

Quelques résultats concernant la méthode « Principal Component Inverse » pour la détection en présence de réverbération

Guillaume GINOLHAC, Geneviève JOURDAIN

LIS-ENSIEG

BP46 38402 Saint Martin d'Hères, France

Guillaume.Ginolhac@lis.inpg.fr, Genevieve.Jourdain@lis.inpg.fr

Résumé –

En acoustique sous-marine, la réverbération est considérée comme une source de bruit qui perturbe les systèmes de détection par sonar actif. En effet, la réverbération est supposée être composée d'une somme d'échos causés par le signal émis, et donc les traitements classiques comme le filtre adapté ne sont pas efficaces. Dans cet article, nous étudions la méthode « Principal Component Inverse » (PCI), proposée par Tufts et Kirsteins [1], qui consiste à estimer la réverbération, puis à la supprimer pour pouvoir appliquer les traitements classiques.

Après la présentation de la méthode qui introduit une matrice « forward », nous donnons des résultats importants concernant le rang de cette matrice pour deux types de signaux (fréquences pures et fréquences modulées). Nous démontrons que ce rang est lié au contenu fréquentiel du signal. L'algorithme du PCI est testé sur des données synthétiques et dans des problèmes de détection en sonar actif en présence de bruit de réverbération réel, ce qui permet de montrer l'apport du PCI sous certaines hypothèses de rapport signal à bruit de réverbération.

Abstract –

In underwater acoustics, the reverberation phenomenon is considered as a source of noise. Its presence in active sonar detection makes the detection very difficult. For example, the classical matched filter is not powerful in this case. In this article, we study a method proposed by Tufts and Kirsteins to delete reverberation. The name of this method is "Principal Component Inverse" (PCI). It consists in calculating reverberation, then deleting it to have to use the classical treatments.

After a description of the method which introduces a "forward" matrix, we present some results about the rank of this matrix for two kinds of signals (FP and FML). The link of rank with the frequency contents of the received signal is demonstrated. The method is tested with numerical simulations and in active sonar detection data. The target is located in real reverberation noise. These results show that PCI is very efficient in some particular conditions of signal to reverberation noise ratio.

1 Introduction

En acoustique sous-marine, la réverbération est considérée comme une source de bruit qui perturbe les systèmes de détection par sonar actif. Elle est provoquée par les réflexions du signal émis sur les inhomogénéités présentes dans le milieu et par l'existence d'interfaces aux propriétés physiques différentes : interfaces air-mer et mer-sol. Cette source de bruit peut être très importante. De plus, la corrélation entre la réverbération et le signal émis diminue l'efficacité des traitements classiques de détection comme le filtre adapté.

Certaines méthodes [6] consistent à modéliser la réverbération comme un bruit non stationnaire et coloré pour traiter le problème de détection. Ici, nous proposons d'estimer la réverbération pour la supprimer ensuite. Tufts et Kirsteins [1] ont décrit une méthode permettant de retrouver le signal à détecter en présence de bruit blanc. Cette méthode, qui se nomme le « Principal Component Inverse » (ou PCI), sépare le signal reçu en un sous espace signal et en un sous espace bruit. La décomposition du signal s'appuie sur l'approximation d'une matrice par une autre matrice de rang plus faible. Ils appliquent ensuite [2]

cette méthode au problème de la détection en présence de réverbération. Ils supposent la réverbération forte devant le signal utile, le traitement estime donc la réverbération dans l'espace signal, ce qui permet de supprimer la réverbération et d'utiliser enfin les traitements classiques.

La difficulté de l'estimation d'une matrice par une autre matrice de rang plus faible provient du calcul du rang de la nouvelle matrice. De plus, la justification physique du rang d'une matrice n'est pas évidente. Dans cet article, nous décrivons tout d'abord la méthode PCI, puis nous donnons certaines explications reliant le rang à la fréquence d'un signal ce qui permet de valider l'algorithme du PCI sur des données synthétiques. Enfin, la méthode est utilisée dans des problèmes de détection en sonar actif en présence de bruit de réverbération réel.

2 Présentation de la méthode PCI

2.1 Modélisation et hypothèses

Nous supposons travailler avec un seul capteur. Le signal reçu, X_{rec} , s'écrit sous la forme d'une somme de trois composantes :

$$X_{rec}(t) = S(t) + B_{reverb}(t) + B_{blanc}(t), \quad (1)$$

où S est le signal utile, B_{reverb} la composante réverbération et B_{blanc} le bruit blanc. On veut séparer la réverbération du reste du signal et pour cela, il faut engendrer un sous espace fini à partir de X_{rec} . Il est donc nécessaire de construire une matrice. Tufts et Kirsteins [1] se servent d'une matrice qui provient d'études faites dans le domaine de la prédiction linéaire [4]. On note X le vecteur de longueur N d'un bloc quelconque de X_{rec} . Avec le vecteur X , il est possible de former la matrice Y qui est appelée matrice « forward » :

$$Y = \begin{pmatrix} X(p) & X(p-1) & \cdots & X(1) \\ X(p+1) & X(p) & \cdots & X(2) \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ X(N) & X(N-1) & \cdots & X(N-p+1) \end{pmatrix}. \quad (2)$$

avec p qui est choisi proche de $N/2$.

Pour pouvoir séparer, à partir de Y , la réverbération et le signal utile, deux hypothèses sont nécessaires: le bruit blanc et le signal utile sont supposés faibles devant la réverbération et la réverbération est de rang faible. La seconde hypothèse oblige à un découpage en bloc particulier de X_{rec} . En effet, cela signifie que le rang du sous espace réverbération est faible. On suppose pour l'instant que ce rang est lié au nombre d'échos présents dans le bloc. Cette supposition sera étudiée dans le paragraphe 3. Il faut donc choisir des blocs avec peu d'échos. Une solution est de découper X_{rec} en blocs de faible taille. Tufts et Palka [3] proposent des blocs de taille 1/8 la taille du signal émis. Dans cet article, nous avons choisi le même découpage.

2.2 Algorithme du PCI

L'algorithme décompose Y en deux matrices Y_R et Y_0 , qui vérifient :

$$Y = Y_R + Y_0, \quad (3)$$

où Y_R décrit l'espace réverbération et Y_0 l'espace bruit blanc plus signal utile. L'estimation de Y_R s'appuie sur l'approximation de la matrice Y par une autre matrice de rang plus faible. D'après le théorème d'Eckart et Young [5], il faut calculer la décomposition en valeurs singulières de Y :

$$Y = U\Sigma V^H = [U_R|U_0] \begin{bmatrix} \Sigma_R & 0 \\ 0 & \Sigma_0 \end{bmatrix} [V_R|V_0]^H, \quad (4)$$

où U est la matrice des vecteurs propres gauches de Y , V la matrice des vecteurs propres droits de Y et Σ la matrice diagonale contenant les valeurs singulières de Y . Les valeurs singulières de Y , $\{\sigma_i\}$, sont rangées par ordre croissant. $Y_R = U_R U_R^H Y$ est la matrice optimale qui approche Y au sens de la norme de Froebenius. Y_R décrit uniquement la réverbération car sa puissance est plus importante que celles des autres composantes. Un vecteur

X_{reverb} est ainsi récupéré à partir de Y_R . La détection du signal utile est ensuite effectuée avec le filtre adapté sur $X - X_{reverb}$.

2.3 Estimation du rang de Y_R et problèmes du traitement

La difficulté du traitement provient de l'estimation du rang r de Y_R . On pose R_Y le rang de Y . Un seuil T , lié à la puissance du bruit blanc dans un bloc, est choisi. Ensuite, sur chaque bloc de X_{rec} , la somme des valeurs singulières aux carrés est calculée puis comparée au seuil T . S'il existe un nombre L tel que :

$$\sum_{i=0}^L \sigma_{R_Y-i}^2 > T, \quad (5)$$

alors le rang de Y_R est choisi égal à $R_Y - L + 1$.

Une des hypothèses de fonctionnement du PCI est que la réverbération soit de rang faible (c'est à dire r). Dans le paragraphe 2.1, X_{rec} est découpé de telle façon que le nombre d'échos présents dans le bloc soit peu important. Le prochain paragraphe décrit dans quelle mesure le rang et le nombre d'échos sont liés.

3 Calculs de rang pour des signaux à fréquences pures et modulation linéaire

Dans ce paragraphe, nous montrons que le rang d'une matrice « forward » est lié au nombre de fréquences contenues dans le bloc. Ce résultat est obtenu avec les fréquences pures, et ceci nous permet de tester l'algorithme du PCI. Ensuite, nous appliquons le PCI sur des signaux large bande de type FML. Les simulations numériques suivent le même procédé dans les trois paragraphes. Un bruit blanc, gaussien et centré de longueur 4096 points est simulé. Un ou deux échos de longueur 480 points sont ensuite ajoutés au bruit blanc. Le PCI est appliqué sur les données synthétiques avec des blocs de longueur 60 points. T est choisi voisin de la puissance du bruit blanc dans un bloc.

3.1 Fréquences pures

On se place d'abord dans le cas le plus simple. X est constitué d'un morceau d'une fréquence pure qui a pour expression, après échantillonnage :

$$S_{fp}(k) = A \exp(2i\pi \frac{\nu}{\nu_e} k), \quad (6)$$

où ν_e est la fréquence d'échantillonnage, ν la fréquence et k le numéro de l'échantillon. D'après les équations 2 et 6, il est évident que le rang de Y est égal à 1. De plus, il est possible de montrer que le rang est proportionnel au nombre de fréquences pures présentes dans le bloc.

Avec ce résultat, on désire vérifier l'algorithme du PCI, et en particulier l'étape de l'estimation du rang. Deux fréquences pures différentes sont ajoutées au bruit blanc :

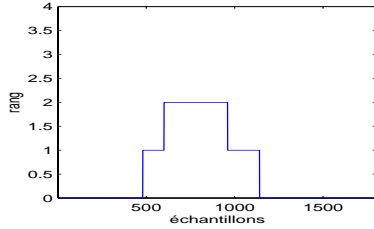


FIG. 1: estimation du rang pour deux échos FP.

l'une à partir de l'échantillon 480 et l'autre à partir de l'échantillon 600. La figure 1 montre le résultat de l'estimation du rang. Il est conforme à la théorie, c'est à dire que le rang est nul sur les blocs de bruit blanc, égal à 1 quand le bloc contient une fréquence pure et égal à deux quand il en contient deux. Le résultat du premier bloc peut être différent si le début du signal se trouve au milieu du bloc.

3.2 Fréquences à modulation linéaire

En sonar actif, les signaux large bande sont de plus en plus utilisés. Ces signaux ont une fréquence instantanée non constante. Nous utilisons un signal à modulation linéaire de fréquence (FML). Il est clair que le rang est supérieur à 1 d'après les résultats du paragraphe 3.1. Tufts et Palka [3] ont connu le même problème avec des signaux à modulation hyperbolique (FMH) et ils ont utilisé une méthode analogue au « dechirping » pour diminuer l'estimation du rang. En fait, il suffit de multiplier le vecteur X par un morceau du conjugué du signal émis de même longueur que le bloc. Nous mettons en œuvre une méthode équivalente pour les signaux FML. La phase d'un signal FML de bande B , de durée T et de fréquence centrale f_0 s'exprime :

$$\phi(t) = 2\pi\left(-\frac{B}{2T}t^2 + (f_0 + B/2)t\right). \quad (7)$$

La multiplication de la FML avec le conjugué d'un morceau du signal émis donne une fréquence pure différente suivant le bloc. Le rang est donc égal à 1 sur chaque bloc.

Le PCI est d'abord appliqué sur un écho causé par un signal FML modifié par « dechirping ». Cette simulation permet de vérifier l'hypothèse de rang faible pour la réverbération et l'effet du « dechirping ». Les figures 2 et 3 représente le rang pour l'écho FML et pour l'écho FML modifié. Le résultat pour la FML seule est encourageant. En effet, le rang est de 3 (pour une matrice 31×30), ce qui est assez faible. Ce résultat permet de comprendre l'importance de la taille des blocs : plus leur longueur est faible, moins la fréquence évolue dans le bloc donc moins le rang est important. Il est clair que la bande du signal joue aussi un rôle important. Le résultat pour la FML modifiée est lui aussi conforme à la théorie. Sur chaque bloc, le signal est équivalent à une fréquence pure et l'estimation du rang est égale à 1.

3.3 Influence du nombre d'échos sur le rang

Le paragraphe 2.3 a montré l'importance du lien entre l'estimation du rang par le PCI et le nombre d'échos. En effet, il est possible que tous les échos (même de puissances différentes) soient décrits par les mêmes valeurs singulières, alors la séparation de la réverbération et du signal utile devient impossible. Dans le paragraphe 3.1, il est montré que le rang d'une matrice « forward » représente le nombre de fréquences présentes dans le bloc (dans le cas d'un bon découpage). Il est clair que pour des fréquences pures, si l'écho cible ne subit pas de décalage doppler et la réverbération d'élargissement fréquentiel, la première valeur singulière décrit l'écho cible mais aussi les échos de réverbération. Il est donc impossible de différencier la réverbération et le signal utile.

Le problème est différent pour les signaux large bande. La figure 4 montre la courbe de la fréquence instantanée de deux échos FML décalés en temps d'un bloc. Le premier bloc ne contient que le premier écho, tandis que le second bloc contient les deux échos mais aussi deux fois plus de fréquences. Le rang de la matrice sur le bloc 2 est donc deux fois plus important que sur le bloc 1, et les deux échos ne seront pas décrits par les mêmes valeurs singulières. Nous vérifions ce résultat par une simulation. Deux échos FML identiques décalés de deux blocs sont ajoutés au bruit blanc. La figure 5 montre l'estimation du rang par l'algorithme du PCI. Le rang est égal à trois pour une seule FML et à 6 pour deux FML présentes dans le bloc. Le rang et le nombre d'échos semblent donc liés pour des signaux large bande. Le « dechirping » effectué sur les échos ne change rien à cette propriété de proportionnalité parce que la fréquence est différente pour chaque bloc. Un décalage en temps suffit donc.

4 Détection sonar actif en présence de bruit de réverbération réel

Nous avons testé le PCI sur un bruit de réverbération réel en transmission sonar actif. Le signal émis est une FML de fréquence centrale 22500 Hz, de bande 3000 Hz et de durée 51 ms. Le signal reçu est démodulé et sous échantillonné. La fréquence d'échantillonnage est égale à environ 8040 Hz. Ce signal correspond à de la réverbération réelle [6]. L'écho cible est simulé puis ajouté aux données de réverbération expérimentales. Le rapport signal à bruit de réverbération est de -15 dB. Étant donné la puissance de notre signal utile, le seuil est choisi quatre

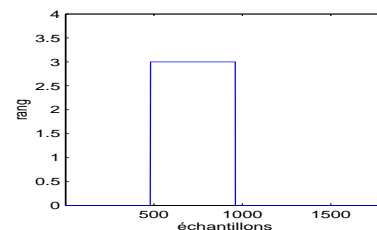


FIG. 2: estimation du rang pour un écho FML.

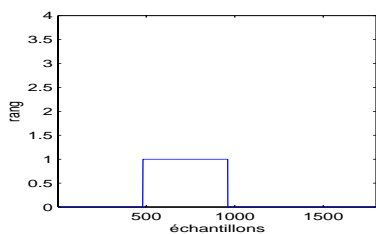


FIG. 3: estimation du rang pour un écho FML modifié.

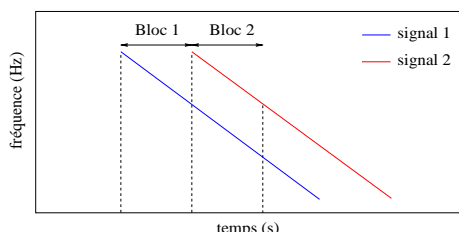


FIG. 4: fréquence instantanée de deux échos FML décalés d'un bloc.

fois supérieur à la puissance du bruit blanc dans un bloc. La figure 6 montre trois courbes: la première le signal reçu, la seconde le signal après traitement et la troisième l'estimation du rang. On remarque que le rang est compris entre 2 et 4, ce qui est raisonnable. Le signal après traitement montre une réduction importante de la puissance. La figure 7 montre la sortie du filtre adapté pour deux cas: sans traitement et avec PCI. Le résultat est probant, la cible n'est pas repérable sur la figure du dessus alors que le pic ressort de façon très nette sur la figure située en bas.

5 Conclusion

Cette étude a permis d'approfondir la signification du rang d'une matrice « forward » et de le relier au contenu fréquentiel du signal. Les données synthétiques montrent que le PCI estime correctement le rang selon le type de signal émis. Nous avons mis aussi en évidence le problème de séparation des échos avec la matrice « forward ». Nous avons montré qu'il était impossible d'utiliser les fréquences pures avec le PCI dans certaines conditions. En revanche, les résultats sur du bruit de réverbération réel causé par une FML sont bons.

Il reste à déterminer la plage de fonctionnement de cette méthode et de la comparer avec d'autres méthodes de détection en présence de réverbération. De plus, il serait intéressant d'utiliser le PCI avec d'autres matrices, en par-

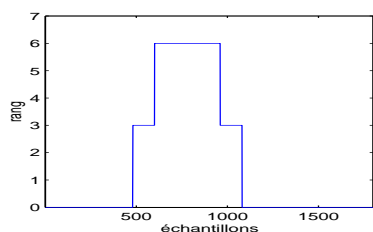


FIG. 5: estimation du rang pour deux échos FML.

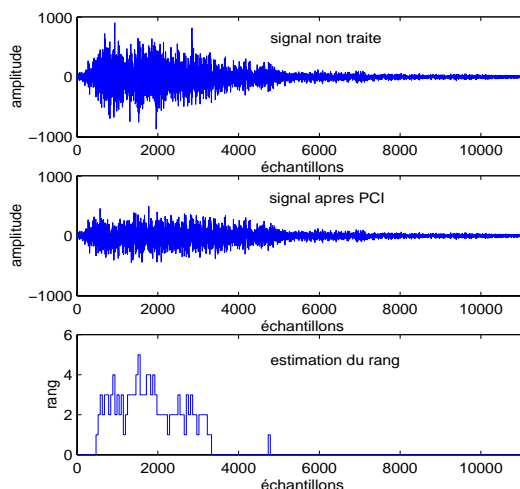


FIG. 6: bruit de réverbération réel causé par un signal FML.

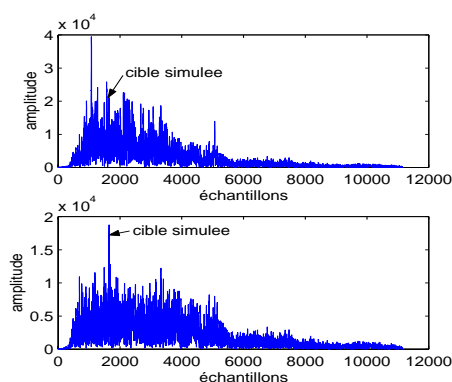


FIG. 7: filtre adapté sans PCI et après PCI.

ticulier avec l'information spatio-temporelle.

Références

- [1] R. Kumaresan, I. P. Kirsteins et D. W. Tufts. *Data Adaptive Signal Estimation by Singular Value Decomposition of a Data Matrix*. Proceedings of the IEE, June 1982.
- [2] I. P. Kirsteins et D. W. Tufts. *Adaptive Detection Using Low Rank Approximation to a Data Matrix*. IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, January 1994.
- [3] T. A. Palka et D. W. Tufts. *Reverberation characterization and suppression by means of principal components*. Proceedings of Ocean, September 1998.
- [4] A. H. Nuttal. *Spectral analysis of a univariate process with bad data points via maximum entropy and linear predictive technics*. Spectral Estimation, March 1976.
- [5] C. Eckart et G. Young. *The approximation of one matrix by another of lower rank*. Psychometrika, vol. 1, pp. 211-218, 1936.
- [6] V. Carmillet, P. O. Amblard et G. Jourdain. *Detection of wideband signals in reverberation noise*. JASA, A paraître, 1999.