



**HAL**  
open science

# Linéarisation des Amplificateurs de Puissance dans les réseaux d'Antennes Millimétriques via retour “Over-the-Air””,

Siqi Wang, Morgan Roger, Caroline Lelandais-Perrault, Julien Sarrazin

► **To cite this version:**

Siqi Wang, Morgan Roger, Caroline Lelandais-Perrault, Julien Sarrazin. Linéarisation des Amplificateurs de Puissance dans les réseaux d'Antennes Millimétriques via retour “Over-the-Air””,. 22èmes Journées Nationales Micro-ondes (JNM 2022), Jun 2022, Limoges, France. hal-03930285

**HAL Id: hal-03930285**

**<https://hal.sorbonne-universite.fr/hal-03930285>**

Submitted on 2 Feb 2023

**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.

# Linéarisation des Amplificateurs de Puissance dans les réseaux d'Antennes Millimétriques via retour "Over-the-Air"

S. Wang, M. Roger, C. Lelandais-Perrault, J. Sarrazin

Sorbonne Université, CNRS, Laboratoire de Génie Electrique et Electronique de Paris, 75252, Paris, France  
Univ Paris-Saclay, CentraleSupélec, CNRS, Laboratoire de Génie Electrique et Electronique de Paris, 91192, Gif-sur-Yvette, France

siqi.wang@sorbonne-universite.fr; morgan.roger@centralesupelec.fr; caroline.lelandais-perrault@centralesupelec.fr; julien.sarrazin@sorbonne-universite.fr

**Résumé** — La prédistorsion numérique des amplificateurs de puissance (PA) dans les réseaux d'antennes millimétriques au niveau des stations de base constitue un défi compte tenu des très larges bandes passantes considérées. En effet, afin de limiter le coût et la consommation des systèmes, il n'est pas souhaitable d'avoir recours à une voie de retour par PA, dont le nombre peut dépasser la centaine. C'est ainsi que plusieurs études ont récemment considéré un retour unique provenant de l'utilisateur lui-même. Toutefois, ces travaux considèrent un environnement en espace libre. Ce papier met ainsi en évidence le défi supplémentaire associé aux multiples trajets présents dans le canal de propagation. En particulier, il est montré que l'émission hors-bande augmente lorsque l'on s'écarte de la position de l'utilisateur, et ce, d'autant plus que les trajets non-directs prédominent.

## 1. Introduction

Le déploiement de la deuxième phase de la cinquième génération (5G) de technologie mobile considère l'utilisation d'ondes millimétriques (28GHz, 40GHz...). A ces fréquences, les techniques de formation de faisceaux sont nécessaires afin de lutter contre la forte atténuation en espace libre. Ainsi, les stations de base s'équipent de réseaux d'antennes constitués d'un très grand nombre d'éléments rayonnants, auxquels sont associés autant d'amplificateurs de puissance (PA) pour la liaison descendante vers l'utilisateur mobile (UE). Le compromis entre efficacité et linéarité reste toujours un défi pour les PA qui sont responsables de la majorité de la consommation du système. Classiquement, la linéarisation des PA est effectuée via une prédistorsion numérique (DPD) du signal d'entrée se basant sur l'observation du signal de sortie via une voie de retour, nécessitant un convertisseur analogique-numérique. Compte tenu du nombre de PA et des bandes passantes aux fréquences millimétriques (> 1GHz), la multiplication des voies de retour engendrerait une forte consommation énergétique.

Un des facteurs impactant la bande passante nécessaire pour les voies de retour est la complexité du modèle mathématique de la DPD. Nombre de modèles ma-

thématiques basés sur les séries de Volterra existent pour modéliser le comportement du PA ou de son pré-inverse (PD), avec des ordres de non-linéarité et des profondeurs mémoire souvent déterminés de manière empirique. Le modèle polynomial à mémoire (MP) [1] qui a été largement utilisé dans la littérature, a une complexité définie par deux paramètres, un pour l'ordre de non-linéarité et un pour la profondeur mémoire. D'autres modèles basés sur le MP ont été proposés dans la littérature afin d'améliorer les performances de linéarisation, par exemple le modèle polynomial à mémoire généralisé (GMP) dans [2], ou les structures cascades [3].

Récemment, des études sur la linéarisation dans les systèmes multi-antennaires [4] ont envisagé une unique voie de retour fournie par l'utilisateur mobile (UE) lui-même de manière sans fil (OTA, over-the-air) afin de réduire la complexité d'implémentation de la DPD (voir Fig. 1) et la consommation énergétique correspondante. Avec cette configuration, la DPD reste conventionnelle mais c'est le signal au niveau du récepteur qui est linéarisé plutôt que ceux à la sortie de chaque PA [5]. Ainsi, un certain ratio de puissance entre la bande adjacente et la bande principale (ACPR) peut être atteint au niveau de l'UE mais n'est pas garanti pour les autres positions où, à cause de la dispersion entre les caractéristiques des différents PAs, les signaux émis par chaque antenne se recombinaient avec un gain et une phase différents. Par conséquent, l'émission hors-bande peut devenir élevée et donc polluer les canaux adjacents, surtout à l'intérieur du faisceau du réseau d'antennes.

Les dernières études de la littérature proposent des solutions pour atténuer ce phénomène mais ne prennent pas en compte l'influence des multitrajets dans le canal de propagation. Cet article montre que la dégradation de l'ACPR dépend fortement du canal et que le problème a été pour l'instant sous-estimé.

Cet article est organisé comme suit. Dans la Sec. 2, la théorie de linéarisation du système MIMO est expliquée mathématiquement, et les canaux d'observation sont analysés. Les résultats de simulations pour deux canaux différents sont illustrés dans la Sec. 3. Finalement, une conclusion est tirée dans la Sect. 4.

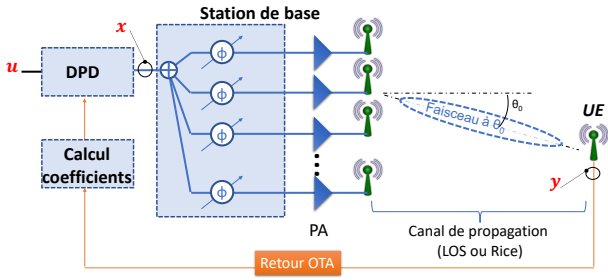


Figure 1. Système DPD par retour OTA.

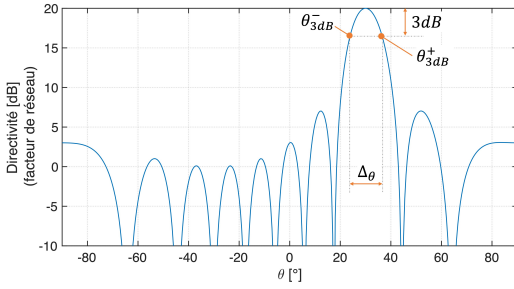


Figure 2. Diagramme de rayonnement du réseau.

## 2. Linéarisation MIMO avec retour OTA

La configuration considérée est illustrée en Fig. 1. Un signal  $x$  alimente un réseau d'antennes constitué d'un diviseur de puissance et de  $N$  déphaseurs permettant un dépointage du faisceau dans la direction  $\theta_0$ . Les  $N$  sorties du réseau d'alimentation sont connectées à  $N$  PA et  $N$  antennes. Le signal  $y$  est reçu au niveau d'un UE équipé d'une seule antenne et est ensuite retransmis à l'émetteur (voie de retour OTA) qui l'utilise pour calculer la DPD à appliquer au signal d'entrée  $u$  afin d'obtenir le signal prédistoré  $x$ . Le modèle de PA utilisé est une structure de Wiener : un filtre suivi par un modèle de Saleh, et le modèle de DPD est un polynôme à mémoire [6] :

$$z_p(n) = \sum_{k=0}^{\mathcal{K}-1} \sum_{l=0}^{\mathcal{L}-1} a_{kl} z(n-l) |z(n-l)|^k \quad (1)$$

où  $k$  est l'indice des non-linéarités, et  $l$  est l'indice de l'effet mémoire. Afin d'émuler artificiellement une dispersion dans le comportement des différents PA et ainsi observer le caractère directif de la linéarisation, la phase des coefficients du modèle de Saleh est modifiée aléatoirement pour chaque PA. Le canal de propagation entre chaque antenne du réseau et l'UE suit un modèle de Rice. Les composantes liées au trajet direct du canal (LOS) sont uniquement l'angle  $\theta$  et les composantes liées aux trajets indirects (partie Rayleigh) sont supposées non-corrélées entre chaque antenne.

## 3. Simulation

Le réseau contient 10 antennes et PA. Un vecteur de pondération de phase est introduit afin de générer un faisceau vers  $\theta_0 = 30^\circ$ , comme montré en Fig. 2. Le signal d'entrée  $u$  est une forme d'onde LTE de 20MHz de bande.

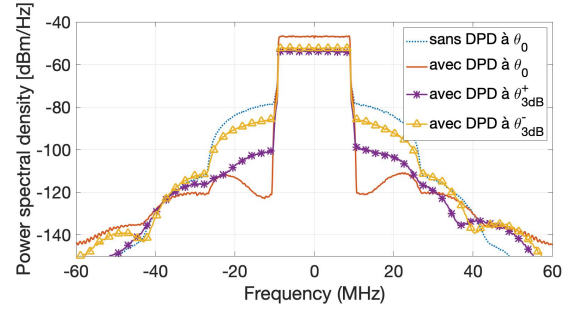


Figure 3. Spectre en bande de base reçu par l'UE avec un canal sans multitrajets (LOS : line-of-sight).

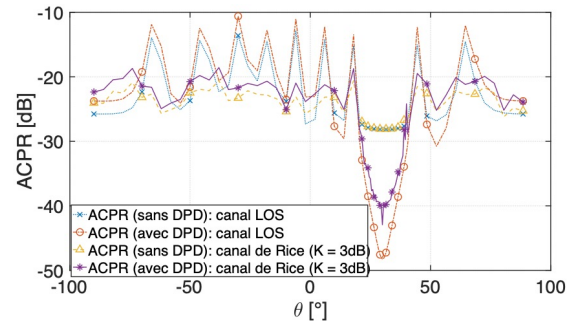


Figure 4. ACPR en fonction de  $\theta$  pour les canaux LOS et Rice (avec facteur de Rice  $K = 3\text{dB}$ ).

Un exemple de spectre reçu dans un canal sans multitrajets est tracé en Fig. 3. Dans la direction  $\theta_0 = 30^\circ$ , le spectre est donné avec et sans DPD. Sans DPD, les remontées spectrales dans les bandes adjacentes sont nettement visibles et sont largement atténuées par la DPD utilisant le retour OTA. Il est ainsi possible de linéariser le signal reçu pour une direction donnée. Sans modifier la DPD, pour les directions angulaires à l'extrémité du faisceau, c.a.d. aux angles à mi-puissance tels qu'indiqués en Fig. 2, outre le fait que la puissance reçue dans la bande a diminué de 3 dB, on s'aperçoit que la puissance dans les bandes adjacentes a nettement remonté. En d'autres termes, la DPD effectuée avec le retour OTA à  $\theta_0 = 30^\circ$  n'est pas efficace pour d'autres angles de réception. Ainsi, la prédistoration par retour OTA optimisée pour une position donnée de l'UE, s'avère rapidement inutile quand l'UE se déplace.

Afin de quantifier le phénomène, notamment en présence de multitrajets, l'ACPR est estimé entre la puissance moyenne dans les bandes adjacentes  $([-31, -11] \text{ MHz}$  et  $[11, 31] \text{ MHz})$  et celle de la bande principale  $([-10, 10] \text{ MHz})$ . Afin d'obtenir une statistique pertinente de l'ACPR, 25 réalisations du canal de Rice sont combinées avec 25 réalisations du comportement des PA (soit 625 réalisations). Pour chaque réalisation, une DPD est calculée pour l'angle  $\theta_0$ . L'ACPR est ensuite évalué pour d'autres angles  $\theta$  avec la DPD qui a été calculée pour l'angle  $\theta_0$ . Les résultats d'ACPR de 625 simulations sont moyennés et tracés en fonction de  $\theta$  de réception en Fig. 4 sous le label « ACPR (avec DPD) : canal de Rice ( $K=3\text{dB}$ ) ». Pour les mêmes réalisations, l'ACPR est également éva-

lué sans DPD et représenté par « ACPR (sans DPD) : canal de Rice ( $K=3\text{dB}$ ) » sur la Fig. 4. Aussi pour chaque réalisation de PA, l'ACPR avec et sans DPD est évalué avec un canal LOS. Le résultat de la moyenne des 25 réalisations sont données en « ACPR (sans DPD) : canal LOS » et « ACPR (avec DPD) : canal LOS ».

On remarque tout d'abord que lorsqu'aucune DPD n'est implémentée, l'ACPR reste élevé quel que soit  $\theta$  et quel que soit le canal considéré (LOS ou Rice). Avec la DPD, quel que soit le canal, l'ACPR est optimal à  $\theta_0$  et se dégrade lorsque l'on s'écarte de cette direction. On note également que les performances sont moins bonnes avec le canal de Rice qu'avec le canal LOS. Ainsi, la DPD avec retour OTA conduit à de l'émission hors bande à l'intérieur même du faisceau antennaire. Ces émissions hors-bande semblent plus difficiles à minimiser en présence de multi-trajets. En dehors du faisceau principal, en revanche, l'ACPR semble globalement meilleur et moins sensible à l'angle dans le cas multi-trajet par rapport au cas au trajet direct seul. Mais cet effet est observé aussi bien en présence qu'en l'absence de DPD.

#### 4. Conclusion

La prise en compte des multitrajets dans un dispositif de linéarisation de PA avec retour OTA est étudiée pour la première fois dans cet article. Il est mis en évidence que le problème d'émission hors bande est influencé par la présence de multitrajets. Les perspectives de ce travail sont de compenser la dégradation observée des performances en fonction de la direction de rayonnement via un réseau de neurones en exploitant les informations disponibles sur le canal.

#### Références

- [1] J. Kim and K. Konstantinou, "Digital predistortion of wideband signals based on power amplifier model with memory," *Electronics Letters*, vol. 37, no. 23, pp. 1417–1418, Nov 2001.
- [2] D. Morgan *et al.*, "A generalized memory polynomial model for digital predistortion of rf power amplifiers," *Signal Processing, IEEE Transactions on*, vol. 54, no. 10, pp. 3852–3860, Oct. 2006.
- [3] S. Wang *et al.*, "Optimal sizing of two-stage cascaded sparse memory polynomial model for high power amplifiers linearization," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 66, no. 9, pp. 3958–3965, Sept 2018.
- [4] X. Wang *et al.*, "Digital predistortion of 5G massive MIMO wireless transmitters based on indirect identification of power amplifier behavior with OTA tests," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 68, no. 1, pp. 316–328, 2020.
- [5] Q. Luo *et al.*, "Linearization angle widened digital predistortion for 5G MIMO beamforming transmitters," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 69, no. 11, pp. 5008–5020, 2021.
- [6] S. Wang *et al.*, "Augmented iterative learning control for neural-network-based joint crest factor reduction

and digital predistortion of power amplifiers," *IEEE Trans. Microw. Theory Techn.*, vol. 68, no. 11, pp. 4835–4845, 2020.