

UTILISATION DU SOUS-ESPACE SIGNAL COHERENT POUR LA LOCALISATION DE SOURCES BANDE LARGE

S. Bourennane, B. Faure, J.L. Lacoume

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

RÉSUMÉ

Depuis quelques années on s'intéresse à l'étude de signaux de type bande large. On s'intéresse à la détection et à la localisation de sources émettant de tels signaux. Plusieurs méthodes ont été proposées qui utilisent soit le sous-espace signal incohérent (S.E.S.I), soit le sous-espace signal cohérent (S.E.S.C.).

Dans cette étude nous nous proposons d'analyser le S.E.S.C. en définissant un opérateur de focalisation. Cet opérateur a pour objectif de rendre cohérentes les différentes matrices interspectrales de façon à pouvoir les moyennner, afin d'estimer par la suite le S.E.S.C.. Ce dernier sera utilisé pour localiser les différentes sources rayonnantes.

SUMMARY

Since many years, we have been interested in the study of the wide-band signals. The principal objectives are generally the detection and localization of the sources radiating these signals. Several methods using the incoherent signal subspace or the coherent signal subspace are proposed for this problem.

In this paper we propose a new transformation matrix, to focus the different estimated spectral matrices at one chosen frequency, in the analysis bandwidth. These transformed matrices are then averaged for estimating the coherent signal subspace.

INTRODUCTION

L'estimation des azimuts et des puissances de sources rayonnantes dans un milieu de propagation, à partir des signaux reçus sur une antenne est très souvent l'objectif visé par le traitement d'antenne (sonar, sismique, radar ...).

Plusieurs méthodes ont été développées [1]. Chacune d'elles dépend des connaissances a priori sur la nature des sources (éloignées, spectre ...), du bruit (blanc) et de la géométrie de l'antenne (rectiligne, espacement entre capteurs, ...) etc. Mais en général on ne dispose que des signaux reçus.

Dans cette étude, nous nous intéressons aux signaux bande large, nous proposons une méthode permettant de corriger les matrices interspectrales estimées aux différentes fréquences de la bande, de manière à les moyennner par la suite d'une façon cohérente; et nous adaptons les critères de détection connus afin d'estimer le nombre de sources (dimension du S.E.S.C.) pour ce type de focalisation.

POSITION DU PROBLEME

Soit $\mathbf{r}(t) = [r_1(t) \dots r_N(t)]^T$ l'observation vectorielle mesurée sur les sorties des N capteurs d'une antenne pendant une durée T; où $r_i(t)$ représente le signal reçu sur le capteur i :

$$r_i(t) = \sum_{k=1}^p \alpha_{ik} s_k(t - \tau_{ik}) + y_i(t) \quad -T/2 \leq t \leq T/2$$

$s_k(\cdot)$: le signal émis par la $k^{\text{ième}}$ source

τ_{ik} : la durée de propagation de la source k au capteur i

$y_i(t)$: bruit additif sur le capteur i

α_{ik} : amplitude du signal émis par la source k et reçue sur le capteur i.

En se plaçant dans les hypothèses classiques du traitement d'antenne :

- Les p sources ont une même largeur de bande fréquentielle L, elles émettent dans les directions $\theta_1, \dots, \theta_p$ mesurées par rapport à la normale à l'antenne et situées à l'infini.

- Les signaux émis par les sources sont stationnaires, centrés et non corrélés avec les bruits.

- Les bruits sont stationnaires, non corrélés entre eux, centrés, de même variance $\sigma^2(f)$ à une fréquence donnée f et ont la même bande fréquentielle que celle des sources.

- Les capteurs sont tous identiques et ont une bande passante supérieure ou égale à L.

- Le milieu de propagation est homogène, non dispersif et linéaire

- La durée d'observation T est très grande devant la durée de propagation le long de l'antenne et devant le temps de corrélation entre les signaux reçus.



Le signal reçu sur le capteur i s'écrit alors dans le domaine fréquentiel (avec α_{ik} égal à un):

$$R_i(f_n) = \sum_{k=1}^P e^{-j 2 \pi f_n \tau_{ik}} S_k(f_n) + Y_i(f_n)$$

les $f_n \in L$ avec $n = 1, M$; et sont espacées de $\frac{1}{T}$

En utilisant la notation matricielle on obtient:

$$\underline{R}(f_n) = \underline{A}(f_n) \underline{S}(f_n) + \underline{Y}(f_n)$$

$\underline{A}(f_n) = [\underline{a}_{\theta_1}(f_n), \dots, \underline{a}_{\theta_p}(f_n)]$ est la matrice de transfert entre les p sources et les N capteurs à la fréquence f_n , avec

$$\underline{a}_{\theta k}(f_n) = \frac{1}{\sqrt{N}} \left[1 \ e^{-j \varphi_{kn}} \dots e^{-j (N-1) \varphi_{kn}} \right]^T$$

$$\varphi_{kn} = 2 \pi f_n \frac{d}{c} \sin \theta_k$$

$\underline{a}_{\theta k}(f_n)$ représente le vecteur directionnel de la source k .

d : espacement entre capteurs; c : célérité du son dans le milieu.

Compte-tenu des hypothèses faites précédemment, la matrice spectrale des signaux reçus à la fréquence f_n est:

$$\underline{\underline{Y}}(f_n) = \text{Cov}[\underline{R}(f_n)] = \underline{A}(f_n) \underline{\underline{Y}}_s(f_n) \underline{A}^+(f_n) + \sigma^2(f_n) \underline{I}$$

Après avoir estimé les différentes matrices spectrales des signaux reçus à toutes les fréquences f_n , nous désirons estimer les azimuts des sources rayonnantes dans le milieu.

Il est évident que dans le cas des signaux bande large, la détection et la localisation des p sources doivent être faites en tenant compte de toute la bande d'analyse L .

LOCALISATION DES SOURCES

Plusieurs approches ont été proposées [2,3,4]. On peut les regrouper en deux catégories:

1) Méthodes utilisant le sous-espace signal incohérent: dans ce cas la bande du signal est analysée fréquence par fréquence. La moyenne de l'ensemble des résultats conduit au résultat final.

2) Méthodes utilisant le sous-espace signal cohérent: les différentes matrices interspectrales estimées précédemment, sont corrigées de façon à les rendre cohérentes. On peut alors les moyenner et obtenir ainsi une seule matrice spectrale moyenne, cela à une fréquence choisie dans la bande, ce sera la fréquence de focalisation.

Dans le cas idéal où l'on a: un bon rapport signal sur bruit, des perturbations identiques à toutes les fréquences et un temps d'observation (d'intégration) très grand, les deux méthodes décrites conduisent aux mêmes résultats. Mais, très souvent:

- les perturbations dues au milieu de propagation affectent les fréquences de façons différentes [5],

- la répartition de l'énergie du signal émis varie en fonction de la fréquence, ce qui conduit à des fluctuations du rapport signal sur bruit en fonction de la fréquence à la réception. Par conséquence, les estimations des azimuts des sources aux diverses fréquences d'analyse sont biaisées différemment. Dans ce cas l'utilisation du S.E.S.I. s'avère beaucoup moins performante [6]. Pour remédier à cet inconvénient, il semble préférable d'utiliser le S.E.S.C. Nous proposons donc une méthode qui consiste à combiner les différentes informations contenues dans toutes les matrices interspectrales en utilisant un opérateur de focalisation permettant d'estimer le S.E.S.C. ou le sous-espace bruit cohérent (S.E.B.C.).

METHODE PROPOSEE POUR ESTIMER L'OPERATEUR DE FOCALISATION

Soit f_0 une fréquence choisie arbitrairement dans la bande L qui sera la fréquence de focalisation. La décomposition en éléments propres de la matrice interspectrale estimée à f_0 s'écrit:

$$\underline{\underline{Y}}(f_0) = \underline{V}(f_0) \underline{\underline{\Lambda}}(f_0) \underline{V}^+(f_0)$$

où: $\underline{V}(\cdot) = [\underline{v}_1(\cdot) \dots \underline{v}_N(\cdot)]$ matrice des vecteurs propres

$\underline{\underline{\Lambda}}(\cdot) = \text{diag}[\lambda_1(\cdot) \dots \lambda_N(\cdot)]$ matrice des valeurs propres et à une fréquence quelconque f_n :

$$\underline{\underline{Y}}(f_n) = \underline{V}(f_n) \underline{\underline{\Lambda}}(f_n) \underline{V}^+(f_n)$$

L'objectif est de trouver un opérateur $\underline{B}(f_n)$ qui vérifie les trois conditions suivantes:

- 1) $\underline{B}(f_n) \underline{V}(f_n) = \underline{V}(f_0) \quad \forall f_n \in L$
- 2) $\underline{B}(f_n)$ conserve la propriété du bruit blanc.
- 3) $\underline{B}(f_n)$ permet d'obtenir une dimension minimale du sous-espace signal.

Un opérateur qui vérifie ces conditions est:

$$\underline{B}(f_n) = \underline{V}(f_0) \underline{V}^+(f_n) \quad \forall f_n \in L$$

A toutes les fréquences f_n on peut estimer l'opérateur de focalisation et définir alors une matrice interspectrale moyenne:

$$\hat{\underline{\underline{Y}}}(f_0) = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M \underline{B}(f_n) \underline{\underline{Y}}(f_n) \underline{B}^+(f_n)$$

$$\hat{\underline{\underline{Y}}}(f_0) = \underline{A}(f_0) \left[\frac{1}{M} \sum_{n=1}^M \underline{\underline{Y}}_s(f_n) \right] \underline{A}^+(f_0) + \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M \sigma^2(f_n) \cdot \underline{I}$$

$$\underline{\underline{Y}}_s(f_n) = (\underline{V}_s^+(f_0) \underline{A}(f_0))^{-1} \underline{A}_s(f_n) (\underline{A}^+(f_0) \underline{V}_s(f_0))^{-1}$$

est une matrice non singulière de rang égal à p dans laquelle:

$$\underline{A}_s(f_n) = \text{diag}[\lambda_1(f_n) \cdot \sigma^2(f_n), \dots, \lambda_p(f_n) \cdot \sigma^2(f_n)]$$

et

$$\underline{V}_s(f_0) = [\underline{v}_1(f_0) \dots \underline{v}_p(f_0)]$$

$$\hat{\underline{\underline{Y}}}(f_0) = \underline{A}(f_0) \hat{\underline{\underline{Y}}}_s(f_0) \underline{A}^+(f_0) + \hat{\sigma}^2(f_0) \cdot \underline{I}$$

Toutes les méthodes de traitement d'antenne en bande étroite sont alors utilisables sur la matrice interspectrale moyenne.

ESTIMATION DU NOMBRE DE SOURCES APRES CE TYPE DE FOCALISATION

Plusieurs critères de détection ont été développés [7] dans le cas de signaux monochromatiques. Ces critères peuvent être appliqués de la même façon en utilisant les valeurs propres de la matrice interspectrale moyenne $\hat{\underline{\underline{Y}}}(f_0)$.

$$\hat{\underline{\underline{Y}}}(f_0) = \underline{V}(f_0) \left[\frac{1}{M} \sum_{n=1}^M \underline{\underline{\Lambda}}(f_n) \right] \underline{V}^+(f_0)$$

$$\hat{\underline{\underline{Y}}}(f_0) = \underline{V}(f_0) \hat{\underline{\underline{\Lambda}}}(f_0) \underline{V}^+(f_0)$$

Les colonnes de $\underline{V}(f_0)$ représentent les vecteurs propres de $\hat{\underline{\underline{Y}}}(f_0)$ et les éléments de $\hat{\underline{\underline{\Lambda}}}(f_0) = \text{diag}[\hat{\lambda}_1(f_0), \dots, \hat{\lambda}_N(f_0)]$.

représentent les valeurs propres de $\hat{\underline{\gamma}}(f_0)$

$$\hat{\lambda}_i(f_0) = \frac{1}{M} \sum_{n=1}^M \lambda_i(f_n) \quad i = 1, N$$

L'estimation des différentes matrices interspectrales est faite à partir de k réalisations indépendantes :

$$\underline{\gamma}(f_n) = \frac{1}{K} \sum_{k=1}^K \underline{R}_i(f_n) \underline{R}_i^+(f_n)$$

D'où la matrice interspectrale moyenne :

$$\hat{\underline{\gamma}}(f_0) = \frac{1}{MK} \sum_{n=1}^M \underline{B}(f_n) \left[\sum_{k=1}^K \underline{R}_i(f_n) \underline{R}_i^+(f_n) \right] \underline{B}^+(f_n)$$

On en déduit les expressions des critères les plus utilisés :

$$AIC(P) = -MK(N-P) \log \left[\frac{G(f_0)}{Z(f_0)} \right] + P(2N-P)$$

$$MDL(P) = -MK(N-P) \log \left[\frac{G(f_0)}{Z(f_0)} \right] + \frac{1}{2} P(2N-P) \log(MK)$$

$$Z(f_0) = \frac{1}{N-P} \sum_{i=p+1}^N \hat{\lambda}_i(f_0) \quad \text{et} \quad G(f_0) = \left[\prod_{i=p+1}^N \hat{\lambda}_i(f_0) \right]^{1/N-P}$$

APPLICATION SUR DES SIGNAUX EXPERIMENTAUX

Nous avons pu mettre en application les procédés de détection et de localisation large bande décrits ci-dessus sur des signaux expérimentaux. Pour cela nous avons utilisé les signaux provenant d'une campagne en mer [6] organisée par le GERDSM. La réception des signaux est faite sur une grande antenne horizontale.

Nous considérons la bande de fréquences des signaux à traiter, définie par la bande du signal d'une source coopérative connue. Cette bande est de 20 Hz située autour de 82 Hz.

A l'aide de la transformée de Fourier rapide, la bande du signal est divisée en 100 fréquences, à chaque fréquence la matrice interspectrale est estimée à partir des signaux reçus sur dix capteurs (61 à 70) de l'antenne. Ces matrices sont estimées en utilisant la méthode du périodogramme lissé avec une fonction de pondération de Tuckey caractérisée par un BeT = 20.

a) **DETECTION** : afin d'estimer le nombre de sources p, les critères AIC-MDL présentés ci-dessus ont été appliqués à la fréquence de focalisation $f_0 = 82$ Hz. Les deux critères ont conduit au même nombre de sources $p = 2$.

Sur la **figure 1**, nous présentons les valeurs propres estimées aux différentes fréquences.

b) **LOCALISATION**: après avoir estimé le nombre de sources, deux méthodes ont été appliquées pour estimer les azimuts des sources détectées :

1) A chacune des fréquences, la méthode du goniomètre [8] a été appliquée en considérant la dimension du S.E.S.I. égale à deux. La **figure 2** montre les différents résultats obtenus par l'analyse à toutes les fréquences. La **figure 3** donne une représentation sous forme de courbes de niveau de ces résultats. Nous constatons des fluctuations d'azimuts importantes autour des valeurs moyennes: $-10^\circ, 0^\circ, 8^\circ$ et 15° présentées **figure 4**. Nous constatons la présence de quatre sources alors que deux seulement avaient été détectées.

2) En utilisant la méthode de focalisation décrite précédemment et en appliquant la méthode du goniomètre sur la matrice $\hat{\underline{\gamma}}(f_0)$, afin de montrer que le choix de f_0 est arbitraire

dans la bande d'analyse, nous avons tracé les résultats du goniomètre en fonction de la fréquence de focalisation ; celle-ci décrit toute la bande : voir **figure 5**.

Comme précédemment nous présentons les mêmes résultats sous forme de courbes de niveau **figure 6**. La dispersion des azimuts autour des valeurs moyennes est beaucoup plus petite, ce qui permet de conclure à une robustesse au bruit de la méthode de focalisation. Cela peut s'expliquer par le moyennage cohérent effectué sur les différentes matrices. Notons que ces mêmes données ont été traitées en utilisant d'autres opérateurs de focalisation [3]. Les résultats obtenus [6] dans tous les cas sont comparables. Toutefois, la méthode proposée dans cet article a l'avantage de ne nécessiter aucune connaissance a priori notamment sur les azimuts des sources.

Cependant la méthode introduite par Wang [3] a la possibilité de résoudre des sources totalement corrélées, ce qui n'est pas le cas de la méthode que nous proposons. Un prétraitement est nécessaire par exemple un moyennage dans le domaine spatial sur chaque estimation de la matrice élémentaire.

CONCLUSION

Cette étude qui traite de la détection et de la localisation de signaux à bande large a permis d'étudier un nouvel opérateur de focalisation permettant d'estimer le sous-espace signal cohérent. Nous avons adapté les critères de détection classiques AIC-MDL à ce type de focalisation. Cette méthode d'analyse a été appliquée sur des données expérimentales d'acoustique sous-marine. Nous avons montré que :

- le choix de la fréquence de focalisation est arbitraire
- cette méthode d'analyse est plus robuste au bruit que la méthode de la décomposition en bandes étroites
- les résultats obtenus sont tout à fait comparables à ceux donnés par d'autres méthodes du même type. Toutefois, l'avantage de la méthode proposée est qu'elle n'exige pas de connaissance a priori sur les azimuts des sources et qu'elle conserve la propriété du bruit blanc.

Cette étude a été conduite avec le soutien de la DCAN

BIBLIOGRAPHIE

- [1] J. MUNIER and G.Y. DELISLE : Spatial analysis in passive listening using adaptive techniques. IEEE Proc.. Vol. 75, n° 11, Nov. 1987, p 1458-1471.
- [2] M. WAX, T.J. SHAN and T. KAILATH : Spatio-temporel spectral analysis by eigenstructure methods. IEEE ASSP-32, 817-827, Aug. 1984.
- [3] H. WANG and M. KAVEH : Coherent signal subspace processing for the detection and estimation of angles of arrival of multiple wide-band sources. IEEE ASSP-33, 823-831, Aug. 1985.
- [4] Y. GRENIER : Broadband source location using frequency dependent models. IEEE-ASSP, workshop on spectrum estimation and modeling, Minneapolis 1988, p13-16.
- [5] B. FAURE, G. JOURDAIN, F. VIAL : Etude stochastique de la surface d'onde reçue sur une grande antenne en acoustique sous marine. 12ème GRETSI, Nice 1989.
- [6] S. BOURENNANE, B. FAURE, J.L. LACOUME and P. GOUNON : Detection and localization of underwater wide-band acoustic sources. EUSIPCO 88, p. 303-306, Grenoble 1988.
- [7] C. LATOMBE : Détection et caractérisation de signaux à plusieurs composantes à partir de la matrice spectrale ; thèse de Doctorat d'Etat, INPG, Nov. 1982.
- [8] G. BIENVENU and L. KOPP : Optimality of high resolution array processing using the eigensystem approach. IEEE - ASSP-33, 1235-1247, Oct. 1983.

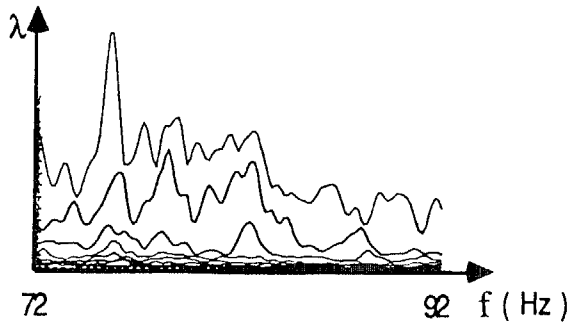


Figure 1: Valeurs propres à toutes les fréquences d'analyse

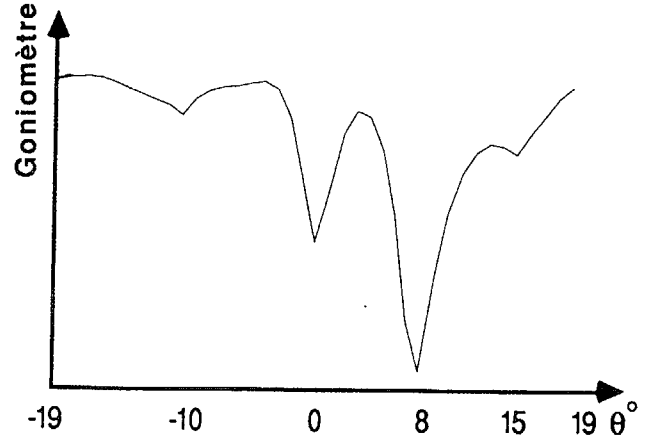


Figure 4: Moyenne arithmétique de l'azimétrie à toutes les fréquences

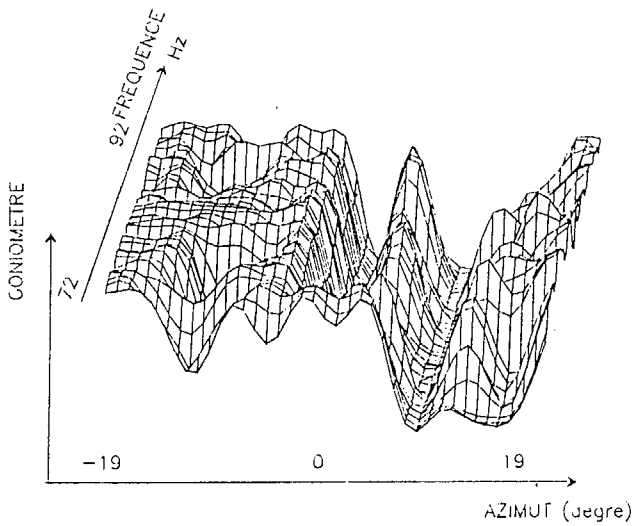


Figure 2: Analyse de la bande fréquence par fréquence

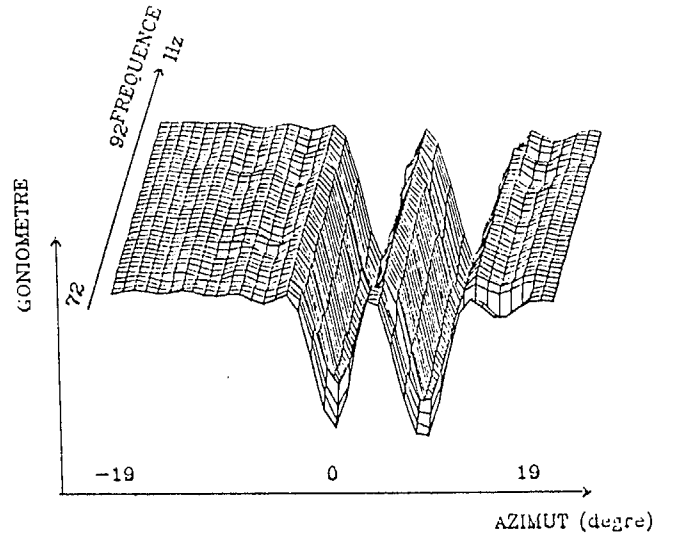


Figure 5: Analyse fréquence par fréquence après focalisation

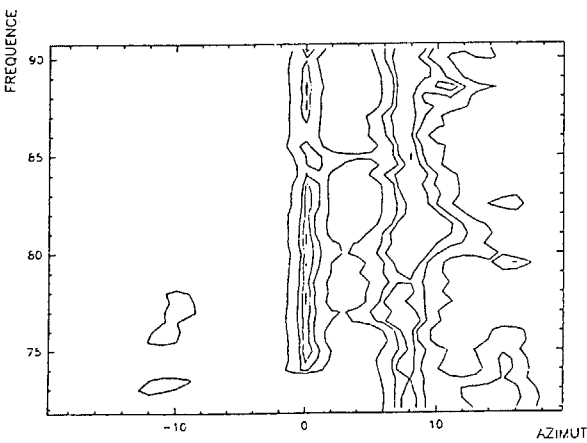


Figure 3: Courbes de niveaux avant focalisation

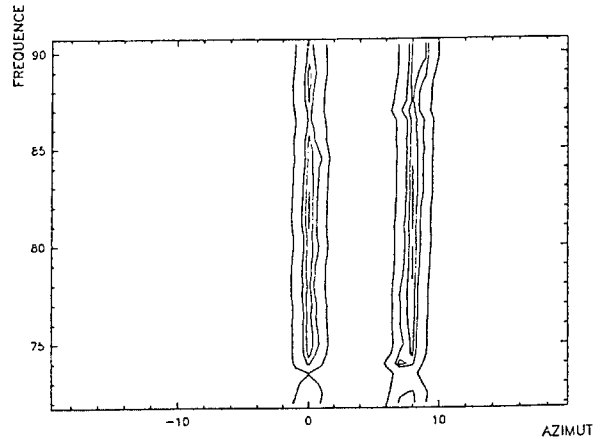


Figure 6: Courbes de niveaux après focalisation