

# Panorama des opérateurs de focalisation et applications

Ammar BENDJAMA<sup>1</sup>, Salah BOURENNANE<sup>2</sup>, Jean-Pierre SESSAREGO<sup>3</sup>

<sup>1</sup>S.P.E. / UMR-CNRS 6134

B.P. 52, Quartier Grossetti, 20250 Corté France

<sup>2</sup>Fresnel Institut - E.N.S.P.M / CNRS-UMR 6133

D. U. Saint-Jérôme, 13397 Marseille Cedex 20 France

<sup>3</sup>CNRS-LMA

31 ch. Joseph Aiguier, 13402 Marseille Cedex 20 France

bendjama@univ-corse.fr, salah.bourennane@fresnel.fr, sessarego@lma.cnrs-mrs.fr

**Résumé** – Au cours de ces dernières années, plusieurs méthodes de traitement de signaux à large bande ont été proposées. Ces méthodes sont une extension des algorithmes de signaux bande étroite. Elles sont basées essentiellement sur la technique de focalisation. La recherche d'une amélioration du rapport signal sur bruit a conduit au développement de nombreux opérateurs de focalisation. Certains travaux ont montré que les opérateurs unitaires sont optimaux. Ces opérateurs sont construits à partir des vecteurs propres des matrices interspectrales des signaux enregistrés. L'objectif principal de ces opérateurs est de conserver la propriété du bruit blanc après focalisation. Dans cette étude, nous nous proposons de nouveaux opérateurs de focalisation en présence d'un bruit gaussien de structure de corrélation spatiale inconnue. Pour cela nous utilisons les vecteurs propres de la matrice des cumulants des signaux reçus. La focalisation utilisant les opérateurs proposés améliore considérablement le rapport signal sur bruit et permet une meilleure localisation de sources. De plus elle conduit à une réduction du temps de calcul comparée aux méthodes classiques. Nous avons comparé les divers algorithmes en utilisant des données réelles d'acoustique sous-marine. Les résultats obtenus montrent l'efficacité, en terme de localisation, des algorithmes proposés.

**Abstract** – Over these last years, several methods for the wide band signals have been proposed. They are generally a direct extension of narrow band signals methods. These methods are based on the focusing techniques. Many focusing operators have been developed to improve the signal-to-noise ratio. Some works have proved that unitary operators are optimum. These operators derive from inter-spectral eigenvectors of the recorded signals. These operators mainly aim at maintaining the white noise propriety after focusing. In this paper new focusing operators are proposed when a Gaussian noise of an unknown spatial correlation structure is present. To achieve this, we use the cumulant matrices eigenvectors of the received signals. The focalization which uses the proposed operators considerably improves the signal-to-noise ratio and allows a better localization of the sources. Besides, it reduces the calculating time compared to the classical methods. The various algorithms using the under-water acoustics real data have been compared. The obtained results show and underline the effectiveness of the proposed algorithms, in term of localization.

## 1 Introduction

La caractérisation de sources dans un milieu de propagation est très souvent l'objectif visé par le traitement d'antenne. En général cela se fait à partir des signaux reçus sur un réseau de capteurs ou antenne. Plusieurs méthodes ont été développées [1] dans ce but. Mais habituellement chacune d'elles dépend des connaissances *a priori* que l'on a, ou que l'on s'impose, sur la nature des sources (proches, spectre fréquentiel, spectre spatial,...), du bruit (blanc ou de corrélation spatiale connue) du modèle de propagation et/ou de la géométrie de l'antenne de réception (rectiligne, espacement entre capteurs,...) etc.; et lorsque l'on ne dispose que des signaux enregistrés, le choix de la méthode à utiliser est souvent difficile.

Compte tenu de ces difficultés, nous proposons dans cette étude d'utiliser des méthodes basées sur les statistiques d'ordre supérieur. Nous nous intéressons aux signaux large bande. Les opérateurs de focalisation calculés [1] à partir des matrices interspectrales sont revisités et nous mon-

trons qu'il est possible d'obtenir des opérateurs de focalisation ayant au moins les mêmes performances que les opérateurs initiaux. Ces opérateurs sont construits à partir des matrices des cumulants des signaux reçus. Afin de réduire la charge de calcul nécessaire pour le calcul des moments d'ordre quatre, utilisés dans cette étude, nous utilisons la matrice des cumulants réduite qui a les mêmes dimensions que la matrice interspectrale classique. Les principaux avantages de l'algorithme proposé sont: la suppression de la contrainte portante sur les opérateurs qui doivent être unitaires; la contribution du bruit s'annule à l'ordre quatre et surtout il est possible de déterminer la matrice de transfert sans connaissance *a priori* du modèle de propagation.

## 2 Position du problème

Nous considérons une antenne de  $N$  capteurs, qui reçoit  $P$  ( $P < N$ ) signaux émis par des sources auxquels se superpose un bruit additif; nous supposons que le milieu de

propagation est homogène, non dispersif et linéaire. Les signaux reçus sur tous les capteurs, en représentation matricielle, à la fréquence  $f_j$  :

$$\mathbf{r}(f_j) = \mathbf{A}(f_j)\mathbf{s}(f_j) + \mathbf{b}(f_j), \quad \text{pour } j = 1, \dots, M \quad (1)$$

avec  $\mathbf{A}(f_j)$  est la matrice de transfert  $N \times P$ ;  $\mathbf{r}(f_j)$ ,  $\mathbf{s}(f_j)$  et  $\mathbf{b}(f_j)$ , sont les transformées de Fourier, respectivement, du vecteur d'observation, du vecteur source et du vecteur bruit. La matrice interspectrale des signaux reçus à la fréquence  $f_j$  est définie par :

$$\Gamma(f_j) = E[\mathbf{r}(f_j)\mathbf{r}^+(f_j)] = \mathbf{A}(f_j)\Gamma_s(f_j)\mathbf{A}^+(f_j) + \Gamma_b(f_j) \quad (2)$$

où  $\Gamma_b(f_j) = E[\mathbf{b}(f_j)\mathbf{b}^+(f_j)]$  est la matrice interspectrale du bruit de dimension  $N \times N$ , et  $\Gamma_s(f_j) = E[\mathbf{s}(f_j)\mathbf{s}^+(f_j)]$  est la matrice interspectrale des signaux sources de dimension  $P \times P$ . La dépendance de la matrice de transfert  $\mathbf{A}(f_j)$  de la fréquence d'analyse a rendu difficile l'extension directe des méthodes bande étroite aux signaux large bande. En général, dans un premier temps les variations de la phase d'une fréquence à une autre sont compensées de telle sorte à rendre les matrices de transfert cohérentes, puis elles sont moyennées pour obtenir une seule matrice interspectrale à la fréquence dite de focalisation. Cette matrice est utilisée pour caractériser les sources, c'est la méthode à sous-espace signal cohérent. Cette dernière méthode a le grand avantage de décorrélérer les sources [1] et améliorer la localisation des sources.

### 3 Opérateurs classiques de focalisation

Afin de compenser les variations de la matrice de transfert sources/capteurs en fonction de la fréquence, des opérateurs de focalisation ont été utilisés. Cette compensation permet par la suite de réaliser une moyenne cohérente de l'ensemble des informations présentes dans la bande d'analyse. Initialement [2, 3] la recherche de ces opérateurs a conduit à la résolution du système d'équation suivant :

$$\mathbf{T}(f_o, f_j)\mathbf{A}(f_j, \theta) = \mathbf{A}(f_o, \theta), \quad j = 1, \dots, M \quad (3)$$

où  $f_o$  est la fréquence de focalisation. Dans le système (3),  $\mathbf{T}(f_o, f_j)$  est une matrice ( $N \times N$ ), où  $N$  est le nombre de capteurs. Les éléments de la matrice  $\mathbf{T}(f_o, f_j)$  sont les inconnues du système. Pour les calculer nous disposons de ( $N \times P$ ) équations. Compte-tenu de la condition  $N > P$ , que l'on s'impose très souvent en traitement d'antenne, le système d'équations (3) est sous-déterminé, ce qui conduit à la non-unicité de la solution. Wang et al. [2] puis Hung et al. [3] en introduisant un critère permettant de choisir l'opérateur. Ce critère consiste à évaluer le rapport signal sur bruit avant et après focalisation, ont proposé une solution qui utilise les vecteurs propres à gauche et à droite de la matrice  $\mathbf{A}(f_j, \theta)\mathbf{A}^+(f_o, \theta)$ . Puis afin de conserver la propriété du bruit blanc avant et après focalisation dans [1] une solution basée sur les vecteurs propres des matrices interspectrales des signaux a été proposée. Ultérieurement, Valaee et al. [4] ont introduit un critère d'optimisation (minimisation de l'erreur

due à la focalisation) qui a conduit à la même solution. Récemment dans [1] des variantes de ces opérateurs permettant une réduction du temps de calcul ont été proposées. Le tableau 1 résume les principaux opérateurs de focalisation développés au cours de ces dernières années: avec :  $\mathbf{V}_g(f_o, f_j)$  et  $\mathbf{V}_d(f_o, f_j)$  sont les matrices des vec-

TAB. 1: Opérateurs de focalisation

Dénomination	Opérateur de focalisation
Wang	$\mathbf{T}(f_o, f_j) = \mathbf{V}_g(f_o, f_j)\mathbf{V}_d^+(f_o, f_j)$
Adaptatif	$\mathbf{T}(f_o, f_j) = \mathbf{V}(f_o)\mathbf{V}^+(f_j)$
Adaptatif amélioré	$\mathbf{T}(f_o, f_j) = \mathbf{V}_s(f_o)\mathbf{V}_s^+(f_j)$
Bilinéaire	$\mathbf{T}(f_o, f_j) = \mathbf{X}(f_o)\mathbf{X}^+(f_j)$
Bilinéaire amélioré	$\mathbf{T}(f_o, f_j) = \mathbf{X}_s(f_o)\mathbf{X}_s^+(f_j)$

teurs propres, respectivement, à gauche et à droite de la matrice  $\mathbf{A}(f_j)\mathbf{A}^+(f_o)$ ,  $\mathbf{V}_s(f_o)$  et  $\mathbf{V}_s(f_j)$  désignent les vecteurs propres correspondant aux  $P$  plus grandes valeurs propres de la matrice interspectrale  $\Gamma(\cdot)$  et  $\mathbf{X}_s(f_o)$  et  $\mathbf{X}_s(f_j)$  désignent les vecteurs propres correspondant aux  $P$  plus grandes valeurs propres de la matrice interspectrale non-bruitée  $\Gamma_{NB}(f_j) = \mathbf{A}(f_j)\Gamma_s(f_j)\mathbf{A}^+(f_j)$ .

Nous remarquons que ces méthodes de focalisation nécessitent :

- 1) une initialisation de la matrice de transfert  $\mathbf{A}(f_j, \theta)$  en utilisant des directions de focalisation obtenues par des techniques de localisation à faible résolution (Formation de voies,...). Les performances des méthodes haute résolution dépendent de cette initialisation.
- 2) la connaissance de la matrice interspectrale du bruit dans ces méthodes ou la structure de sa corrélation spatiale. En pratique, le bruit n'est pas toujours blanc et sa structure est souvent inconnue. Ce qui dégrade sensiblement les performances de ces méthodes.

### 4 Opérateurs de focalisation proposés

Afin de surmonter ces contraintes existantes dans les méthodes de focalisation utilisant la matrice interspectrale des signaux reçus, nous proposons de construire les opérateurs de focalisation à partir de la matrice des cumulants d'ordre quatre. Nous définissons cette matrice des cumulants par :

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_r(f_j) &\triangleq \text{Cum}(r_1(f_j), r_1(f_j)^*, \mathbf{r}(f_j), \mathbf{r}(f_j)^+) \\ &= \mathbf{A}(f_j)\Psi_s(f_j)\mathbf{A}^+(f_j) \end{aligned} \quad (4)$$

où  $\Psi_s(f_j)$  est la matrice diagonale des kurtosis des sources. Nous constatons que la matrice  $\Gamma_b(\cdot)$  associée au bruit expression (2) n'apparaît plus dans l'expression (4). L'introduction des statistiques d'ordre quatre nous a permis d'éliminer le bruit. Cet apport nous a permis de construire les opérateurs de focalisation illustrés dans le tableau 1, à partir des vecteurs propres issus de la matrice des cumulants  $\mathbf{C}_r(f_j)$  des signaux reçus. Ces opérateurs améliorent considérablement les résultats de localisation des sources et nécessitent moins de temps de calcul (voir le tableau 2). Le nombre de multiplications après décomposition en

TAB. 2: Nombre d'opérations

Opérateur de focalisation	Nombre de multiplications après décomposition en éléments propres
Bilinéaire	$M.N^6.P^4$
Adaptatif	$M.N^6.P^4$
Bilinéaire proposé	$M.P^{16}$
Adaptatif proposé	$M.P^{16}$

éléments propres des opérateurs originaux (bilinéaire et adaptatif) est de  $M.N^6.P^4$  et des opérateurs proposés est de  $M.P^{16}$ . Les opérateurs présentés dans cette étude réduisent le nombre d'opérations d'un rapport ( $N^6/P^{12}$ ), comparé aux opérateurs classiques.

## 5 Application à des signaux expérimentaux

Nous avons appliqué les méthodes de localisation à sous-espace signal cohérent à des signaux d'acoustique sous-marine enregistrés en cuve. Cette expérimentation consiste à simuler une exploration du fond marin par la réflexion de signaux acoustiques large bande comme le montre les figures de (1) à (2). L'émission est assurée par un transducteur de type sonar excité par des impulsions électriques d'une amplitude de 300 volts environ et de  $0.2\mu s$  de largeur. Le signal acoustique résultant large bande est centré sur la fréquence de  $500KHz$  et sa bande passante varie de 300 à  $700KHz$ . La simulation de l'antenne de réception utilisée dans ce type d'expérience est assurée par un hydrophone cylindrique centré sur  $350KHz$ , que l'on déplace par pas régulier d'une position initiale correspondante à la réflexion spéculaire du premier angle d'émission à une position finale donnée afin d'assurer une réception correcte pour le plus grand angle d'émission choisi.

Pour ce qui concerne les données correspondantes à cette expérience, elles simulent la réponse d'une antenne composée de 59 hydrophones (Fig. (2)). Chaque signal reçu est échantillonné ( $\Delta T = 0.2\mu s$ ) sur 2048 points. Pour se placer dans des conditions expérimentales proches de la réalité physique nous avons ajouté un bruit gaussien aux signaux reçus sur l'antenne.

Nous avons traité les signaux enregistrés émis par des sources placées à  $13^\circ$ ,  $15^\circ$ ,  $23^\circ$  et  $25^\circ$ . Les résultats obtenus par l'analyse spatiale basée sur la méthode du sous espace signal cohérent sont représentés dans les figures (3) à (5). Le sous espace signal cohérent est obtenu en utilisant les différents opérateurs. Ces résultats montrent qu'en présence de bruit gaussien les méthodes classiques n'arrivent pas à localiser les sources voisines. L'utilisation des statistiques d'ordre supérieur améliore considérablement la localisation. Cette amélioration est due essentiellement à l'annulation de la matrice des cumulants du bruit à l'ordre quatre.

De plus afin de comparer les différents opérateurs proposés nous avons tracé (figure 6) l'écart-type (des quatre sources) en fonction du rapport signal sur bruit. Les résultats obtenus montrent que l'opérateur adaptatif est plus

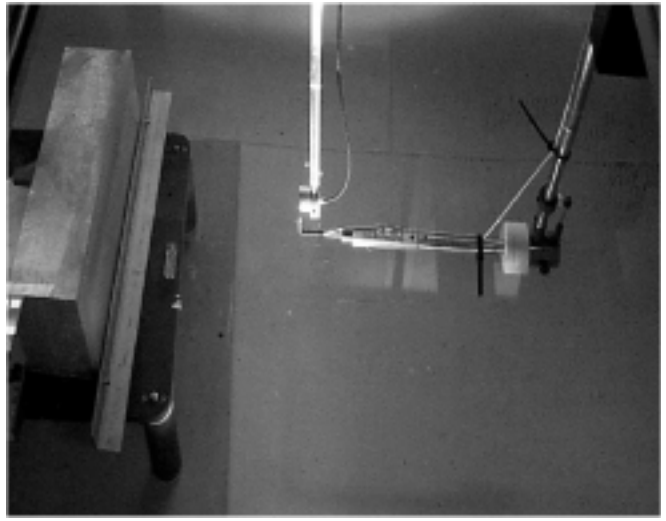


FIG. 1: Expérimentation qui montre la plaque, le transmetteur et le récepteur

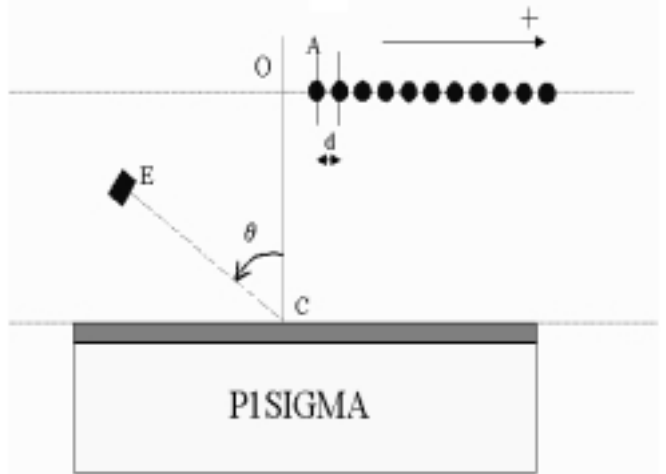


FIG. 2: Synoptique de l'expérience

robuste que les deux autres. Nous avons obtenu des résultats similaires en utilisant les matrices interspectrales en présence d'un bruit blanc.

## 6 Conclusion

Cette étude qui traite la caractérisation de signaux à bande large a permis de faire un inventaire non exhaustif des opérateurs de focalisation utilisés en traitement d'antenne. Nous avons développé de nouveaux opérateurs permettant l'estimation du sous-espace signal cohérent. Pour réduire le temps de nous avons proposé une modification de l'estimation de la matrice des cumulants. L'application de ces méthodes à des données réelles d'acoustique sous-marine a mis en évidence l'intérêt des statistiques d'ordre supérieur en localisation en présence d'un bruit gaussien. Les statistiques d'ordre quatre ont permis l'annulation de la matrice des cumulants du bruit.

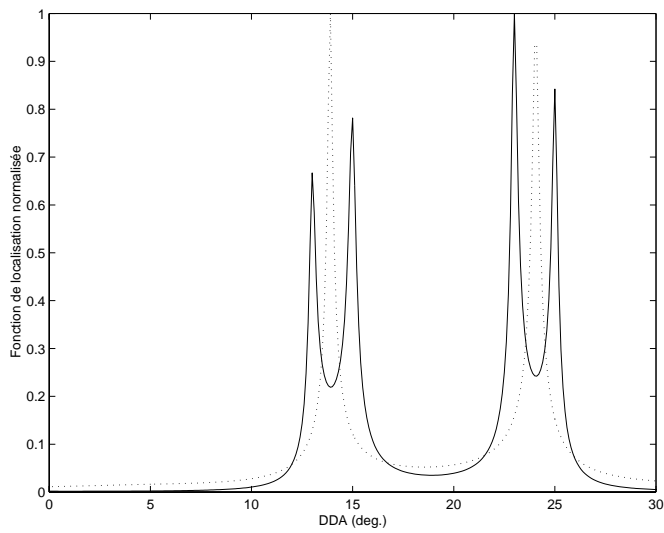


FIG. 3: Localisation des sources en utilisant l'opérateur Wang: '...' classique; '—' proposé

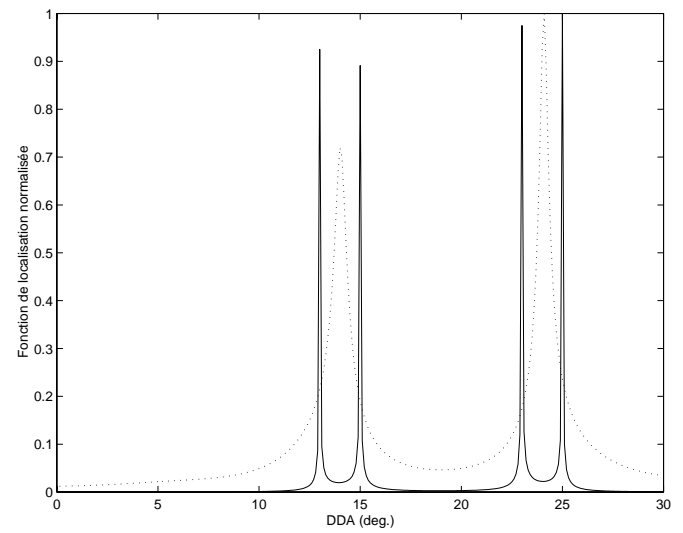


FIG. 5: Localisation des sources en utilisant l'opérateur adaptatif: '...' classique; '—' proposé

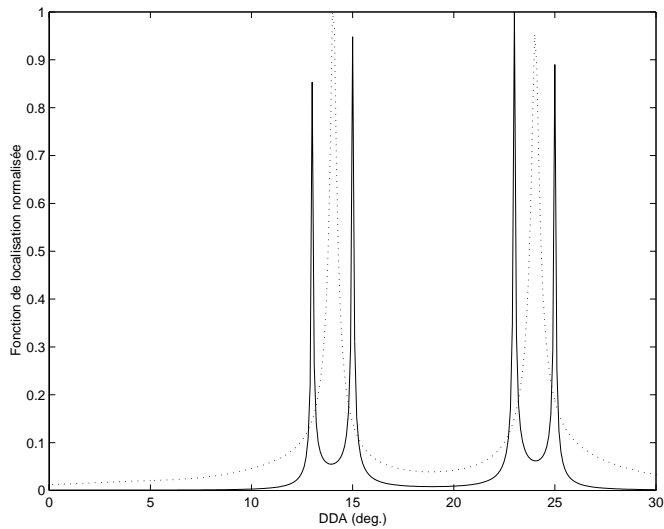


FIG. 4: Localisation des sources en utilisant l'opérateur bilinéaire: '...' classique; '—' proposé

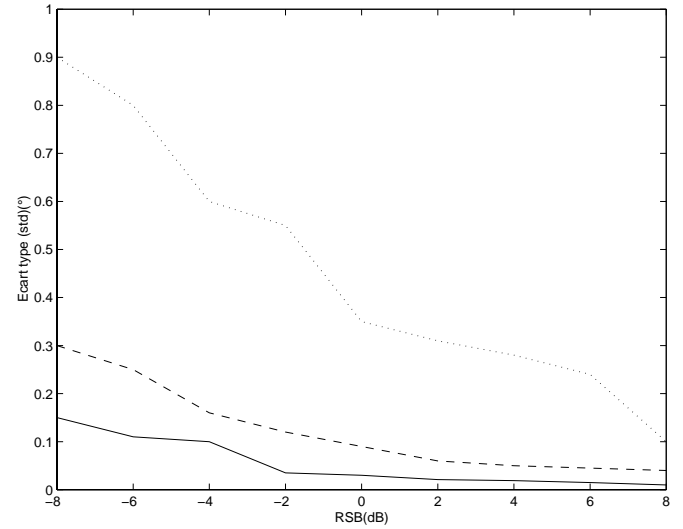


FIG. 6: Ecart type-opérateurs de focalisation proposés: '...' Wang; '—' bilinéaire; '—' adaptatif

## Références

- [1] M. Frikel et S. Bourennane. *Traitement d'antenne large bande: opérateurs de focalisation*. Annales des Télécommunications. vol. 52, n° 5-6, pp. 339-348, 1997.
- [2] H. Wang et M. Kaveh. *Coherent signal-subspace processing for the detection and estimation of angles of arrival of multiple wideband sources*. IEEE Trans. ASSP. vol. 33, n° 4, pp. 823-831, 1985.
- [3] H. Hung et M. Kaveh. *Focusing matrices for coherent signal-subspace processing*. IEEE. Trans. ASSP. vol. 36, n°8, pp. 1272-1281, 1988.
- [4] S. Valaee, P. Kabal. *Wideband array processing using a two-sided correlation transformation*. IEEE Trans. on Sig. Proc. vol. 43, n° 1, 1995.

- [5] N. Yuen, B. Friedlander. *DOA estimation in multipath: an approach using fourth-order cumulants*. IEEE. Trans. S. P. vol. 45. n°5, pp. 1253-1263, 1997.
- [6] S. Bourennane, B. Faure et J.L. Lacoume. *Traitement d'antenne pour des sources large bande*. Annales des Télécommunications. vol. 45, n° 7-8, pp. 384-392, 1990.
- [7] S. Bourennane, B. Faure et J.L. Lacoume. *Utilisation du sous-espace cohérent pour la localisation de sources bande large*. GRETSI'89. pp. 453-456, 1989.