

ESTIMATION DES DATES D'ARRIVEE DE TRAJETS DE PROPAGATION EN TOMOGRAPHIE OCEANIQUE

V. NIMIER , G. JOURDAIN, B. FAURE

CEPHAG, UA346 CNRS, ENSIEG, BP46, F-38402 St Martin d'Hères Cedex

RÉSUMÉ

En tomographie océanique, il est essentiel d'identifier et de bien estimer les temps d'arrivée des différents trajets de propagation. La méthode classique qui utilise un signal à large bande et l'intercorrélacion ne permet pas de séparer et d'identifier suffisamment les temps d'arrivée des trajets proches. Des méthodes "haute résolution" sont alors nécessaires. Nous présentons dans cet article une méthode qui utilise un filtrage multidimensionnel sur les intercorrélacions successives, associé à une déconvolution afin d'obtenir une résolution suffisante. Des résultats de simulations ainsi qu'un traitement sur des données réelles montrent l'intérêt de la méthode proposée.

SUMMARY

For oceanic tomography, it is essential to well identify and estimate the arrival times of the acoustic paths. The classical method which uses large WT signals and correlations may be no longer sufficient to well separate and identify the different time delays. So some high time resolution methods are necessary. In this paper, we present a method which performs a multidimensional filtering on the successive correlation data, and, after that, elaborates a good delay separation by some kind of deconvolution. Some simulation results and real acoustic experiment results demonstrate the good performance of the method.

I INTRODUCTION

La tomographie océanique permet d'estimer les variables d'un volume d'océan et plus particulièrement le champ de célérité. L'expérimentation consiste à placer des émetteurs et des récepteurs de telle façon que la zone d'océan étudiée soit traversée par un grand nombre de trajets acoustiques. Les émissions ont lieu toutes les heures, les récepteurs enregistrent les signaux issus des différents émetteurs.

En mesurant les perturbations des temps de propagation relativement à une prédiction moyenne donnée par un profil de célérité a priori, on peut réussir à estimer les variations de la vitesse du son dans l'eau.

L'estimation, l'identification et le suivi temporel des différents trajets de propagation sont donc essentiels en tomographie océanique car ceux-ci fournissent les données de départ pour le processus d'inversion numérique qui fera suite à cette première étape.

Afin d'obtenir une bonne résolution dans l'estimation des temps de parcours, on utilise en premier lieu des signaux performants à large bande. La méthode classique est de réaliser la corrélation entre le signal émis et le signal reçu. La résolution ainsi obtenue est directement reliée à l'inverse de la bande passante du signal émis. Cependant celle-ci n'est pas suffisante pour l'utilisation ultérieure qui sera faite de ces données, et le rapport signal sur bruit assez faible nous empêche de faire une bonne identification des différents trajets.

Nous proposons alors une seconde étape de traitement. Cette méthode utilise la succession des corrélacions au cours du temps afin d'améliorer le rapport signal sur bruit, suivi d'une déconvolution. Nous avons testé cette méthode de traitement sur des données simulées et sur des données expérimentales.

II MODELISATION

Le milieu de propagation entre un émetteur et un récepteur peut être modélisé par un filtre linéaire dont la réponse impulsionnelle est de la forme:

$$h(t) = \sum_i \alpha_i \delta(t - \tau_i) \quad (1)$$

Le problème est d'estimer le temps de parcours de chaque trajet τ_i . Le signal reçu sur un des récepteurs après passage dans ce filtre sera donc :

$$r(t) = h(t) * e(t) + b(t) \quad (2)$$

$$= \sum_i \alpha_i e(t - \tau_i) + b(t) \quad (3)$$

Après intercorrélacion entre le signal émis et le signal reçu on obtient :



$$\Gamma_{re}(t) = \sum_i \alpha_i \Gamma_e(t-\tau_i) + \Gamma_{be}(t) \quad (4)$$

$$= \Gamma_e(t) * h(t) + \Gamma_{be}(t) \quad (5)$$

Cette première intercorrélacion a le double avantage, si le signal émis a été choisi à bande large:

- d'améliorer le rapport signal sur bruit
- de faire une première identification et séparation des différents trajets.

La transformée de Fourier de cette expression donne :

$$\gamma_{re}(v) = \gamma_e(v) \sum_{i=1}^P \alpha_i e^{-2j\pi v \tau_i} + \gamma_{be}(v) \quad (6)$$

Si la résolution obtenue grace à l'intercorrélacion n'est pas suffisante, une seconde étape est alors nécessaire.

III METHODE TEMPORELLE

Une méthode a été proposée par Bruckstein [2]. Nous en rappelons ici brièvement le principe: soit le modèle temporel échantillonné

$$A(t_k) = \sum_{i=1}^P \alpha_i s(t_k - \tau_i) + B(t_k) \quad k \text{ de } 1 \text{ à } N \quad (7)$$

qui en notation matricielle conduit à

$$A = C G + B$$

en posant que

$$A^+ = [r(t_0) \dots r(t_{N-1})]$$

$$C = [C_1 \dots C_p]$$

$$C_i^+ = [s(t_0 - \tau_i) \dots s(t_{N-1} - \tau_i)]$$

$$G = [\alpha_0 \dots \alpha_p]$$

$$B = [B(t_0) \dots B(t_{N-1})]$$

Le bruit étant supposé blanc et indépendant du signal, on peut calculer la matrice de covariance statistique de l'observation

$$R = E(A A^+) = C D C^+ + \Gamma_b$$

Les colonnes de C ont une forme a priori quelconque. L'idée consiste alors à déterminer les retards τ_i au moyen de la méthode MUSIC en accédant au sous espace signal par l'intermédiaire de la matrice R. L'algorithme peut être résumé ainsi:

- estimation de la matrice de covariance R à partir de m vecteurs d'observation A_k indépendants,

$$R = \frac{1}{m} \sum_{k=1}^m A_k A_k^+$$

- détermination des valeurs propres λ_j et des vecteurs propres V_j de R. Les p vecteurs propres dominants définissent le sous-espace signal et les N-p vecteurs propres supplémentaires définissent le sous-espace bruit

- calcul d'une fonction d'évaluation:

$$f(\tau) = \frac{1}{\sum_{k=p+1}^N |c^+(\tau) v_k|^2}$$

La fonction $f(\tau)$ présentera p maxima pour les valeurs $\tau = \tau_k$, avec $k = 1 \dots p$

Les hypothèses statistiques imposent donc que l'on possède suffisamment de réalisations d'un même processus aléatoire. Les différentes amplitudes du signal doivent être en outre décorrélées. En tomographie océanique entre chaque émission de signal, une période de une heure s'est écoulée. Le milieu de propagation s'est légèrement modifié durant ce laps de temps, mais les amplitudes des signaux sur les différents trajets sont fortement corrélées. Les hypothèses statistiques ci dessus ne sont donc pas vérifiées dans le cadre de signaux tomographiques.

IV MODIFICATION DE LA METHODE PRECEDENTE

1) Connaissant la forme de la fonction de corrélation Γ_e , on peut l'utiliser de 2 façons différentes:

a) on remplace $s(t_k - \tau_i)$ par $\Gamma_e(t_k - \tau_i)$ dans l'équation (7); cette méthode a été étudiée par [3]

b) on peut faire une déconvolution sur chaque intercorrélacion. Celle-ci dans le domaine fréquentiel conduit à

$$\hat{H}(v) = \frac{\gamma_{re}}{\gamma_e} = \sum_i \alpha_i e^{-2j\pi v \tau_i} + \frac{\gamma_{be}}{\gamma_e}$$

qui correspond à la réponse impulsionnelle estimée

$$\hat{h}(t) = \text{TF}^{-1}(\hat{H}(v)) = \sum_i \alpha_i \delta(t - \tau_i) + b(t)$$

[3] travaille dans le domaine des fréquences et applique alors une méthode de Tufts-Kumarésan pour estimer les τ_i .

2) Si l'on pose que m_i est le vecteur d'autocorrélacion modèle du signal de départ décalé de i points, la déconvolution revient à résoudre un système d'équations linéaires $\Gamma_{re} = K \alpha$ où K est une matrice qui contient les différents modèles m_i . Cette équation est égale à l'équation (5) échantillonnée où:

$$K = [m_0, \dots, m_{N-1}]$$

α est le vecteur des amplitudes.

La minimisation de la fonctionnelle $\|\Gamma_{re} - K\alpha\|^2$

nous donne la solution au sens des moindres carrés

$$\alpha = (K^T K)^{-1} K^T \Gamma_{re} \quad (8)$$

L'inconvénient de cette méthode est qu'elle est très peu robuste. Avec les signaux émis lors des expérimentations de tomographie, le conditionnement tend vers l'infini. Une régularisation du problème peut être envisagée en minimisant la fonctionnelle



$$\| \Gamma_{re} - K\alpha \|^2 + \mu \| \alpha \|^2$$

le coefficient "μ" est à ajuster suivant l'importance de la connaissance a priori. La solution est alors:

$$\alpha = (K^T K + \mu I)^{-1} K^T \Gamma_{re} \quad (9)$$

En appelant m_i^* la i ème ligne de la matrice

$$(K^T K + \mu I)^{-1} K^T$$

la déconvolution revient à calculer la projection de Γ_{re} sur l'espace engendré par les m_i^* :

en effet on a $\alpha_1 = \langle m_1^* / \Gamma_{re} \rangle$, $\alpha_2 = \langle m_2^* / \Gamma_{re} \rangle$

Ces méthodes de **régularisation** tendent à diminuer la résolution au profit d'une meilleure robustesse. On peut réduire cet inconvénient en faisant appel à nouveau aux techniques d'estimation non linéaire appliquées dans les méthodes haute résolution (MUSIC) On veut alors estimer les **temps d'arrivée** de chaque trajet et non plus les **amplitudes**. On cherche alors les m_i^* les plus proches de Γ_{re} , i.e. qui rendent minimale la distance suivante:

$$d^2 = \| (I - \Gamma_{re} \Gamma_{re}^T) m_i^* \|^2 \quad (10)$$

On s'intéresse finalement à l'évolution de la fonction d'évaluation $1/d^2$ en cherchant ses maxima.

La **figure 1.a** montre un signal synthétique, composé de deux triangles séparés de deux points, additionné à du bruit, le rapport signal sur bruit est de 10 dB. La forme triangulaire correspond à l'autocorrélation des signaux BPSK utilisés ensuite (§ VI). La **figure 1.b** montre le résultat de la déconvolution (9) pour $\mu = 6.10^{-2}$. La **figure 1.c** est le tracé de la fonction $1/d^2$

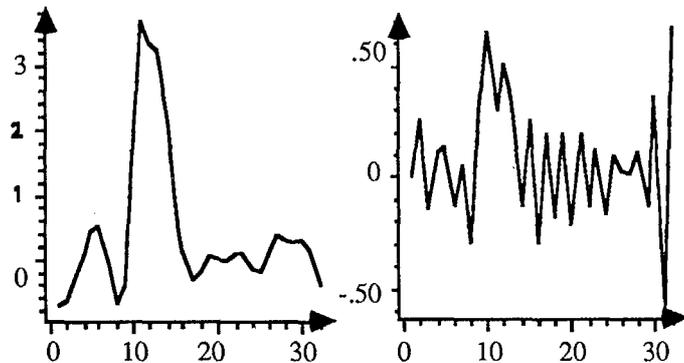


Figure 1.a

Figure 1.b

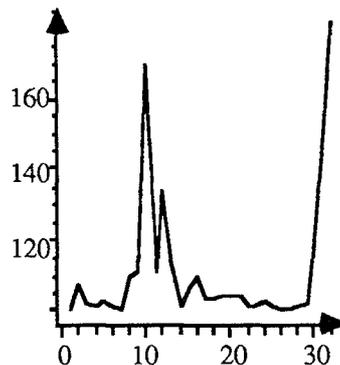


Figure 1.c

On voit que le compromis robustesse / résolution est meilleur que pour une régularisation du type précédent mais aucune estimation des amplitudes n'est faite. Le choix du paramètre μ est encore essentiel.

V SUIVI TEMPOREL

Dans le cas de la tomographie océanique on peut disposer de plusieurs intercorrélations successives que nous appellerons Γ_i . Afin d'améliorer le suivi temporel des différents trajets au cours du temps, on peut faire une moyenne glissante sur trois ou quatre intercorrélations successives.

Une autre façon de procéder est de ne conserver que la partie corrélée de ces trois ou quatre intercorrélations; celle-ci sera donnée par le vecteur propre V_1 correspondant à la valeur propre maximale de la matrice de corrélation BB^T avec

$B = [\Gamma_i \ \Gamma_{i+1} \ \dots \ \Gamma_{i+p+1}]$. Dans ce cas la formule (10) devient:

$$d'^2 = \| (I - V_1 V_1^T) \Gamma_i \|^2 \quad (11)$$

Nous avons simulé un canal à deux trajets et l'écart séparant les deux trajets diminue en fonction du temps. La **figure 2.a** montre les données sans bruit (intercorrélations successives). La **figure 2.b** montre les mêmes données mais avec du bruit. Le résultat de la méthode ci-dessus (tracé de $1/d'^2$) est présenté sur la **figure 2.c**. On distingue très nettement les 2 trajets qui varient au cours du temps.

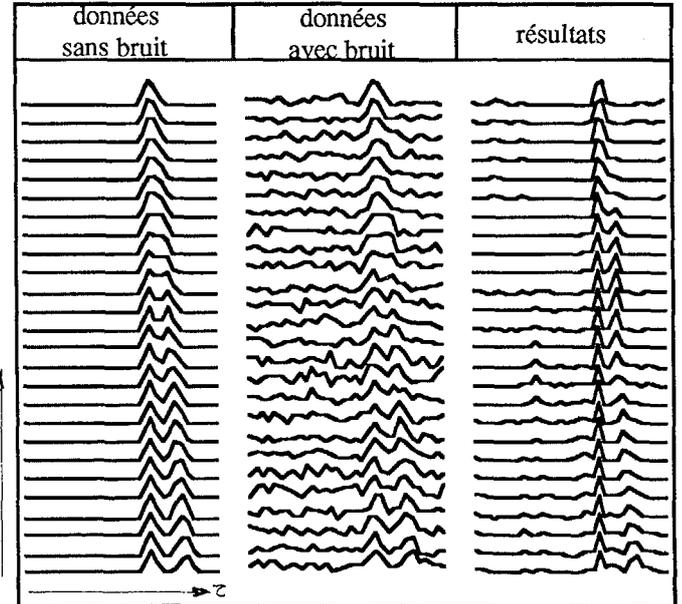


Figure 2.a

Figure 2.b

Figure 2.c

VI TRAITEMENT DE DONNEES EXPERIMENTALES

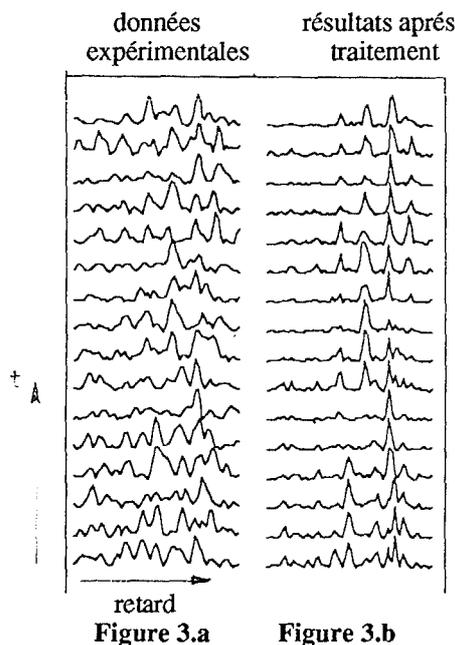
Les données traitées ci-après sont issues d'une expérimentation organisée par l'IFREMER en collaboration avec une équipe de Woods Hole Oceanographic Institution, en mai 1987. Celle-ci utilise deux instruments émetteur/recepteur immergés en méditerranée à 500 m de profondeur et distants de 200 km. Le

signal émis est constitué d'une suite de 24 séquences identiques de signaux BPSK dont les caractéristiques sont les suivantes: SBLM de produit $BT=511$; fréquence porteuse 400 Hz à raison de 4 périodes par pas de code élémentaire. Dans chaque appareil in situ les signaux sont numérisés, les 24 séquences sommées et démodulées.

En temps différé, on effectue le filtrage adapté sur les deux composantes en quadrature ainsi que la détection d'enveloppe.

On donne sur la figure 3 l'enveloppe des fonctions d'intercorrélation successives. On remarque que les différents trajets sont difficile à identifier et que leur suivi est pratiquement impossible.

La figure 3b donne le résultat obtenu après application de la méthode exposée ci dessus (tracé de la fonction d'évaluation $1/d^2$). Les résultats obtenus sont particulièrement significatifs.



VII CONCLUSION

Nous avons proposé ici une méthode de déconvolution et filtrage multidimensionnel qui se révèle être intéressante dans le cadre de l'estimation active de trajets de propagation. Cette méthode, inspirée des méthodes "haute résolution", a été adaptée à l'estimation de trajets et à l'utilisation de données successives. Elle ne nécessite pas d'hypothèses statistiques a priori sur les paramètres des trajets.

Des études sont en cours pour caractériser totalement les performances de telles méthodes. Les points importants sont: le choix du nombre d'intercorrélations pris en compte dans chaque filtrage multidimensionnel (lié à la stationnarité du milieu) et les paramètres de régularisation de la déconvolution.

Cette étude a été supportée par une convention avec le DCN et l'IFREMER; elle est également reliée aux travaux du GRECO TSI.

BIBLIOGRAPHIE

- [1] M.A. Pallas et G. Jourdain. Estimation de retards et méthodes hautes résolution. GRETSI, Nice, Juin 1987.
- [2] A.M. Brückstein, T.J. Shan, T. Kailath. The resolution of overlapping echos. IEEE Trans. on ASSP, 33, n°6, 1357, Dec. 1985.
- [3] M.A. Pallas and G. Jourdain. Active high resolution time delay estimation for large BT signals. Submitted to IEEE ASSP, Nov. 1988.
- [4] A. Lannes, S. Roques, and M.J. Casanove. Stabilized reconstruction in signal and image processing. Jour. of Modern Optics, 34, n°2, 161, 1987.
- [5] Y. Desaubies, F. Gaillard, T. Terre. Rapport Scientifique et Technique du Programme Tomographie Acoustique. 1985-1987. Ifremer.