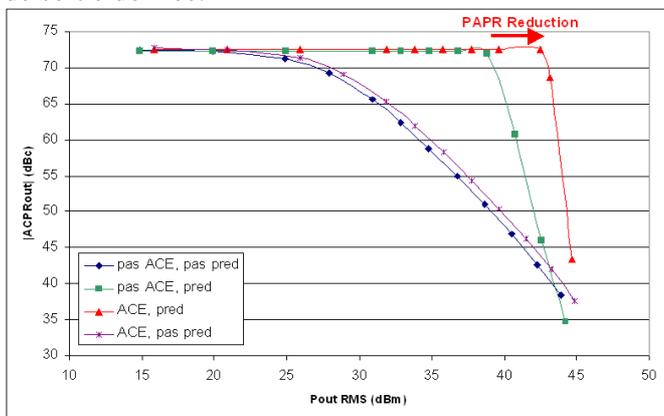


Figure 4 : Comparaison des ACPR en fonction des traitements utilisés en sortie d'un amplificateur de puissance classe A pour un signal OFDM

Tab 1 : Résumé des performances obtenues en simulation pour un amplificateur en classe A

	Sans prédistorsion Sans ACE	Avec prédistorsion Sans ACE	Avec prédistorsion Avec ACE
P_{OUTmax} pour ACPR=72dBc	20dBm	38,8dBm	42,2dBm
ACPR pour $P_{OUT}=42,5dBm$	42dBc	45,9dBc	72dBc

5.2 Evaluation des performances des techniques en mesure

Pour vérifier l'efficacité de l'association dans un contexte réel, nous utilisons conjointement les 2 techniques sur un amplificateur GaN conçu par THALES, opérant dans la bande 1,7-2,3GHz et délivrant 50W crête. Cet amplificateur est polarisé en classe AB, présentant un phénomène d'expansion de gain (fig. 5) [10]. Typiquement ce phénomène cause une dégradation des ACPR en basse puissance. L'optimum de linéarité n'est alors plus obtenu en basse puissance. La prédistorsion est normalement utilisée pour des puissances s'approchant de la zone de saturation, dans ce cas elle devient alors utile même en basse puissance.

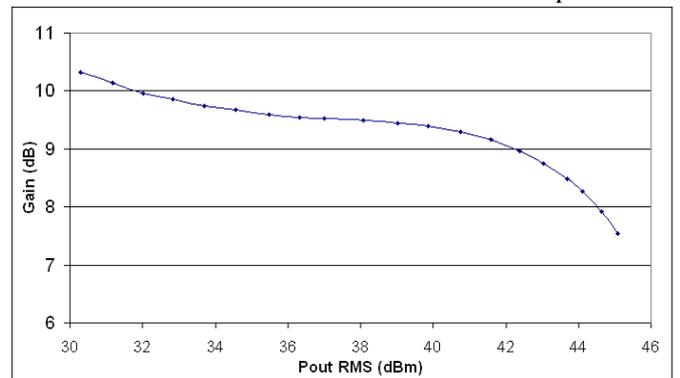


Figure 5 : Gain de l'amplificateur de THALES en modulation

Le banc de test utilisé pour les mesures est représenté en fig. 6. Le signal RF est injecté dans un premier amplificateur, appelé « Driver » composé de plusieurs étages de transistors opérant en classe A. Après un filtre et un isolateur, le signal est envoyé dans un deuxième amplificateur, appelé « Booster », composé d'un transistor GaN en classe AB. Pour effectuer la mesure, le signal OFDM est d'abord injecté dans le banc puis le signal de sortie de l'amplificateur est enregistré par l'analyseur de réseau vectoriel. A l'aide de ces deux signaux, le signal prédistoré à injecter de nouveau à l'entrée de l'amplificateur est calculé. Les mesures des performances de linéarité sont ensuite mesurées à l'aide de l'analyseur de spectre.

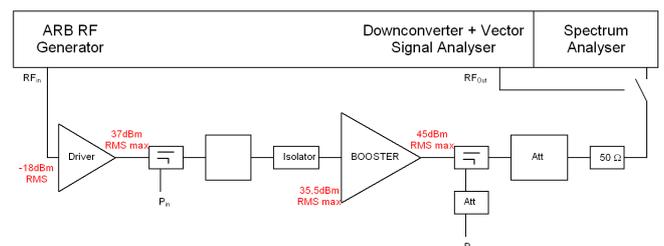


Figure 6 : Schéma du banc de test

La figure 7 présente les résultats d'ACPR pour le même signal OFDM que celui utilisé en simulation, à la fréquence 1,7GHz. Comme attendu, l'association des 2

techniques engendre une amélioration de la linéarité. Pendant les mesures, il est important de préciser que les caractéristiques réelles de l'amplificateur de puissance présentant une variation du gain pour de faibles puissances, a nécessité une adaptation de l'algorithme de prédistorsion pour prendre en compte cet effet.

Avec l'utilisation conjointe de l'ACE et de la prédistorsion, un palier de 50dBc d'ACPR apparaît. Ces 50dBc d'ACPR correspondent à la valeur mesurée en sortie du générateur, c'est donc la valeur maximale atteignable. En effet les 72dBc d'ACPR obtenus en simulation ne sont pas atteignables en mesure à cause du bruit de la chaîne d'amplification.

Après ce palier, lorsque la puissance moyenne de sortie approche la zone de saturation de l'amplificateur, les résultats de l'association des deux techniques suivent les mêmes tendances que ceux des simulations. En effet la marge gagnée par l'association des deux techniques par rapport à la prédistorsion seule sur la plage de puissance où l'ACPR est maximal correspond à la réduction du PAPR. Le tableau 2 regroupe ces résultats ; 42.5dBm représente la puissance nominale cible de l'amplificateur de puissance et 35dBc d'ACPR est une contrainte visée des systèmes THALES.

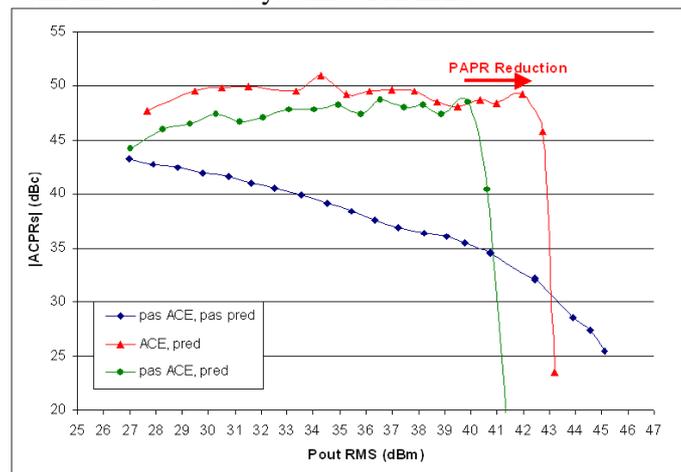


Figure 7: Comparaison d'ACPR de sortie en fonction des traitements utilisés pour un amplificateur classe AB

Tab 2 : Résumé des performances obtenues en mesure pour un amplificateur en classe A

	Sans prédistorsion Sans ACE	Avec prédistorsion Sans ACE	Avec prédistorsion Avec ACE
P_{OUTmax} pour ACPR=49dBc	<26dBm	40dBm	42,5dBm
P_{OUTmax} pour ACPR=35dBc	40dBm	40,7dBm	42,8dBm
ACPR pour $P_{OUT}=42,5dBm$	32dBc	<20dBc	49dBc

6 Conclusion

Dans un contexte de modulation OFDM avec un amplificateur de puissance, les non linéarités produites hors bande peuvent être très importantes. Pour améliorer ces performances, nous proposons d'associer une technique de réduction de PAPR, appelée ACE, et une technique de linéarisation, appelée prédistorsion numérique en bande de base. Grâce à l'association de ces deux techniques, nous avons montré en simulation sur un amplificateur en classe A qu'une parfaite linéarité est assurée pour une plage de puissance

moyenne de sortie augmentée du gain de réduction du PAPR en comparaison avec l'utilisation de la prédistorsion seule.

Nous avons appliqué cette méthode à un amplificateur GaN conçu par THALES. En mesure, nous observons les mêmes tendances que celles obtenues en simulation. Lorsque la puissance moyenne de sortie approche de la zone de saturation de l'amplificateur, ce qui correspond à la zone intéressante pour avoir un bon rendement, les ACPR sont améliorés de 17dB pour une puissance de 42.5dBm, en comparaison la prédistorsion seule dégrade les ACPR de plus de 15dB. Dans cette même zone pour un ACPR fixé de 35dBc, la puissance moyenne d'émission est augmentée de 2dB, alors qu'avec l'utilisation seule de la prédistorsion celle-ci est inchangée.

Référence

- [1] J.H. Lee et S.H. Han, *An overview of peak-to-average power ratio reduction techniques for multicarrier transmission*, IEEE Wireless Communications, pp. 56, Avril 2005
- [2] S.C. Cripps, *Advanced Techniques in RF Power Amplifier Design*, Artech House, 2002
- [3] B.S. Krongold et D.L. Jones, *PAR Reduction in OFDM via Active Constellation Extension*, IEEE Trans. Broadcasting, pp. 258-268, Septembre 2003
- [4] L. Wang et C. Tellambura, *An Adaptive-Scaling Algorithm for OFDM PAR Reduction Using Active Constellation Extension*, IEEE Trans. On Vehicular Technology Conference Fall, pp. 1-5, Septembre 2006
- [5] N. Aizawa, O. Muta, Y. Akaiwa et M. Sawahashi, *Effect of Peak Power Suppression and Adaptive Predistortion on Power Amplification of OFCDM Signal*, IEEE Trans. On Vehicular Technology Conference, pp. 1783-1787 ; Décembre 2005
- [6] A. Bo, Y. Zhi-xing, P. Chang-yong, Z. Tao-tao et G. Jian-hua, *Effects of PAPR Reduction on HPA Predistortion*, IEEE Trans. On Consumer Electronics, vol. 51, Issue 4, pp. 1143-1147, Novembre 2005
- [7] H. Ryu, T.P. Hoa, K.M. Lee, S. Kim et J. Park, *Improvement of Power Efficiency of HPA by PAPR Reduction and Predistortion*, IEEE Trans. On Consumer Electronics, vol. 50, Issue 1, pp. 119-124, Février 2004
- [8] C. Ciochina, F. Buda et H. Sari, *An Analysis of OFDM Peak Power Reduction Techniques for WIMAX Systems*, IEEE International Conf. On Communications, pp. 4676-4681, Juin 2006
- [9] L. Ding, et al., *A robust digital baseband predistorter constructed using memory polynomial*, IEEE Trans. On Communications, Issue 1, pp. 159-165, Janvier 2004
- [10] T. Hirayama, Y. Suzuki, N. Matsuno et H. Hida, *Effects of gain expansion on Power HBTs*, Proc. Of 30th European Microwave Conference, pp. 96-99, Octobre 2000