



Double MUSIC Actif Large bande pour la tomographie sous-marine

Grégoire LE TOUZÉ, Barbara NICOLAS, Jérôme MARS

GIPSA-Lab

961 rue de la Houille Blanche BP46, 30402 Grenoble

gregoire.le-touze@gipsa-lab.grenoble-inp.fr, barbara.nicolas@gipsa-lab.grenoble-inp.fr
jerome.mars@gipsa-lab.grenoble-inp.fr

Résumé – Nous proposons une méthode de traitement d’antenne haute résolution de type MUSIC à trois dimensions appelée Double MUSICAL. Cette méthode permet l’estimation des paramètres des ondes propagées dans un milieu océanique : temps d’arrivée, angle d’émission et de réception et s’applique dans un contexte de Tomographie Acoustique Océanique. La méthode est comparée à la double formation de voies qui permet une estimation dans les mêmes dimensions. Nous illustrons la supériorité de la méthode proposée sur des simulations réalistes.

Abstract – A high-resolution array processing of MUSIC type in three dimensions named Double MUSICAL is proposed. It estimates the parameters of the propagated waves : arrival time, emitted and received angles and can be applied for an Oceanic Acoustical Tomography context. The method is compared with the double beamforming which achieves estimation in the same domain. We show the better performances of the proposed method on realistic simulated data.

1 Contexte

1.1 La tomographie acoustique sous-marine active

L’estimation des variations de vitesse dans l’océan à partir d’observables issues de la propagation acoustique est classiquement appelée Tomographie Acoustique Océanique (TAO) [1]. Nous nous intéressons ici à un cadre nouveau composé de deux antennes verticales immergées : une antenne d’émetteurs et une antenne de récepteurs [2]. Les différentes ondes propagées dans le guide sont caractérisées par leur angle d’émission, leur angle de réception et leur temps d’arrivée. La détection de ces ondes, leur identification et l’estimation de leurs paramètres permet de remonter aux propriétés du milieu à l’aide d’une modélisation utilisant les noyaux de sensibilité [3].

La détermination des observables (angles et temps d’arrivée) s’effectue jusqu’à présent par l’utilisation de la double formation de voies dans le domaine paramétrique d’estimation temps/angle d’émission/angle de réception [4]. L’utilisation de deux domaines angulaires permet en effet une meilleure détection/identification des ondes. Cette technique montre cependant ses limites dans le cas où les ondes sont trop proches dans les trois domaines paramétriques. C’est en particulier le cas des premières arrivées temporelles qui possèdent des temps d’arrivée autour du temps minimal de propagation (correspondant à un trajet direct) et des angles d’émission et de réception nuls. Or ces ondes sont particulièrement riches en information pour la TAO.

Nous proposons et appliquons ici une méthode permettant d’améliorer la résolution dans le domaine temps/angle d’émission/angle de réception qui est une extension de l’algorithme MUSIC Active Large Bande (MUSICAL) [5] à trois dimensions. La problématique du lissage de la matrice interspectrale est abordée et une nouvelle technique est proposée. Les méthodes proposées sont appliquées et illustrées sur des simulations acoustiques sous-marines réalistes.

1.2 Modèle du signal

Considérons une antenne uniforme de N_r récepteurs recevant P ondes propagées à partir de l’émission sur une antenne uniforme composée de N_e émetteurs. A la fréquence ν , la Transformée de Fourier (TF) du signal reçu au récepteur m provenant de l’émetteur n s’écrit :

$$X_{m,n,\nu} = S_\nu \sum_{p=1}^P a_p \exp(\text{Arg}_p) + B_{m,n,\nu} \quad (1)$$

Avec :

$$\text{Arg}_p = -j2\pi(T_p + (m-1)\tau(\theta_p^r) + (n-1)\tau(\theta_p^e)) \quad (2)$$

où a_p est l’amplitude complexe de l’onde p , S_ν la TF du signal source à la fréquence ν , $B_{m,n,\nu}$ la TF du bruit additif aux coordonnées (m, n) et à la fréquence ν . T_p est le temps de propagation de l’onde entre le premier émetteur et le premier récepteur, θ_p^r son angle de réception, θ_p^e son angle d’émission, $\tau(\theta_p^r) = D \sin(\theta_p^r)/v$ et $\tau(\theta_p^e) = D \sin(\theta_p^e)/v$ les retards associés à ces angles (avec D la distance inter-capteur et v la vitesse de propagation de l’onde dans l’eau).

Nous développons une méthode haute-résolution qui part du modèle proposé pour estimer les paramètres T_p , θ_p^e , θ_p^r et qui dépasse en résolution la méthode de double formation de voies récemment développée dans le même contexte [4].

2 Double MUSIC Active Large Bande

2.1 Principes

Les plupart des méthodes haute-résolution exploitent la décomposition du domaine d'observation en un sous-espace signal et un sous-espace bruit. La plus utilisée d'entre elles, MUSIC, part d'une modélisation en bande étroite sur une dimension, l'antenne de réception, et ne dépend que du paramètre à estimer angle de réception θ^r [6]. Des extensions de MUSIC au cas deux dimensions ont été proposées [7]. Plus récemment, une estimation conjointe du temps de propagation T_p et de l'angle de réception θ_p^r a été proposée dans une configuration composée d'une antenne de réception et de signaux large bande (MUSIC Active Large bande : MUSICAL) [5]. Nous étendons ici cette méthode dans le cas d'enregistrements comportant une dimension supplémentaire, l'antenne d'émission, et un paramètre d'estimation supplémentaire, l'angle d'émission θ^e .

En disposant les $X_{m,n,\nu}$ sous la forme d'un "long-vecteur" \mathbf{x} de dimension $N_e \cdot N_r \cdot F$ où F est le nombre de voies fréquentielles considérées, on peut réécrire l'équation 2 sous la forme matricielle :

$$\mathbf{x} = \mathbf{D}\mathbf{a} + \mathbf{b} \quad (3)$$

où \mathbf{D} est de taille $(N_e \cdot N_r \cdot F \times P)$ et contient les P vecteurs directionnels $\mathbf{d}(T_p, \theta_p^r, \theta_p^e)$ ($N_e \cdot N_r \cdot F \times 1$) dépendant des paramètres à estimer, \mathbf{a} ($P \times 1$) est le vecteur contenant les P amplitudes complexes des ondes et \mathbf{b} ($N_e \cdot N_r \cdot F \times 1$) décrit le bruit. Le vecteur directionnel $\mathbf{d}(T_p, \theta_p^e, \theta_p^r)$ correspond à une onde parfaitement plane paramétrée avec $(T_p, \theta_p^e, \theta_p^r)$.

La méthode développée, appelée Double MUSIC Active Large Bande (D-MUSICAL), suit la même démarche que les méthodes de type MUSIC. Elle consiste à estimer la matrice interspectrale $\mathbf{R} = E\{\mathbf{x}\mathbf{x}^*\}$, puis à diviser l'espace d'observation à l'aide d'une décomposition en valeurs propres en un sous-espace signal engendré par les P vecteurs directeurs du signal et un sous-espace bruit. L'estimateur consiste alors, pour chaque paramétrage donné (T, θ^e, θ^r) , en l'inverse de la projection du vecteur directionnel associé à ce paramétrage sur le sous-espace bruit :

$$P_{D-MUSICAL}(T, \theta^r, \theta^e) = \frac{1}{\mathbf{d}(T, \theta^r, \theta^e)^H \hat{\mathbf{\Pi}} \mathbf{b} \mathbf{d}(T, \theta^r, \theta^e)} \quad (4)$$

avec $\hat{\mathbf{\Pi}}^b$, le projecteur sur le sous-espace bruit, construit à partir de la matrice inter-spectrale estimée $\hat{\mathbf{R}}$. Les P estimées

$(\hat{T}_p, \hat{\theta}_p^e, \hat{\theta}_p^r)$ sont les *maxima* de cet estimateur dans l'espace paramétré. Notons que des méthodes de type MUSIC à trois dimensions ont été proposées dans le cas de signaux multi-composantes (en sismique notamment) [9]. Cependant, la dimension ajoutée ne répond pas aux mêmes problématiques et il n'est par conséquent pas proposé d'estimation du paramètre θ^e .

2.2 Problématique du lissage

Classiquement, les méthodes de type MUSIC nécessitent que les sources soient décorélées, autrement dit que la matrice des amplitudes $E\{\mathbf{a}\mathbf{a}^*\}$ soit de rang plein. En pratique, on parvient à construire une telle matrice grâce aux différentes réalisations du processus. Dans notre configuration expérimentale, on cherche à évaluer la variation du milieu en fonction du temps, on ne possède donc qu'une seule réalisation pour chaque mesure et les sources se retrouvent de ce fait totalement corrélées. La matrice interspectrale estimée est alors de rang 1. La méthode proposée est alors équivalente à la réalisation d'une simple formation de voies. Afin de contourner ce problème, on emploie des techniques de lissage. Si les techniques de lissage spatial sont classiques [8], la problématique du lissage fréquentiel est plus délicate du fait de la présence de la source dans le modèle (cf. équation 2). Une technique de lissage fréquentiel a été proposée dans le cadre de MUSICAL [10] proposant un blanchiment des signaux avant d'effectuer le lissage ce qui rend la problématique identique à celle du lissage spatial mais pose dans la pratique problème lors de la présence de bruit. Nous étendons cette technique de lissage à la troisième dimension. Ainsi la matrice inter-spectrale finale est la somme des matrices inter-spectrales calculées sur les différentes sous-antennes formées dans les trois dimensions d'enregistrement (antenne d'émission/antenne de réception/fréquence). Si l'on note K_f , K_e et K_r les coefficients de lissage respectivement dans les dimensions fréquence, antenne d'émission, antenne de réception, chaque sous-antenne à trois dimensions donne lieu à un long-vecteur de données \mathbf{x}^k . La matrice inter-spectrale estimée est alors la moyenne des matrices inter-spectrales $\hat{\mathbf{R}}^k$ de chacune des sous-antennes et s'écrit :

$$\hat{\mathbf{R}} = \frac{1}{K_e \cdot K_r \cdot K_f} \sum_{k=1}^{K_e \cdot K_r \cdot K_f} \mathbf{x}^k \mathbf{x}^{kH} = \frac{1}{K_e \cdot K_r \cdot K_f} \sum_{k=1}^{K_e \cdot K_r \cdot K_f} \hat{\mathbf{R}}^k \quad (5)$$

Le rang de la matrice ainsi formée est inférieur ou égal au nombre de sous-antennes et strictement supérieur à 1. Dans la pratique, on prendra un nombre de sous-antennes largement supérieur à celui du nombre d'arrivées à détecter.

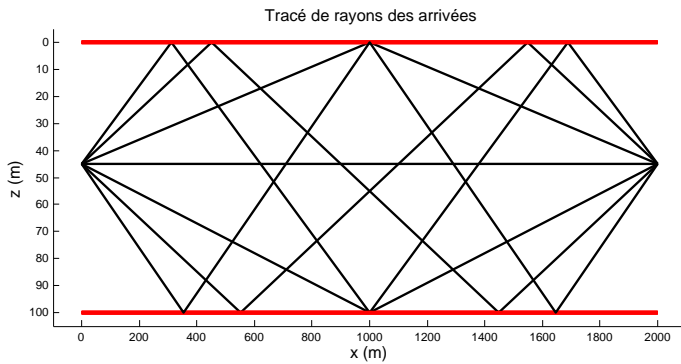


FIGURE 1 – Tracé de rayons de la configuration expérimentale

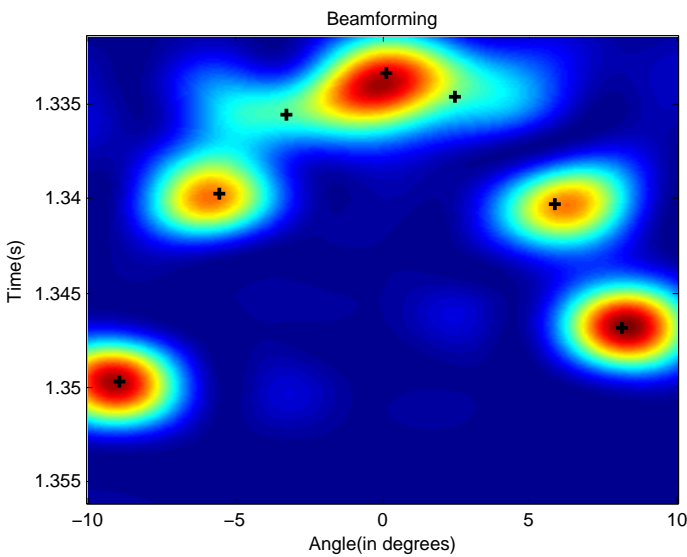


FIGURE 2 – Simple formation de voies pour l'émetteur à 45 m

3 Application de D-MUSICAL

Nous appliquons les algorithmes développés (D-MUSICAL, lissage) sur des signaux simulés dans un contexte réaliste de tomographie. Le milieu marin est modélisé par un guide d'ondes homogène (vitesse de propagation de 1500 m.s^{-1}) qui possède une profondeur de 100 m, l'antenne d'émission est composée de 21 capteurs régulièrement espacés entre 40 et 50 m (distance inter-capteur de 0.5 m) de profondeur et celle de réception est composée de 41 capteurs régulièrement espacés entre 35 et 55 m (distance inter-capteur de 0.5 m). La distance horizontale émetteur-récepteur est de 2000 m.

Le but est ici de tester la capacité des méthodes à détecter les différentes ondes correspondant aux différents trajets dans le guide d'ondes formé par l'environnement. La figure 1 représente le tracé des rayons correspondant aux premières ondes arrivées que l'on cherche à détecter. Ces rayons sont tracés entre les capteurs de référence qui correspondent aux centres des antennes en émission et en réception (dans le cas 2D, le capteur de référence d'émission est l'unique émetteur) :

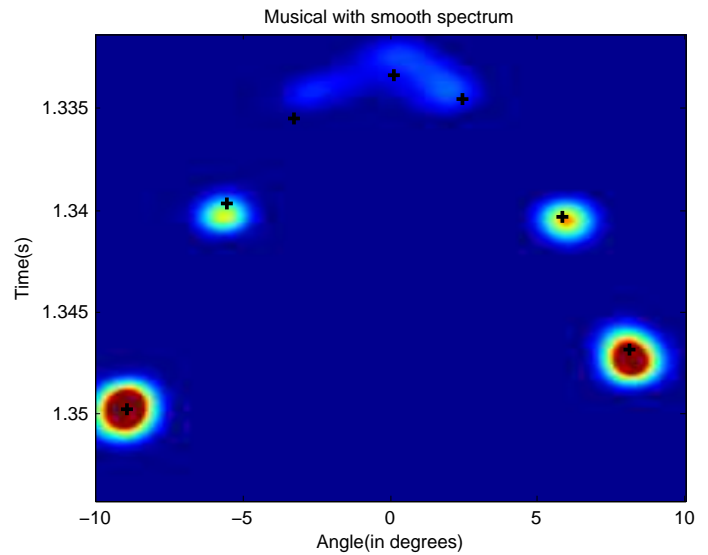


FIGURE 3 – MUSICAL [l'image a été seuillée] pour l'émetteur à 45 m

l'émetteur et le récepteur à 45 m de profondeur. Chacune des ondes est caractérisée par son temps d'arrivée (proportionnel dans un guide homogène à la longueur du rayon), son angle d'émission et son angle de réception dont les valeurs théoriques sont directement lisibles sur le tracé de rayon (*cf.* figure 1). Ce sont ces paramètres que l'on cherche à estimer avec les méthodes implémentées.

Par souci de pédagogie, nous commençons par étudier les méthodes 2D dans l'espace d'estimation temps d'arrivée/angle de réception à l'aide des méthodes de simple formation de voies et MUSICAL. On applique ces méthodes lorsque la configuration est composée d'un unique émetteur et d'une antenne de réception. L'émetteur est un capteur placé à 45 m de profondeur. Les résultats sont présentés figure 3 et 4. Les croix représentent les positions théoriques des arrivées déterminées par les rayons précédemment calculés (*cf.* figure 1). On observe que la simple formation de voies ne parvient pas à détecter les trois premières arrivées (une unique tâche) tandis que MUSICAL en détecte deux sur trois (avec un faible contraste entre les deux pics). Une autre étude plus détaillée a été menée sur les performances de MUSICAL dans le cadre de la TAO [11]. Cependant, pour parvenir à un résultat totalement utilisable pour la TAO, nous appliquons les méthodes 3D : double formation de voies et D-MUSICAL.

La figure 4 présente les résultats en affichant les iso-surfaces autour des *maxima* détectés. Les croix représentent les arrivées théoriques dans l'espace d'estimation temps d'arrivée/angle d'émission/angle de réception. Concernant les trois premières arrivées étudiées précédemment, la double formation de voies ne parvient à détecter que deux de ces trois arrivées alors que le D-MUSICAL parvient à détecter les trois arrivées séparé-

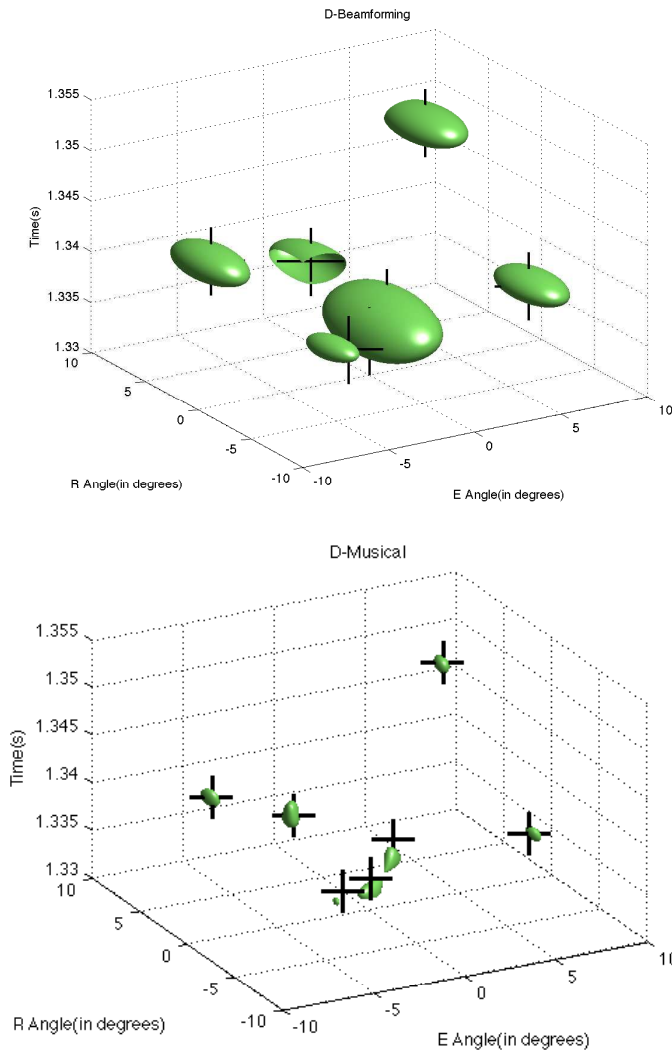


FIGURE 4 – Double formation de voies (gauche) et D-MUSICAL (droite). Iso-surface en trois dimensions.

ment. Ce résultat est très satisfaisant et permet l'utilisation de ces trois arrivées et de leurs paramètres estimés pour la TAO. Il montre la supériorité du D-MUSICAL sur la Double Formation de Voies en terme de résolution.

4 Conclusion

Nous avons proposé une méthode de traitement d'antenne haute-résolution (D-MUSICAL) à trois dimensions dans un contexte de tomographie acoustique sous-marine. Le contexte expérimentale nécessite un lissage préalable de la matrice interspectrale dans les trois dimensions considérées. Nous avons illustré et discuté les performances de la méthode proposée sur des simulations réalistes. Ses performances en séparation d'ondes et en estimation des paramètres (temps d'arrivée, angles d'émission et de réception) sont meilleures que celles

des méthodes haute-résolution deux dimensions et que celles de la double formation de voies. Les perspectives de ces travaux concerne leur validation sur des données réelles et leur application a des problématiques de TAO. Ces travaux sont en cours de réalisation.

Références

- [1] W. Munk, P. Worcester et C. Wunsch. *Ocean acoustic tomography*. Cambridge university press, 1995.
- [2] P. Roux, B.D. Cornuelle, W.A. Kuperman et W.S. Hodgkiss. *The structure of raylike arrivals in a shallow-water waveguide*. J. Acoust. Soc. Am., 124(6), 3430-3439, 2008.
- [3] I. Iturbe *Tomographie Acoustique Haute-Résolution dans un Guide d'Onde Océanique*. Doctorat de l'Université de Grenoble, 2010.
- [4] B Nicolas, I. Iturbe, P Roux et J. Mars. *Double formation de voies pour la séparation et l'identification d'ondes : applications en contexte fortement bruité et à la campagne FAFO3*. Traitement du Signal, 25(6), 2008.
- [5] P. Gounon et S. Bozinoski *High resolution spatio-temporal analysis by an active array*. ICASSP, 1995.
- [6] G. Bienvenu et L. Kopp. *Adaptivity to background noise spatial coherence for high resolution passive methods*. ICASSP, 307-310, 1980.
- [7] R.O. Schmidt *Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation*. IEEE Trans. A. Proc., 34(3),1986.
- [8] T-J. Shan, M. Wax et T. Kailath. *On Spatial Smoothing for Direction-Of-Arrival Estimation of Coherents Signals*. IEEE-Trans. Acoust. Speech Sig. Proc., 33(4), 1985.
- [9] C. Paulus et J. Mars *Vector-Sensor array Processing for polarization parameters and DOA estimation*. EURASIP J. on Advances in Sig. Proc., ID 850265, 2010.
- [10] D. Goncalves et P. Gounon *On sources covariance matrix singularities and high-resolution active wideband source localization*. ICASSP, 1998.
- [11] L. Jiang, F. Aulanier, G. Le Touzé, B Nicolas et J. Mars. *Raypath separation with high-resolution processing*. Oceans, 2011.