

Détection d'échos laser en présence de rétrodiffusion

Jean-Pierre TANGUY

DCE/GESMA
TEC/DDNA - BP 42 - 29240 BREST NAVAL
tanguy@gesma.fr

Résumé - On présente une méthode de détection et d'extraction d'échos laser de cibles faiblement immergées obtenus expérimentalement avec un lidar impulsif illuminant la surface de l'eau. Les échos sont des signaux transitoires noyés dans un mélange non stationnaire de rétrodiffusion et de bruit propre du récepteur. La méthode considérée est inspirée de la méthode « PCI » (Principal Component Inverse) utilisée dans d'autres applications, comme par exemple le sonar [1]. Le principe consiste à estimer la rétrodiffusion, à la retrancher de l'observation et à appliquer un traitement de type « filtrage adapté » à la nouvelle observation. Des tests effectués sur des signaux expérimentaux de formes variées font apparaître des fausses alarmes. On propose des moyens pour réduire celles-ci à un niveau acceptable.

Abstract - A method of detection and extraction of laser echoes from weakly immersed underwater targets obtained with a pulse lidar illuminating the water surface is presented. The echoes are transient signals embedded in a non stationary mixture of backscattering and receiver self noise. The method under consideration is inspired from the « PCI » method (Principal Component Inverse) used in other applications, such as sonar [1]. It consists in the estimation of backscattering, its elimination from the available observation, and the application of a « matched filtering » process to the new observation. Tests performed on experimental signals with various forms exhibit false alarms. Means are proposed in order to reduce false alarms to an acceptable level.

1 – Introduction

Des signaux laser de formes variées ont été obtenus expérimentalement au moyen d'un lidar impulsif illuminant la surface de l'eau. Le but est de détecter la présence d'un écho transitoire correspondant à un objet de faibles dimensions situé soit en surface, soit à une faible profondeur. Les échos utiles sont noyés dans un mélange non stationnaire de rétrodiffusion des milieux de propagation (air, eau, traversée du dioptre air/eau) et de bruit propre du récepteur.

La méthode de détection considérée s'inspire de la méthode « PCI » (Principal Component Inverse). Le principe est d'estimer la rétrodiffusion sur une ou plusieurs observations successives (correspondant à plusieurs récurrences laser sur la même zone d'intérêt), de la soustraire des observations, puis d'appliquer aux nouvelles observations un traitement classique de type « filtrage adapté » [1]. Plus précisément, l'estimation de la rétrodiffusion consiste en une analyse en composantes principales d'une matrice de données mono ou multi-observation. Les valeurs singulières significatives sont censées correspondre à la rétrodiffusion, dont la puissance est supposée supérieure à celle des autres composantes [1] [3]. L'efficacité de la méthode repose sur la possibilité d'estimer correctement la rétrodiffusion, c'est à dire d'obtenir des valeurs singulières dont les plus grandes se détachent nettement des autres. Une difficulté réside d'ailleurs dans l'estimation du nombre de valeurs singulières significatives. On a d'abord employé un critère simple, utilisé dans le contexte de la détection de sources rayonnantes [5]. Puis on a fait varier légèrement ce nombre, de manière à étudier son influence sur l'efficacité de la méthode. Un traitement de type filtrage adapté (corrélation avec un modèle de l'impulsion laser émise) est ensuite

appliqué à une observation monodimensionnelle construite à partir de la matrice de données à laquelle on a soustrait la rétrodiffusion estimée. Pour les exemples testés, l'écho utile est mis en évidence, mais il subsiste des fausses alarmes. Des procédés sont en cours d'étude pour tenter de les réduire à un niveau acceptable.

2 – Principe de la méthode considérée

La première étape consiste à déterminer la matrice de données Y . On peut raisonner soit sur une seule observation (cas mono-acquisition), soit sur plusieurs observations (cas multi-acquisition). Dans le cas mono-observation, il est possible de construire une matrice directe ou rétrograde de plusieurs manières [1],[3],[4], ce qui fait intervenir un ordre L , comme dans la modélisation autorégressive. Dans le cas multi-observation, on dispose d'un ensemble P d'observations constituées chacune de N échantillons (avec $N > P$). Les échantillons de la $j^{\text{ème}}$ observation sont désignés par $y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{Nj}$. Une manière naturelle de construire Y est de prendre [2]

$$Y = \begin{bmatrix} y_{11} & y_{12} & \dots & y_{1P} \\ y_{21} & y_{22} & \dots & y_{2P} \\ \dots & \dots & \dots & \dots \\ y_{N1} & y_{N2} & \dots & y_{NP} \end{bmatrix}$$

Y est donc une matrice de taille (N,P) . La $1^{\text{ère}}$ colonne de Y est constituée par les N échantillons temporels de la $1^{\text{ère}}$ observation, la $j^{\text{ème}}$ colonne par les N échantillons temporels $y_{1j}, y_{2j}, \dots, y_{Nj}$ de la $j^{\text{ème}}$ observation.

L'application directe du PCI à la matrice Y n'a pas donné de résultats vraiment satisfaisants, sauf peut-être sur une catégorie particulière de signaux expérimentaux. C'est pourquoi on a cherché à se ramener par un prétraitement au cas mono-observation qui est d'ailleurs le cas classique d'application de la méthode PCI. [1]

On raisonne sur un groupe restreint d'observations (le nombre adéquat d'observations K dans le groupe dépend de paramètres physiques tels que la fréquence de récurrence du laser, la durée d'apparition des cibles dans une période de houle, etc). Ce nombre sera en pratique de quelques unités (<10).

Pour obtenir une observation équivalente au groupe considéré, un prétraitement simple consiste à effectuer la moyenne temporelle des observations $y(n) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K y_{nk}$

avec y_{nk} échantillon n° n ($1 \leq n \leq N$) de l'acquisition n° k ($1 \leq k \leq K$). La rétrodiffusion étant un phénomène déterministe lié au signal utile, le bruit du récepteur étant supposé décorrélé d'une observation à l'autre, on peut s'attendre à ce que ce prétraitement ait pour effet :

- de conserver le signal utile
- de conserver la rétrodiffusion
- de réduire le bruit d'un facteur K (et donc d'améliorer d'un facteur K le rapport signal sur bruit du récepteur).

Sur l'observation équivalente ainsi obtenue, on construit une matrice « directe-rétrograde » (effet de lissage temporel). La matrice de données est ainsi définie par

$$Y = \begin{bmatrix} y(L)y(L-1) & \dots & y(1) \\ y(L+1)y(L) & \dots & y(2) \\ - & & \\ y(N-1)y(N-2) & \dots & y(N-L) \\ y^*(2)y^*(3) & \dots & y^*(L+1) \\ y^*(3)y^*(4) & \dots & y^*(L+2) \\ - & & \\ y^*(N-L+1)y^*(N-L+2) & \dots & y^*(N) \end{bmatrix}$$

La matrice Y est de taille (2(N-L),L). La matrice de corrélation estimée, proportionnelle à $Y^{T*}Y$, a donc pour taille (L,L). Le processus PCI fournira donc L valeurs propres parmi lesquelles seules N_R d'entre elles seront significatives et seront donc attribuées à la rétrodiffusion (les valeurs propres sont les carrés des valeurs singulières).

Quelle que soit la définition retenue pour la matrice de données Y, la méthode PCI conduit à la décomposition de Y en deux matrices :

- l'une, Y_r , associée aux plus grandes valeurs singulières de X, censée correspondre à la rétrodiffusion.
- l'autre, Y_0 , associée aux valeurs singulières restantes, censée correspondre à l'ensemble « signal utile + bruit du récepteur ».

$$Y = Y_r + Y_i$$

La matrice Y est supposée de rang plein (son rang est égal à la plus petite de ses dimensions). La décomposition de Y (de taille (N,P) pour fixer les idées) en valeurs singulières s'écrit :

$$Y = U \cdot \Sigma \cdot V^{T*} = [U_r U_0] \begin{bmatrix} \Sigma_r & 0 \\ 0 & \Sigma_0 \end{bmatrix} [V_r V_0]^T$$

avec U_r matrice de taille (N, N_r)
 U_0 matrice de taille (N, $N-N_r$)
 Σ_r matrice de taille (N, N_r) et Σ_0 matrice de taille (N- N_r , P- N_r) données respectivement par

$$\Sigma_r = \begin{bmatrix} \sigma_1 & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_2 & \dots & 0 \\ 0 & & & \\ \vdots & & & \\ 0 & 0 & \dots & \sigma_{N_r} \end{bmatrix} \quad \Sigma_0 = \begin{bmatrix} \sigma_{N_r+1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & \sigma_{N_r+2} & \dots & 0 \\ 0 & & & \\ \vdots & & & \\ 0 & 0 & \dots & 0 \end{bmatrix}$$

V_r matrice de taille (P, N_r)
 V_0 matrice de taille (P, $N-N_r$)
 $\sigma_i > 0 \quad 1 \leq i \leq p$ valeurs singulières de Y

U est une matrice unitaire de taille (N,N) formée par les vecteurs propres à gauche de Y et V est une matrice unitaire de taille (P,P) formée par les vecteurs propres à droite de Y.

La matrice Y_r s'exprime par $Y_r = U_r \cdot U_r^{T*} \cdot Y$

U_r est une matrice de taille (N, N_r) dont les colonnes sont constituées par les coordonnées des N_r vecteurs propres associés aux N_r plus grandes valeurs propres de la matrice $Y \cdot Y^{T*}$. On extrait de la matrice Y les échantillons $y_r(n)$ avec $1 \leq n \leq N$ puis on les soustrait de l'observation $y(n)$. La nouvelle observation s'écrit $r(n) = y(n) - y_r(n)$ avec $1 \leq n \leq N$. On effectue enfin la corrélation de r(n) avec l'impulsion laser de référence $z = s^T \cdot r$. A un coefficient de proportionnalité près, on peut montrer [4] que $z = s^T \cdot \Gamma_B^{-1} \cdot y$, expression dans laquelle Γ_B^{-1} désigne l'inverse de la matrice de corrélation Γ_B de l'ensemble rétrodiffusion et bruit du récepteur. Cette opération représente bien un filtrage adapté de l'observation avec l'impulsion laser de référence.

Celle-ci est modélisée par une impulsion gaussienne « déterministe », c'est-à-dire de la forme $A \cdot e^{-\frac{t^2}{2\sigma^2}}$, les paramètres A et σ ($A > 0, \sigma > 0$) étant connus. Ces derniers sont liés à la durée utile considérée T, l'énergie E et la largeur à mi-hauteur τ par les relations

$$T \approx 4\sigma\sqrt{2\pi}$$

$$E \approx A^2\sigma\sqrt{\pi} \quad (\text{Log désignant le logarithme népérien})$$

$$\tau = 2\sigma\sqrt{2 \cdot \text{Log}(2)}$$

3 – Mise en œuvre de la méthode

Les signaux $z_k(n)$ peuvent être calculés sur un nombre NCOR d'échantillons vérifiant $\text{NCOR} \leq N+N_S-1$, N_S désignant le nombre d'échantillons de l'impulsion de référence. On a pris ici $\text{NCOR}=N+N_S-1$.

On a testé la méthode « PCI » sur une observation monodimensionnelle ordinaire (écho correspondant à une récurrence laser), ainsi que sur une observation monodimensionnelle équivalente à un groupe restreint de K observations (ici la moyenne, cf §2). Deux questions sont à résoudre :

la détermination de l'ordre L : L'ordre L est lié à l'effet de lissage que l'on veut obtenir sur le signal et fixe la taille de la matrice de corrélation de l'observation. Plusieurs auteurs recommandent une plage de variation bien définie pour L, notamment dans le contexte de la modélisation autorégressive. On adopte ici une démarche empirique, en testant différentes valeurs pour L.

la détermination du nombre N_r de valeurs propres significatives : On a choisi un critère simple à mettre en œuvre, inspiré du contexte de la détection de sources rayonnantes [5]. Le nombre de valeurs propres N_r associées à la rétrodiffusion est le nombre minimal tel que

$$0.9 \leq 1 - \frac{\sum_{i=N_r+1}^L \lambda_i}{\sum_{i=1}^{N_r} \lambda_i} \leq 1 \quad \text{avec } \lambda_i = \sigma_i^2 \quad 1 \leq i \leq L$$

Ce critère se justifie aisément. En effet, dans l'expression ci-dessus, le numérateur représente l'énergie de l'ensemble « signal + bruit » et le dénominateur l'énergie de la rétrodiffusion. Si cette dernière est prépondérante devant le mélange de signal et de bruit, la quantité figurant dans l'inégalité est proche de 1.

4 – Exemples de résultats

Les figures 1, 2 et 3 représentent trois exemples typiques d'observations :

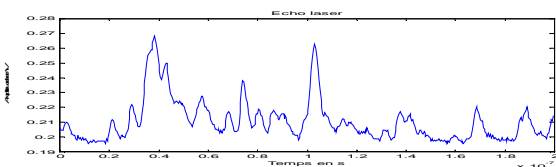


FIG. 1 : signal fort dans la rétrodiffusion (type 1)

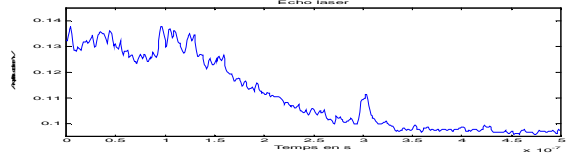


FIG. 2 : signal faible dans le signal décroissant de rétrodiffusion (type 2)

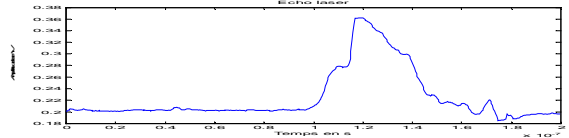


FIG. 3 : signal faible dans la rétrodiffusion (type 3)

4.1 Exemple de type 1

L'écho utile est situé environ à la moitié de la durée d'observation. Le PCI, appliqué à une observation ordinaire, peut conduire à la présence de pics parasites dont l'amplitude est plus élevée que celle de l'écho utile (FIG. 4).

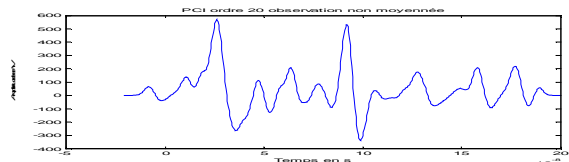


FIG. 4 : PCI appliqué à une observation non moyennée de type 1

Le PCI, appliqué à une observation moyennée sur 5 récurrences successives, permet de renforcer l'amplitude de l'écho utile (FIG 5).

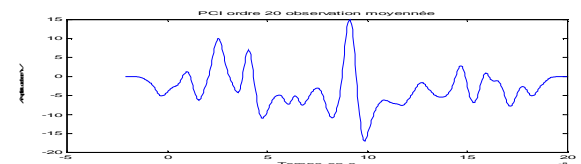


FIG. 5 : PCI appliqué à une observation moyennée de type 1

Une seule valeur propre est significative et est nettement supérieure aux autres, comme on le voit par exemple dans le tableau ci-après (valeurs propres pour l'observation moyennée avec un ordre $L=10$)

TAB. 1 : valeurs propres

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
9370,7	430,93	72,96	10,8	2,9	1,6	1,5	1,4	1,4	1,3

4.2 Exemple de type 2

L'écho utile se situe environ aux 2/3 de la durée du signal (le 300^e échantillon sur les 500 échantillons disponibles).

Là aussi, le PCI, appliqué à une observation ordinaire, fait apparaître un pic parasite d'amplitude plus élevée que celle de l'écho utile (FIG 6).

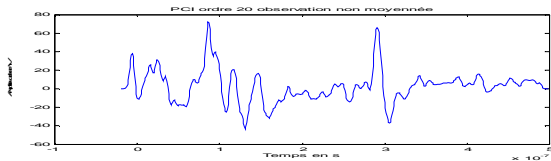


FIG. 6 : PCI appliqué à une observation non moyennée de type 2

On donne en figure 7 un exemple d'application du PCI à une observation moyennée sur 5 récurrences successives, avec un ordre L égal à 8.

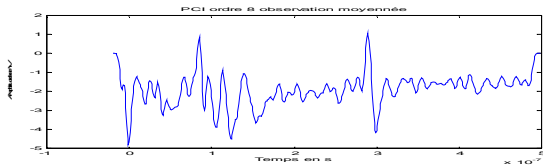


FIG. 7 : PCI appliqué à une observation moyennée de type 2

On constate qu'une seule valeur propre est significative. Pour un ordre L élevé, l'amplitude du pic parasite reste supérieure à celle du pic principal. Ce dernier n'est légèrement supérieur au pic parasite que pour un ordre compris entre 8 et 10. L'inconvénient est que d'autres pics parasites apparaissent, avec toutefois une amplitude moindre que celle du pic parasite précédent.

4.3 Exemple de type 3

L'écho utile se situe environ aux 2/3 de la durée du signal (le 300^e échantillon sur les 500 échantillons disponibles). Les signaux de ce type semblent plus difficiles à traiter, car pour un ordre relativement faible, on observe deux pics rapprochés temporellement et d'amplitude voisine, le pic dû à l'écho utile n'ayant pas nécessairement l'amplitude la plus grande. La figure 8 montre un exemple obtenu avec un ordre 20. Pour cet exemple aussi, une seule valeur propre est significative.

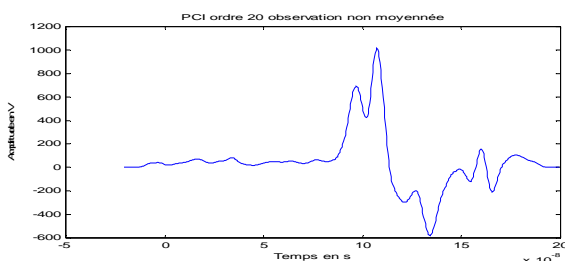


FIG. 8 : PCI appliqué à une observation non moyennée de type 3

De façon générale, pour les exemples traités, on peut dégager les tendances suivantes:

- lorsqu'on fait varier l'ordre L, le nombre de valeurs propres significatives (déterminé par le critère donné au §3) reste stable (1 ou 2 en général)
- lorsqu'on augmente le nombre de valeurs propres significatives, on n'obtient pas nécessairement une meilleure estimation de la rétrodiffusion parasite.

5 – Conclusion

Dans l'application de la méthode « PCI » à la détection d'échos laser, deux points paraissent délicats à régler :

- le choix de l'ordre L
 - le choix du nombre Nr de valeurs propres significatives
- En particulier, le choix de Nr conditionne la possibilité de séparer effectivement la rétrodiffusion des autres composantes présentes dans le signal observé. Si cette séparation n'est pas suffisamment nette, cela peut expliquer la présence de pics parasites d'amplitude plus forte que celle du pic principal. Dans ce cas, on peut envisager de compléter le traitement par un « processus de comptage » appliqué à des observations équivalentes successives. Un seuillage, puis une simple sommation permet de renforcer l'amplitude des échos se produisant au même instant et de réduire l'amplitude relative des pics parasites, si ces derniers se produisent à des instants différents, ce qui n'est pas toujours vrai. Cette situation risque de constituer une sérieuse limitation à l'emploi de la méthode.

Une autre voie d'amélioration pourrait consister à fractionner l'observation en tranches de longueur plus petite, à appliquer le traitement à l'intérieur de chaque tranche, puis, par des critères appropriés, à isoler la ou les tranches dans lesquelles l'écho utile est prépondérant.

Références

- [1] G. GINOLHAC, G. JOURDAIN Quelques résultats concernant la méthode « Principal Component Inverse » pour la détection en présence de réverbération, Dix-septième Colloque GRETSI, Vannes, 13-17 septembre 1999
- [2] H. ROTHE, O. GINTER, A. KASPER Principal component filtering of single-shot laser radar signals, SPIE Vol. 2271
- [3] D.W. TUFTS, D.H. KIL Reverberation suppression and modeling, extrait de D.D ELLIS « Ocean Reverberation », p. 319-329, Kluwer Academic Publishers, 1993
- [4] I.P. KIRSTEINS, D.W. TUFTS Adaptive detection using low rank approximation to a data matrix, IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 30, NO. 1 JANUARY 1994
- [5] C. TURCAT-LATOMBE Détection et caractérisation des signaux à plusieurs composantes à partir de la matrice interspectrale, Thèse INPG soutenue le 19 Novembre 1982