

## UN ALGORITHME DE PROJECTION A DEUX VOIES AVEC CONTRAINTES APPLICATION A L'ANNULATION D'ECHO ACOUSTIQUE STEREOPHONIQUE

*J. Benesty, P. Duhamel, Y. Grenier*

Télécom Paris, Département Signal  
46, rue Barrault 75634  
Paris Cedex 13, FRANCE

### RESUME

L'algorithme de projection affine (APA) mono-voie est maintenant bien connu. Une généralisation immédiate du principe de projection au cas bi-voies est faisable. Cependant, à cause de la forte corrélation des signaux d'entrée des deux voies, l'algorithme obtenu converge très lentement. Ce papier montre comment résoudre ce problème en travaillant sur des signaux constitués par projection d'une voie sur l'autre. L'algorithme complet comporte donc 2 projections : la première effectue une décorrélation des voies entre elles, la deuxième jouant le même rôle que dans le cas mono-voie.

### 1. INTRODUCTION

Les futurs systèmes de téléconférence seront très probablement stéréophoniques car ils permettent de mieux localiser les locuteurs et de donner un meilleur aperçu de l'environnement sonore. Cependant, les échos dans de tels systèmes sont bien plus importants que dans les systèmes de communications postes main-libres classiques à une voie. D'où la nécessité d'utiliser des annuleurs d'échos adaptés à cette situation.

Le principe de l'annulation d'écho acoustique bi-voies [1,2,3] peut être vu comme une simple généralisation de l'annulation d'écho acoustique mono-voie. La figure 1 en donne le principe. Seul un signal microphonique de la salle de restitution du son est représenté car le système est parfaitement symétrique et tout ce qui est fait à la sortie d'un micro s'étend de la même manière à la sortie de l'autre. Ainsi, l'annulation d'écho acoustique stéréophonique est un problème d'identification d'un système linéaire à 2 entrées et à 2 sorties. En effet, en ce qui concerne le micro M1, le signal reçu est la somme des 2 signaux d'entrée émis par les haut-parleurs HP1 et HP2 convolués respectivement par les 2 réponses impulsionnelles  $W_1$  et  $W_2$ . L'annuleur d'écho acoustique stéréophonique va donc essayer de modéliser ce système inconnu par des filtres adaptatifs  $H_1$  et  $H_2$ . Ce même principe s'applique à l'autre signal microphonique.

### ABSTRACT

The so-called mono-channel affine projection algorithm (APA) is now well-known. A straightforward generalization of the projection principle to the two-channel case is feasible. However, due to the strong correlation between the input signals of the 2 channels, the resulting algorithm converges very slowly. This paper describes the way to overcome this problem, and derives an efficient algorithm which turns out to make use of additional orthogonal projections.

Dans la salle de prise de son, les signaux microphoniques sont issus d'une même source, il existe donc une relation linéaire entre ces 2 signaux, ce qui peut poser des problèmes d'identification [3,4]. Cependant, comme la longueur des filtres de modélisation n'est pas liée à celle des réponses impulsionnelles de la salle distante, cette relation linéaire n'est plus vraie [4,6]. Nous sommes donc sûr d'obtenir une solution unique qui est aussi celle recherchée à notre problème.

Cependant, comme les signaux d'entrée sont issus d'une même source, ils sont fortement corrélés, ainsi un algorithme adaptatif doit tenir compte des statistiques d'inter-corrélation (comme l'algorithme RLS à 2 voies) pour avoir une bonne vitesse de convergence [4]. L'algorithme LMS bi-voies est très simple à mettre en œuvre mais son comportement adaptatif est médiocre car il ne tient pas compte de ces inter-corrélations et pendant la convergence de ce dernier, une forte interaction des filtres de modélisation empêchera l'algorithme de converger rapidement. Ainsi, toute démarche dans la dérivation d'algorithmes nouveaux dans le cas bi-voies doit aller dans le sens précisé au début de ce paragraphe.

L'algorithme de projection affine (APA) à une voie fut proposé pour la première fois dans [5]. Il peut être vu comme une simple généralisation du LMS normalisé (NLMS) dans lequel est introduit des corrélations du signal d'entrée. Cependant, comme nous le montrerons dans ce papier, une



simple dérivation de l'APA bi-voies à partir du NLMS bi-voies nous donne un algorithme qui ne résoud pas le problème posé. Nous montrerons comment dériver un algorithme amélioré tenant compte des inter-corrélations des signaux d'entrée.

## 2. ALGORITHME PROPOSE

Un moyen simple d'obtenir l'algorithme de projection mono-voie est de chercher un algorithme du type gradient annulant  $N$  erreurs *a posteriori* [7]. Ceci donne un système linéaire à  $N$  équations avec  $L$  inconnues ( $N \leq L$ ,  $L$  étant la taille du filtre) où la solution à norme minimale est choisie. Par la suite, nous étendons cette démarche.

### 2.1. Version standard

Par définition, les  $N$  erreurs *a priori*  $E(n)$  et les  $N$  erreurs *a posteriori*  $E_a(n)$  sont :

$$E(n) = Y(n) - \underline{X}'(n)H(n-1) \quad (1)$$

$$E_a(n) = Y(n) - \underline{X}'(n)H(n) \quad (2)$$

où  $H(n) = (H_1'(n) \ H_2'(n))'$ ,  $H_1(n)$  et  $H_2(n)$  sont les filtres de modélisation à l'instant  $n$  et sont de longueur  $L$ .

$\underline{X}(n) = (\underline{X}_1'(n) \ \underline{X}_2'(n))'$ , où la matrice  $\underline{X}_i(n) = (X_i(n), X_i(n-1), \dots, X_i(n-N+1))$ , de taille  $L \times N$ , est construite à partir des  $N$  derniers vecteurs d'entrée  $X_i(n)$  ( $i=1,2$ ) et  $Y(n)$  (resp.  $E(n)$ ) est le vecteur des  $N$  derniers échantillons du signal de référence  $y(n)$  (resp. signal d'erreur  $e(n)$ ).

En utilisant les équations (1) et (2) et en annulant les  $N$  erreurs *a posteriori*, on obtient :

$$\underline{X}'(n)\Delta H(n) = E(n) \quad (3)$$

$$\text{où : } \Delta H(n) = \begin{pmatrix} H_1(n) - H_1(n-1) \\ H_2(n) - H_2(n-1) \end{pmatrix}$$

L'expression (3) ( $N$  équations avec  $2L$  inconnues,  $N \leq 2L$ ) est un système linéaire qui a une infinité de solutions dont nous choisissons la solution à norme minimale, puisqu'elle donne les variations les plus faibles de  $H(n)$ . D'où l'algorithme :

$$H(n) = H(n-1) + \underline{X}(n)(\underline{X}'(n)\underline{X}(n))^{-1} E(n) \quad (4)$$

qui est l'équation d'adaptation des 2 filtres correspondant au micro M1.

### 2.2. Problème rencontré

Cependant, l'algorithme de projection obtenu dans le paragraphe précédent ne résoud en rien le problème posé dans la section 1. En effet, la matrice de normalisation :

$$\underline{X}'(n)\underline{X}(n) = \underline{X}_1'(n)\underline{X}_1(n) + \underline{X}_2'(n)\underline{X}_2(n)$$

ne tient pas compte des matrices d'inter-corrélation des 2 signaux d'entrée (à savoir  $\underline{X}_1'(n)\underline{X}_2(n)$  et  $\underline{X}_2'(n)\underline{X}_1(n)$ ). On observera en effet que cet algorithme de projection converge lentement (voir section 3).

### 2.3. Version améliorée

Une manière intuitive d'améliorer l'algorithme précédent est d'imposer que la variation du filtre  $\Delta H_1(n)$  (resp.  $\Delta H_2(n)$ ) est orthogonale au signal d'entrée lié à l'autre filtre  $\underline{X}_2'(n)$  (resp.  $\underline{X}_1'(n)$ ). Ceci revient à adapter chacun des filtres avec le minimum d'influence de l'un sur l'autre, ce qui a pour effet d'accélérer la vitesse de convergence de l'algorithme. Cette intuition se justifie très bien quand on fait le lien ensuite avec l'algorithme RLS à 2 voies [6,8]. Ces contraintes sont donc :

$$C_1(n) = \underline{X}_2'(n)\Delta H_1(n) = 0_{N \times 1} \quad (5)$$

$$C_2(n) = \underline{X}_1'(n)\Delta H_2(n) = 0_{N \times 1} \quad (6)$$

et le nouveau système linéaire caractérisant l'APA amélioré est :

$$\begin{pmatrix} \underline{X}_1'(n) & \underline{X}_2'(n) \\ \underline{X}_2'(n) & 0_{N \times L} \\ 0_{N \times L} & \underline{X}_1'(n) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta H_1(n) \\ \Delta H_2(n) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} E(n) \\ 0_{N \times 1} \\ 0_{N \times 1} \end{pmatrix} \quad (7)$$

Après un certain nombre de calculs, la solution à norme minimale de (7) est donnée par :

$$\Delta H(n) = \underline{Z}(n)(\underline{Z}'(n)\underline{Z}(n))^{-1} E(n) \quad (8)$$

où  $\underline{Z}(n) = (\underline{Z}_1'(n) \ \underline{Z}_2'(n))'$  et :

$$\underline{Z}'(n)\underline{Z}(n) = \underline{Z}_1'(n)\underline{Z}_1(n) + \underline{Z}_2'(n)\underline{Z}_2(n)$$

$$\underline{Z}_1(n) = [I_{L \times L} - P_2(n)]\underline{X}_1(n) \quad (9)$$

$$\underline{Z}_2(n) = [I_{L \times L} - P_1(n)]\underline{X}_2(n) \quad (10)$$

$P_i(n)$  ( $i=1,2$ ) sont des matrices de projection :

$$P_i(n) = \underline{X}_i(n)(\underline{X}_i'(n)\underline{X}_i(n))^{-1} \underline{X}_i'(n) \quad (11)$$

Finalement, l'APA amélioré sera utilisé sous la forme suivante :

(12)

$$H(n) = H(n-1) + \alpha_0 \underline{Z}(n) \left( \underline{Z}'(n) \underline{Z}(n) \right)^{-1} E(n)$$

$$\underline{Z}'_1(n) = [I_{L \times L} - \alpha_1 P_2(n)] \underline{X}'_1(n) \quad (13)$$

$$\underline{Z}'_2(n) = [I_{L \times L} - \alpha_2 P_1(n)] \underline{X}'_2(n) \quad (14)$$

où  $0 < \alpha_j < 1$ ;  $j = 0, 1, 2$  sont des constantes.  $\alpha_0$  permet de trouver un compromis entre la vitesse de convergence et l'erreur résiduelle, tandis que  $\alpha_1$  et  $\alpha_2$  sont nécessaires en pratique pour contrôler la stabilité de l'algorithme. On pourra remarquer que l'APA standard est un cas particulier de ce dernier en prenant  $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$ .

## 2.4. Liens avec l'algorithme RLS bi-voies

On montre facilement, en factorisant l'inverse de la matrice de covariance bi-voies, que l'algorithme RLS à 2 voies s'écrit :

$$e(n) = y(n) - \sum_{i=1}^2 X'_i(n) H_i(n-1) \quad (15)$$

$$H_1(n) = H_1(n-1) + R_1^{-1}(n) Z_1(n) e(n) \quad (16)$$

$$H_2(n) = H_2(n-1) + R_2^{-1}(n) Z_2(n) e(n) \quad (17)$$

avec :

$$Z_1(n) = X_1(n) - R_{x_1 x_2}(n) R_{x_2 x_2}^{-1}(n) X_2(n) \quad (18)$$

$$Z_2(n) = X_2(n) - R_{x_2 x_1}(n) R_{x_1 x_1}^{-1}(n) X_1(n) \quad (19)$$

$$R_1(n) = R_{x_1 x_1}(n) - R_{x_1 x_2}(n) R_{x_2 x_2}^{-1}(n) R_{x_2 x_1}(n) \quad (20)$$

$$R_2(n) = R_{x_2 x_2}(n) - R_{x_2 x_1}(n) R_{x_1 x_1}^{-1}(n) R_{x_1 x_2}(n) \quad (21)$$

où :

$$R_{x_i x_j}(n) = w R_{x_i x_j}(n-1) + X_i(n) X'_j(n)$$

$i = 1, 2$

et  $w$  est un facteur d'oubli exponentiel.

Les expressions (18), (19), (20) et (21) sont similaires à celles que l'on a dans l'APA amélioré (on retrouve les mêmes principes de transformation des signaux d'entrée et de construction des matrices de normalisation), à savoir :

$$\underline{Z}'_1(n) = \underline{X}'_1(n) - \underline{R}_{x_1 x_2}(n) \underline{R}_{x_2 x_2}^{-1}(n) \underline{X}'_2(n) \quad (22)$$

$$\underline{Z}'_2(n) = \underline{X}'_2(n) - \underline{R}_{x_2 x_1}(n) \underline{R}_{x_1 x_1}^{-1}(n) \underline{X}'_1(n) \quad (23)$$

$$\underline{R}_1(n) = \underline{R}_{x_1 x_1}(n) - \underline{R}_{x_1 x_2}(n) \underline{R}_{x_2 x_2}^{-1}(n) \underline{R}_{x_2 x_1}(n) \quad (24)$$

$$\underline{R}_2(n) = \underline{R}_{x_2 x_2}(n) - \underline{R}_{x_2 x_1}(n) \underline{R}_{x_1 x_1}^{-1}(n) \underline{R}_{x_1 x_2}(n) \quad (25)$$

où :

$$\underline{R}_{x_i x_j}(n) = \underline{X}'_i(n) \underline{X}_j(n)$$

$$\underline{R}_i(n) = \underline{Z}'_i(n) \underline{Z}_i(n)$$

$i, j = 1, 2$

A la convergence de l'algorithme RLS bi-voies, et si les signaux d'entrée sont stationnaires, on a :

$$E\{\Delta H_1(n) X'_2(n)\} = 0_{L \times L} \quad (26)$$

$$E\{\Delta H_2(n) X'_1(n)\} = 0_{L \times L} \quad (27)$$

De la même manière, à la convergence de l'APA amélioré, on obtient :

$$E\{\underline{X}'_2(n) \Delta H_1(n)\} = 0_{N \times 1} \quad (28)$$

$$E\{\underline{X}'_1(n) \Delta H_2(n)\} = 0_{N \times 1} \quad (29)$$

Pour les 2 algorithmes, on en déduit les mêmes conditions d'orthogonalités :

$$E\{X'_2(n) \Delta H_1(n)\} = 0 \quad (30)$$

$$E\{X'_1(n) \Delta H_2(n)\} = 0 \quad (31)$$

D'autre part, dans le cas particulier où  $N = 2L$  et en mettant à jour les filtres une fois tous les  $N$  échantillons, l'algorithme de projection amélioré devient :

(32)

$$H(n) = H(n-N) + \alpha_0 \left( \underline{X}(n) \underline{X}'(n) \right)^{-1} \underline{X}(n) E(n)$$

qui est aussi l'algorithme RLS par bloc à deux voies avec une fenêtre rectangulaire de longueur  $L$ .

## 3. SIMULATIONS

Dans cette section, nous comparons par simulations les algorithmes précédents. Les réponses impulsionnelles à identifier ont été tronquées à 256 points. Elles ont été mesurées dans une salle de téléconférence, ainsi que les 2 signaux d'entrée. Le signal source est du type "USASI". Un bruit blanc est ajouté à la sortie ( $SNR \approx 60dB$ ). La longueur des filtres de modélisation est égale à 256. Tous les algorithmes ont été réglés de manière à avoir la meilleure vitesse de convergence. La figure 2 compare le NLMS bi-voies et l'APA amélioré (avec  $\alpha_0 = 1$  et  $\alpha_1 = \alpha_2 = 0.5$ ) pour  $N = 1$  et  $N = 8$ . Nous pouvons constater que l'algorithme proposé converge bien plus vite que le NLMS avec de meilleures performances quand  $N$  augmente. La figure 3 montre le comportement de l'APA standard ( $\alpha_0 = 1$  et  $\alpha_1 = \alpha_2 = 0$ ) qui, comme prévu plus haut, converge moins vite.



### 4. CONCLUSION

Nous avons vu que la généralisation de l'APA mono-voie au cas bi-voies n'était pas immédiate. En effet, le moyen classique de dériver l'algorithme de projection à partir du NLMS nous a donné un algorithme sous-optimal où les inter-corrélations des signaux d'entrée ne sont pas prises en compte. Nous avons montré comment aboutir à une version améliorée en imposant certaines contraintes et l'algorithme obtenu contient les statistiques nécessaires pour avoir un bon comportement adaptatif.

### REFERENCES

[1] M. M. Sondhi, D. R. Morgan, "Acoustic Echo Cancellation for Stereophonic Teleconferencing" IEEE Workshop on Audio and Acoustics, Mohonk Mountain House, NY, May 1991.  
 [2] A. Hirano, A. Sugiyama, "Convergence Characteristics of a Multi-Channel Echo Canceller with Strongly Cross-Correlated Input Signals", Proc. of 6th DSP symposium, Nov. 1991.

[3] Y. Mahieux, A. Gilloire, F. Khalil, "Annulation d'Echo en Téléconférence Stéréophonique", GRETSI 1993, France.  
 [4] J. Benesty, F. Amand, A. Gilloire, Y. Grenier, "Adaptive Filtering Algorithms for Stereophonic Acoustic Echo Cancellation", IEEE ICASSP, Detroit, USA, May 1995.  
 [5] K. Ozeki, T. Umeda, "An Adaptive Filtering Algorithm Using an Orthogonal Projection to an Affine Subspace and its Properties", Elec. and Com. in Japan, Vol. J67-A, N°5, Feb. 1984.  
 [6] J. Benesty, P. Duhamel, Y. Grenier, "Multi-Channel Adaptive Filtering Applied to Multi-Channel Acoustic Echo Cancellation", Soumis à IEEE Trans. on SP, Avril 1995.  
 [7] M. Montazeri, P. Duhamel, "A Set of Algorithms Linking NLMS and Block RLS Algorithms", IEEE Trans. on SP, Feb. 1995.  
 [8] J. Benesty, P. Duhamel, Y. Grenier, "A Multi-Channel Affine Projection Algorithm with Applications to Multi-Channel Acoustic Echo Cancellation", Soumis à IEEE Trans on SPL, Fev. 1995.

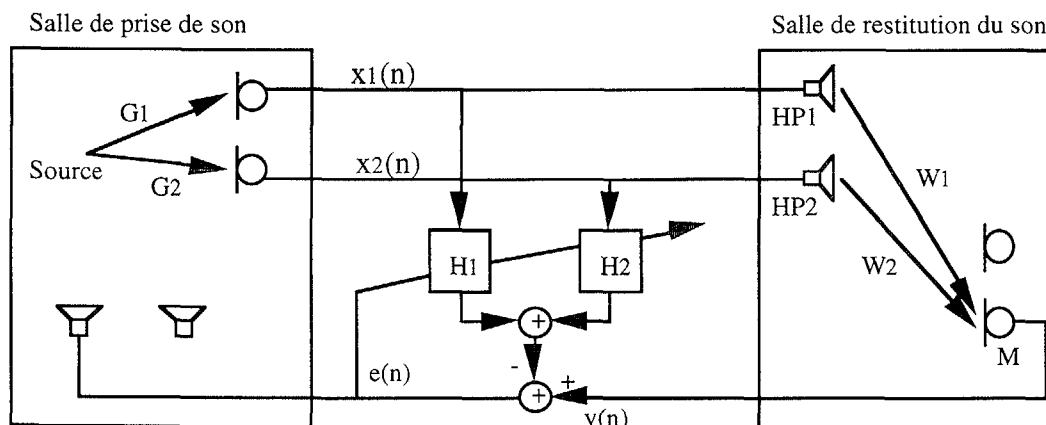


Figure 1 : Principe d'un annuleur d'écho acoustique stéréophonique

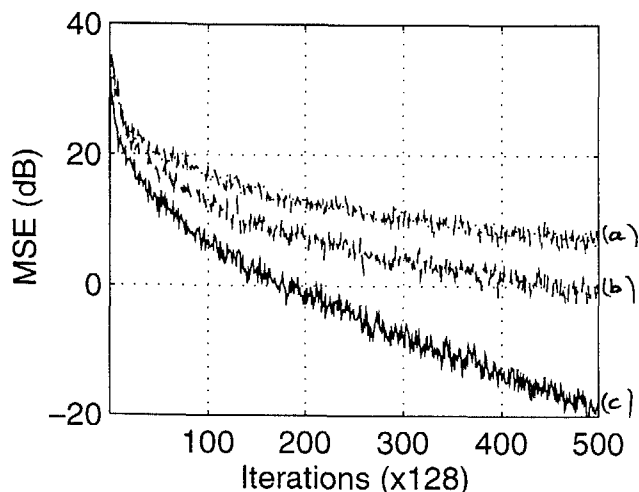


Figure 2 : Comparaison du NLMS à 2 voies (a) et de l'APA amélioré quand  $N = 1$  (b) et  $N = 8$  (c).

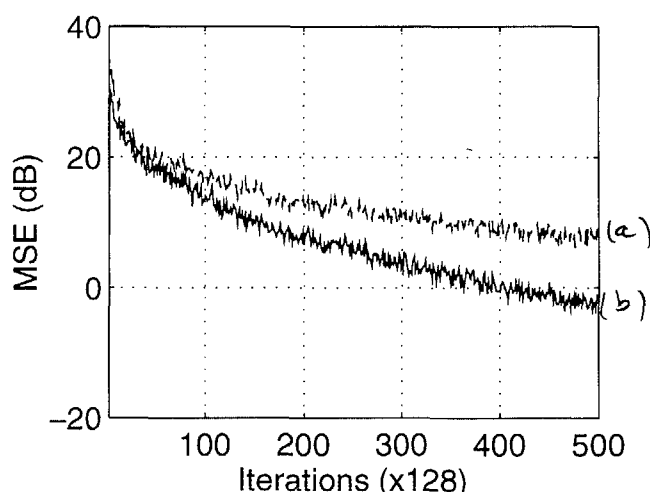


Figure 3 : Comparaison de l'APA standard quand  $N = 1$  (a) et  $N = 8$  (b).