

DISPOSITIF ADAPTATIF DE PRÉDISTORSION POUR AMPLIFICATEURS LINC

J.P. Bernoux, J. Palicot, O. Souloumiac, J. Veillard

CCETT (Centre Commun d'Etudes de Télédiffusion et Télécommunications)
Rue du Clos Courtel - BP 59 - 35512 Cesson-Sévigné - France
RÉSUMÉ ABSTRACT

L'amplification de signaux numériques utilisant des modulations d'amplitude et de phase d'ordre élevé pose d'importants problèmes car elle nécessite des dispositifs extrêmement linéaires. Le LINC propose une solution à ces difficultés en décomposant le signal en 2 signaux d'enveloppe constante. Or pour que le procédé soit efficace il faut que les 2 voies d'amplification soit rigoureusement identiques. L'article propose une solution adaptative pour s'affranchir des disparités des caractéristiques des voies.

1 - INTRODUCTION

L'utilisation de modulations d'amplitude et de phase pour la diffusion de signaux numériques se heurte au difficile problème de l'amplification de puissance car les amplificateurs doivent être utilisés dans une zone très linéaire. Ceci est d'autant plus vrai que l'efficacité spectrale de la modulation est grande, car cela va généralement de pair avec une enveloppe du signal de moins en moins constante. Le phénomène est accru par l'emploi de modulation multiporteuses comme l'OFDM. Pour éviter l'utilisation de reculs trop importants dans les amplificateurs, des techniques de prédistorsion [1], ou d'égalisation non-linéaire [2] ont été étudiées, mais elles sont difficiles à mettre en œuvre et impliquent parfois une complexité importante pour des gains relativement faibles.

Une solution particulièrement attractive a été proposée par D.C. Cox [3]. Cette solution connue sous le nom de LINC (Linear Amplification with non-linear Components) permet une amplification linéaire de signaux numériques par décomposition de ceux-ci en deux signaux à enveloppe constante [4]. Chacun peut être ensuite amplifié séparément par des amplificateurs fonctionnant à saturation.

Le dispositif peut trouver des applications dans tous les systèmes pour lesquels le rendement énergétique est très important et où la réduction de la puissance consommée par les amplificateurs est une contrainte forte.

Parmi les applications possibles, on peut citer :

- les radiocommunications avec les mobiles,
- la transmission par satellite,
- la diffusion hertzienne de terre.

The amplification of digital signals using amplitude and phase modulation presents a particular problem, in that the devices required are of an extremely linear nature. One solution may be the LINC technique, which breaks down the signal into 2 separate signals having a constant envelope. However, for this procedure to be efficient, both paths must have the same characteristics. This paper proposes an adaptive solution to circumvent the disparities of the paths.

Malheureusement, cette technique très attrayante pose d'importants problèmes de réalisation pratique. En effet, pour que le dispositif soit efficace, il faut que chacune des voies ait des caractéristiques rigoureusement identiques (gain, réponse amplitude-fréquence, etc...) ce qui est difficilement réalisable. Le moindre déséquilibre entre les deux voies entraîne des dégradations importantes, comme cela a été montré par plusieurs auteurs [5], [6].

Cet article présente un dispositif résolvant ce problème en effectuant une prédistorsion adaptative soit sur l'une des voies seulement (version monodimensionnelle), soit sur l'ensemble des deux voies (version bidimensionnelle).

2- THÉORIE DU LINC

Toute modulation combinée d'amplitude et de phase peut s'écrire :

$$s(t) = I(t)\cos \omega_0 t + Q(t)\sin \omega_0 t$$

$$\text{ou encore : } s(t) = a(t)\cos [\omega_0 t + \varphi(t)]$$

$$\text{avec : } a^2(t) = I^2(t) + Q^2(t) \text{ et } \varphi(t) = \arctg[Q(t) / I(t)]$$

On peut montrer que le signal $s(t)$ peut se mettre sous la forme : $s(t) = s_1(t) + s_2(t)$

$s_1(t)$ et $s_2(t)$ étant 2 signaux d'amplitude constante définis comme suit :

$$s_1(t) = \frac{V}{2} \cos[\omega_0 t + \varphi(t) + \alpha(t)]$$

$$s_2(t) = \frac{V}{2} \cos[\omega_0 t + \varphi(t) - \alpha(t)]$$



avec $V = \max[a(t)]$

$$\alpha(t) = \arccos \frac{a(t)}{V}$$

Les signaux $s_1(t)$ et $s_2(t)$ peuvent alors être amplifiés séparément par des amplificateurs de gains respectifs G et $G + \Delta G$, fonctionnant à saturation.

Si $\Delta G = 0$, le signal obtenu en sortie de dispositif s'écrit :

$$u(t) = Gs(t).$$

La mise en œuvre pratique du dispositif, représenté sur la figure 1, nécessite de décomposer chaque signal $s_1(t)$ et $s_2(t)$ sous la forme de deux composantes en phase et en quadrature, respectivement $I_1(t), Q_1(t), I_2(t), Q_2(t)$ pour chacune des voies. Cette décomposition peut être réalisée par un processeur de traitement de signal (DSP).

Les signaux $s_1(t)$ et $s_2(t)$ obtenus après décomposition s'écrivent :

$$s_1(t) = I_1(t)\cos\omega_0t + Q_1(t)\sin\omega_0t$$

$$s_2(t) = I_2(t)\cos\omega_0t + Q_2(t)\sin\omega_0t$$

avec :

$$I_1(t) = \frac{1}{2}[I(t) - C(t)Q(t)]$$

$$Q_1(t) = \frac{1}{2}[C(t) \cdot I(t) + Q(t)]$$

$$I_2(t) = \frac{1}{2}[I(t) + C(t)Q(t)]$$

$$Q_2(t) = \frac{1}{2}[-C(t)I(t) + Q(t)]$$

$$C(t) = \frac{1}{2} \left[\frac{V^2 - [I^2(t) + Q^2(t)]}{I^2(t) + Q^2(t)} \right]^{\frac{1}{2}}$$

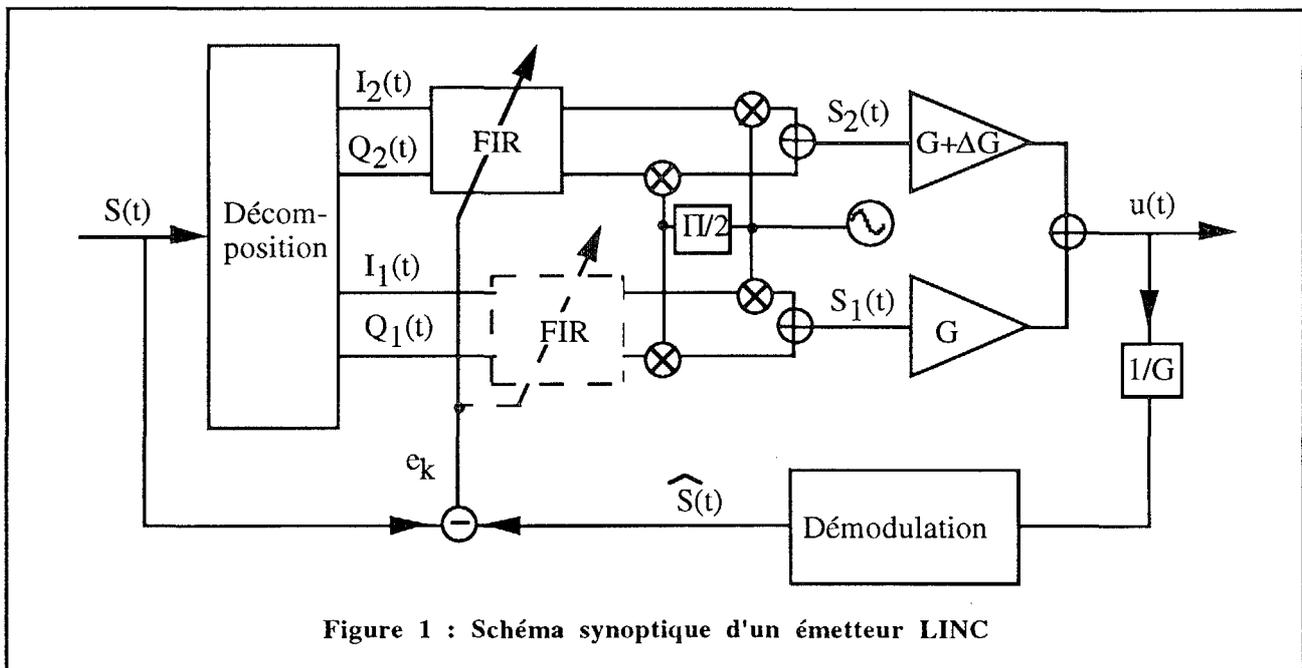


Figure 1 : Schéma synoptique d'un émetteur LINC

3 - ÉTAT DE L'ART

Les performances des émetteurs LINC ont déjà fait l'objet d'études. Un article [5] a mis en évidence les limites du système. Celles-ci sont dues aux différences de caractéristiques entre les 2 voies. Les 2 paramètres essentiels étaient les écarts de gain et de phase. Il a été montré qu'ils se traduisaient par un signal brouilleur superposé au signal désiré. Les conséquences des distorsions sont doubles. Il y a d'abord régénération du spectre dans les canaux adjacents. Les auteurs montraient que pour respecter une réjection de 43 dB, il faut que l'écart de gain soit inférieur à 0,4 dB, ou que l'écart de phase soit inférieur à 2 degrés. Les résultats dépendent peu de la modulation. Il y a ensuite dégradation de la constellation et donc du taux d'erreur. Pour une MAQ 64, un écart de gain de 1,2 dB ou un écart de phase de 3 degrés dégradent les performances de la modulation de 5 dB. Pour conclure, les auteurs se montraient pessimistes pour les modulations d'ordre supérieur aux MAQ 16.

4- PRÉDISTORSION ADAPTATIVE

Le paragraphe précédent met en évidence les difficultés de réalisation pratique du LINC. Une solution, à base de prédistorsion adaptative, telle que présentée sur la figure 1, résout ces problèmes de déséquilibre entre les deux voies.

Une version simple monodimensionnelle consiste à réaliser une prédistorsion complexe en bande de base sur les composantes I_2 et Q_2 du signal décomposé.

Dans ce cas, le second signal décomposé I_1 et Q_1 est considéré comme parfait. Ce dispositif adaptatif utilise comme signal de référence le signal $\hat{S}(t)$. La différence entre ce signal de référence et le signal de sortie démodulé $\hat{S}(t)$, échantillonné à la fréquence double de la fréquence symbole, donne un signal d'erreur qui pilote l'algorithme du gradient LMS complexe.

$$e_k = \begin{bmatrix} e_{I_k} \\ e_{Q_k} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} I(k \cdot Ts / 2) - \hat{I} \\ Q(k \cdot Ts / 2) - \hat{Q} \end{bmatrix}$$

Si \mathbf{H} est le vecteur coefficient du filtre FIR complexe alors

$$\mathbf{H}_{k+1} = \mathbf{H}_k + \mu \mathbf{X}_k^* e_k$$

avec

$$\mathbf{X}_k = \begin{bmatrix} I_{2k} \\ Q_{2k} \end{bmatrix}$$

Les coefficients optimaux permettent de minimiser l'Erreur Quadratique Moyenne entre $S(t)$ et $\hat{S}(t)$ et compensent donc parfaitement le déséquilibre entre les deux voies.

Cependant, si cette prédistorsion permet de compenser très efficacement des défauts de déséquilibre entre les deux voies, elle s'avère sous-optimale lorsque chacune des voies est affectée de distorsions, c'est-à-dire lorsque la voie non filtrée n'est pas parfaite.

Une version bi-dimensionnelle de cette prédistorsion comprenant un filtre adaptatif sur chaque voie décomposée permet alors de corriger ce type de perturbation. Dans ce cas, le signal d'erreur pilote les deux filtres adaptatifs.

Remarque : En général, le signal en sortie de la prédistorsion mono ou bi-dimensionnelle ne sera plus à enveloppe constante, il en découle donc que l'éventuelle interférence entre symboles en sortie du système aura une composante non-linéaire.

Cependant cette interférence résiduelle, comme il sera démontré à partir de simulations dans le paragraphe suivant, est très faible.

5 - RÉSULTATS DES SIMULATIONS

Les simulations que nous avons réalisées avaient pour but de vérifier la possibilité d'émettre des modulations à grandes efficacités spectrales en utilisant des amplificateurs non-linéaires. Nous avons travaillé avec des signaux de type MAQ 64 avec un roll-off de 15% .

Nous avons d'abord appliqué les distorsions statiques dont les conséquences avaient déjà été étudiées. Cela nous a permis de vérifier les gains du dispositif adaptatif. Dans un premier temps nous avons donc simulé des déséquilibres de gain et de phase, pour un système mono-dimensionnel. Nous avons ainsi défini une distorsion type, qui nous est apparue sévère mais réaliste : une différence de gain de 1,5 dB entre les 2 voies, et un écart de phase de 0,25 radian. Ces distorsions sont appliquées sur la voie qui est corrigée (voir figure 2).

La figure 2 donne l'allure du spectre obtenu avec et sans prédistorsion. On peut observer d'une part la régénération du spectre due aux déséquilibres des voies, d'autre part le gain obtenu par le dispositif adaptatif.

La figure 3 montre les effets des mêmes perturbations sur la constellation du signal émis. La prédistorsion laisse voir là encore son efficacité (Figure 4).

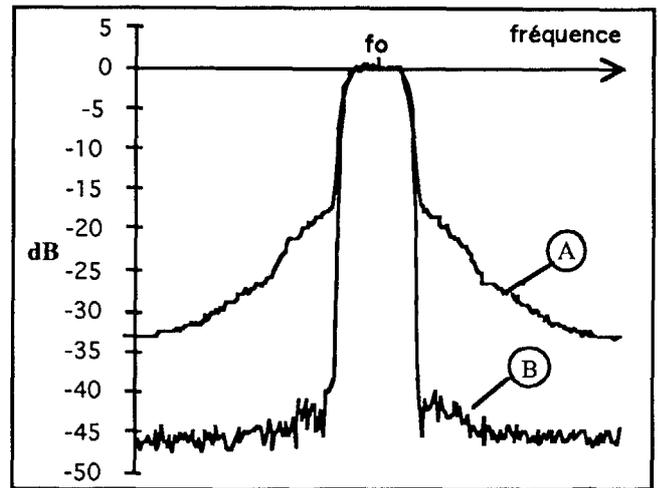


Figure 2 : Effet du déséquilibre des voies. Spectres d'un signal MAQ 64 émis : sans prédistorsion (courbe A) et avec prédistorsion (courbe B)

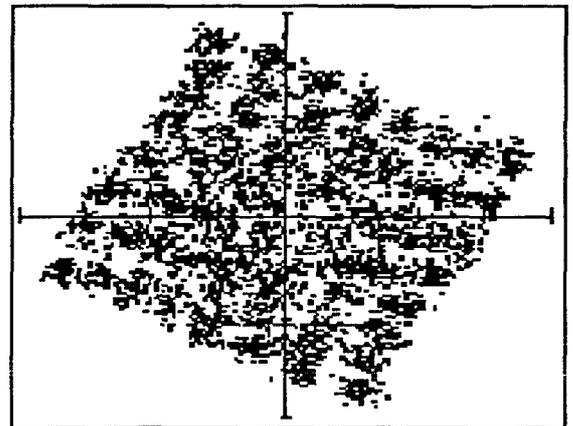


Figure 3 : Effet du déséquilibre des voies. Constellation d'un signal MAQ 64 émis sans prédistorsion

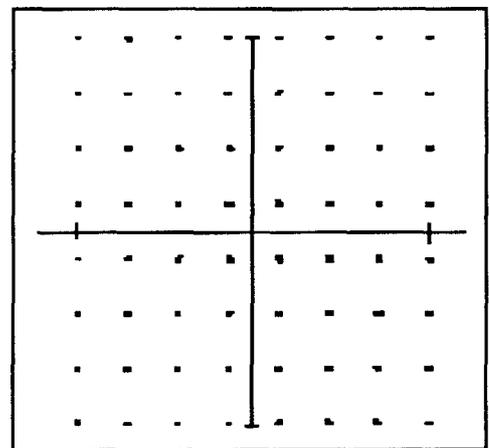


Figure 4 : Correction du déséquilibre des voies. Constellation d'un signal MAQ 64 émis avec prédistorsion



Nous avons ensuite vérifié le comportement du dispositif avec un système d'amplification non-linéaire : des tubes à ondes progressives (TOP) fonctionnant à saturation. Comme il a été précisé précédemment, la prédistorsion modifie l'enveloppe du signal. Il fallait donc vérifier que cela ne nuisait pas à l'efficacité du dispositif. Nous pouvons comparer les résultats obtenus en employant d'une part un TOP avec un recul à l'entrée de 6 dB (figure 5), avec ceux obtenus avec un TOP à saturation par une décomposition LINC (figure 6). Dans ce dernier cas les 2 voies étaient affectées des distorsions types.

Cependant lorsque chacune des deux voies est affectée de distorsions, il devient nécessaire de faire une précorrection bi-dimensionnelle. La figure 7 illustre ce cas. Une erreur de phase de 0,25 radian est appliquée à chacune des voies. L'écart des gains est comme précédemment de 1,5 dB. On peut voir à gauche les limites du système mono-dimensionnel. On peut constater à droite les meilleures performances obtenues grâce au dispositif à 2 filtres adaptatifs.

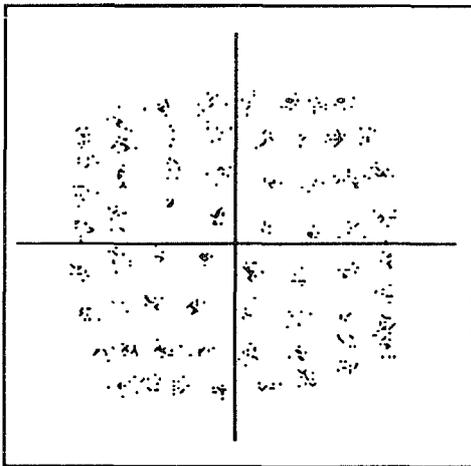


Figure 5 : Constellation obtenue après amplification conventionnelle d'un signal MAQ 64 avec un TOP fonctionnant avec un recul de 6 dB

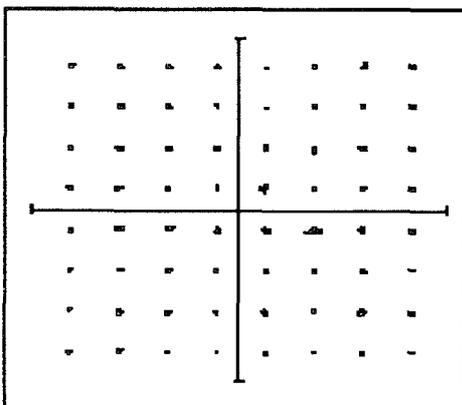


Figure 6 : Amplificateur LINC avec prédistorsion. Constellation à la sortie d'un TOP fonctionnant à saturation

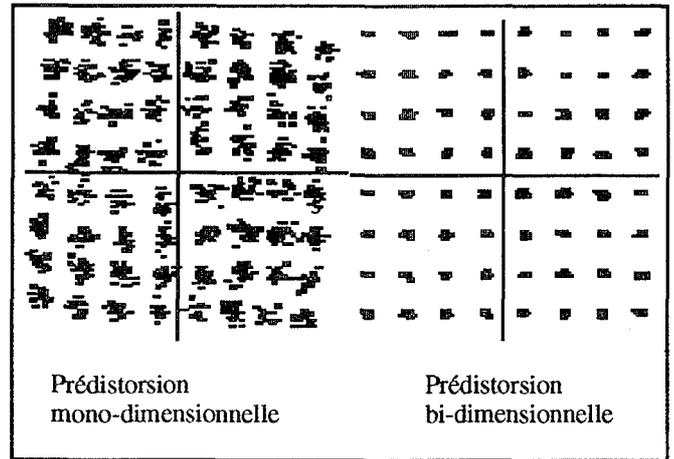


Figure 7 : Emetteurs LINC avec distorsion sur chacune des 2 voies

6- CONCLUSION

Cet article a montré que des techniques de prédistorsion adaptative permettent de résoudre le problème de déséquilibre entre les deux voies d'un système d'amplification de type LINC. Il reste maintenant à montrer la faisabilité pratique du système, en particulier à évaluer la précision des calculs nécessaires (en particulier la quantification des CAN/CNA), l'influence d'une instabilité éventuelle des fonctions analogiques mises en œuvre dans le dispositif de correction et enfin le coût du système en particulier si on l'applique à des modulations haut débit. Un démonstrateur est actuellement en cours de réalisation au CCETT.

RÉFÉRENCES

- [1] G.Karam, H.Sari " A Data Predistortion Technique with Memory for QAM Radio Systems " IEEE Transactions on Communications, vol.39 n°2 1991.
- [2] S.Benedetto, E.Biglieri " Nonlinear Equalization of Digital Satellite Channels " IEEE journal on selected areas in Com., vol. SAC-1, n°1 1983.
- [3] D.C.Cox " Linear Amplification with Nonlinear Components " IEEE Transactions on communications, décembre 1974.
- [4] S.A.Hetzel, A.Bateman, J P.McGeehan "LINC Transmitter" Electronics Letters, Vol 27, N°10, May 1991.
- [5] F.J.Casadevall, A.Valdivinos "Performance Analysis of QAM Modulations Applied to the LINC Transmitter " IEEE Transaction on Vehicular Technology. Vol.42 n°4 Novembre 1993.
- [6] F.J. Casadevall, J.J. Olmos "On the behaviour of the linc transmitter" in Proc - 40 th IEEE vehicular - Technology Conference, May 6-9 - 1990.