



## AUTOFOCALISATION D'UNE ANTENNE ACTIVE D'IMAGERIE ACOUSTIQUE SOUS-MARINE

F. FLORIN (\*), G. KERVERN (\*), D. BARDET (\*\*)

(\*) THOMSON-SINTRA Activités Sous-Marines, Route de S<sup>c</sup> Anne du Portzic, 29601 BREST Cédex, FRANCE  
(\*\*) ALCATEL-TITN-ANSWARE, BREST, FRANCE

### RÉSUMÉ

On s'intéresse ici au problème de l'autofocalisation d'une antenne d'imagerie acoustique sous-marine déformée et en présence de réverbération de fond. Lorsque les distorsions d'antenne sont "anisotropes", (ce qui est le cas décrit) le critère classique du maximum de contraste se révèle inadapté. On propose une nouvelle méthode de Focalisation d'Antenne Déformable Autonome (FADA) qui permet une estimation des distorsions d'antenne tant isotropes qu'anisotropes, en présence de réverbération de fond.

### I. RAPPELS SUR L'AUTOFOCALISATION

Focaliser une antenne consiste à compenser les effets des déphasages non prévus ("distorsions de phase") créés par la propagation des ondes, les imperfections des capteurs et de l'électronique, ou les déformations d'antenne.

L'autofocalisation (ou focalisation autonome) a déjà fait l'objet de nombreux travaux et différents algorithmes ont été développés dans les domaines de l'astronomie [1], du radar [2-5], ou du sonar [6-9].

Jusqu'à présent l'autofocalisation n'a pas été étudiée dans le domaine particulier de l'imagerie acoustique des fonds marins. Suivant l'application ou le type d'antenne considéré, l'approche du problème et sa solution sont spécifiques. Chaque cas se caractérise par :

- des hypothèses sur le champ de source et le bruit,
- des hypothèses sur les distorsions,
- un algorithme d'autofocalisation adapté aux hypothèses.

Selon l'application, les distorsions sont de natures totalement différentes. En astronomie, c'est le problème des perturbations atmosphériques qui est traité [1], tandis que radaristes et sonaristes s'intéressent davantage aux distorsions électroniques ou aux déformations d'antenne ([2] à [9]).

Du point de vue de la modélisation, les distorsions seront dites isotropes lorsque indépendantes des paramètres spatiaux utilisés pour la description du champ sonore (typiquement distance, angle de site ou gisement), anisotropes dans le cas contraire. (Les familiers de l'optique parleraient d'isoplanétisme).

Le champ de sources (ou de cibles dans le cas du radar) est lui aussi caractéristique du problème posé. Il peut être ainsi constitué typiquement de sources ponctuelles "isolées" (étoile lointaine, cible à écho dominant, source acoustique isolée) ou d'un champ "diffus" ("speckle", "clutter", réverbération,...) généralement modélisé comme une multitude de sources

### ABSTRACT

This paper deals with selfcalibration of an unshaped underwater acoustic imaging array in the presence of sea-bottom reverberation. When array distortions are "anisotropic" (which is the described case) the classical Maximum Contrast Criterion becomes unsuitable. A new Deformable Array Focusing Technique (DAFT) is proposed, which allows to estimate isotropic and anisotropic array distortions, in the presence of sea-bottom reverberation.

ponctuelles indépendantes (et incohérentes vis-à-vis du signal éventuellement émis dans le cas actif) [1] [4].

On est donc amené à classer les algorithmes en fonction des hypothèses admises sur le champ et les distorsions. Dans la littérature on trouve ainsi dans le cas de distorsions isotropes (outre les méthodes d'identification directe des distorsions [2-5]) l'algorithme du maximum de contraste adapté aux cas de sources ponctuelles [6] [7] ou de speckle [1].

Notons que cette méthode a également été appliquée pour des distorsions anisotropes [6] [7] bien que les démonstrations qui justifient l'emploi du critère font toutes [1] [6] [11] l'hypothèse de distorsions isotropes.

Dans le cas de distorsions anisotropes (typiquement dues aux déformations d'antenne) et uniquement pour un champ de sources ponctuelles isolées [9] propose la maximisation de la projection du champ mesuré sur le sous-espace des sources. Cette méthode nécessite la connaissance a priori des positions des sources ou leur estimation.

Dans ce dernier cas les méthodes récursives proposées (position des sources - position des capteurs - positions des sources...) peuvent, dans le cas de fortes distorsions ne pas converger ou tout au moins être très instables.

Dans la suite, on propose une méthode d'estimation de distorsions anisotropes, adaptée au cas d'un champ de speckle (et donc au cas de l'imagerie acoustique des fonds marins) et qui donne de bons résultats en présence de sources ponctuelles isolées.

### II - FORMALISME DE L'IMAGERIE SOUS-MARINE

Le problème posé dans le présent article est celui de l'autofocalisation d'un système sonar actif d'imagerie sous-marine utilisant une antenne longue souple (type flûte) en réception.



Après démodulation complexe, filtrage passe bas et compression d'impulsion, les observations, en sortie de transformation de Fourier temporelle, prennent dans chaque canal de fréquence la forme d'un vecteur  $\underline{X}(f)$ .

Si la fréquence est assez élevée et le fond suffisamment réverbérant,  $\underline{X}(f)$  est un vecteur complexe gaussien circulaire de moyenne  $\underline{\mu}(f)$  contribution des cibles (ponctuelles) et de covariance  $\Gamma(f) = \Gamma_R(f) + \Gamma_B(f)$ .

$\Gamma_R(f)$  contribution de la réverbération

$\Gamma_B(f)$  contribution des bruits

De façon à simplifier l'écriture on supposera que l'antenne travaille en champ lointain autour d'une distance  $R$  fixée (on rappelle que l'imagerie sous-marine est une configuration active) et que, sur la durée d'observation utilisée pour le calcul d'un "snapshot"  $\underline{X}(f)$ , les bruits et la réverbération se comportent comme des signaux stationnaires.

Il est possible de montrer en ce qui concerne la réverbération qu'un modèle de diffuseurs discrets conduit naturellement au formalisme adopté ici.

Rémarquons qu'a priori, en raison de la réverbération, les observations ne sont pas indépendantes d'une fréquence à l'autre (\*). On peut toutefois montrer que si les fréquences  $f, f'$  sont suffisamment disjointes,  $\underline{X}(f)$  et  $\underline{X}(f')$  peuvent être décorrélées. (La décorrélation n'implique pas, malgré le caractère gaussien des lois marginales, l'indépendance d'ensemble).

Le schéma descriptif de la configuration est donné figure 1.

On a :

$$\Gamma_R(f) = 2\sigma_a^2 \int_{\Delta\theta} \underline{d}(f,\theta) \underline{d}(f,\theta)^* d\theta \quad (1)$$

avec  $\underline{d}(f,\theta) = [\exp(-ik \cdot \vec{r}_n)]_{n=1,N}$

$$\vec{k} = \frac{2\pi f}{c} \vec{u}(\theta) \text{ vecteur d'onde}$$

$$\vec{u}(\theta) = [\sin\theta, \cos\theta]^T$$

$\theta$  = gisement

$\vec{r}_n = [x_n, y_n]^T$  = vecteur position du  $n^{\text{ième}}$  capteur

$2\sigma_a^2$  = Densité angulaire de densité spectrale de réverbération

$\Delta\theta$  = Largeur angulaire du secteur insonifié

On remarque que le problème est ramené à un formalisme bidimensionnel ( $\vec{u}, \vec{k}$ ) uniquement à des fins de simplification. Le modèle ainsi développé sous entend également certaines hypothèses sur la propagation, en particulier il néglige les différences d'atténuations entre trajets sonores reçus sur les différents capteurs. La non uniformité de la réverbération se traduirait par le passage de  $\sigma_a^2$  sous l'intégrale dans (1),  $\sigma_a^2$  dépendant alors du paramètre  $\theta$ .

(\*) Cette remarque rend caduque l'approche du maximum de vraisemblance en large bande, la loi conjointe des observations étant a priori inconnue.

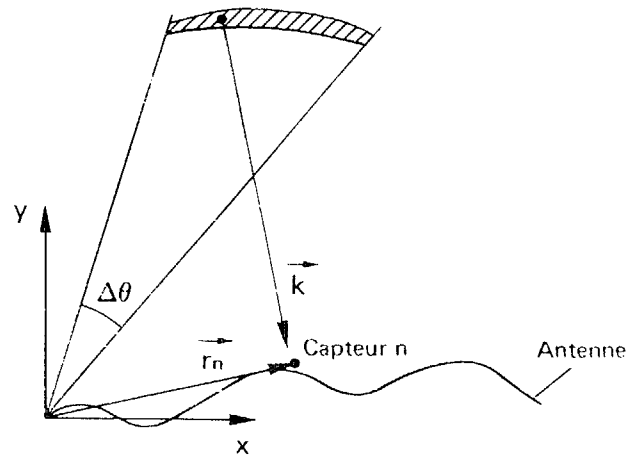


Figure 1 : Schéma descriptif de la configuration

Dans ce cadre, le problème de l'autofocalisation d'une antenne déformée (que l'on notera  $A_0$ ) intervient par l'intermédiaire de la méconnaissance des positions  $\vec{r}_n$  de ses capteurs. Ainsi (on ne fait plus apparaître la dépendance avec la fréquence) le vecteur  $\underline{X}$  dépend de  $A_0$  par l'intermédiaire de sa moyenne ( $\underline{\mu}(A_0)$ ) et de sa covariance ( $\Gamma_R(A_0) + \Gamma_B$ ).

Le problème de la formation de voie (ou du traitement d'antenne en général) est qu'elle nécessite une connaissance a priori  $A$  de la forme d'antenne. Les déformations d'antenne induisent le fait que  $A$  est différent de  $A_0$ , ce qui se traduit sur la focalisation d'une source sous le gisement  $\theta_0$  par une réponse spatiale dans la direction  $\theta$  (voie  $\theta$ ) valant :

$$\begin{aligned} \underline{d}(A,\theta)^* \underline{d}(A_0,\theta_0) &= \sum_{n=1}^N \exp [i(k(\theta)\vec{r}_n(A) - k(\theta_0)\vec{r}_n(A_0))] \\ &= \sum_{n=1}^N \exp [i(\vec{k}(\theta) - \vec{k}(\theta_0))\vec{r}_n(A) + k(\theta_0)\vec{k}(\theta)\vec{r}_n(A) \\ &\quad - k(\theta_0)\vec{r}_n(A_0)] \end{aligned}$$

Dans ces conditions, il est clair que le déphasage parasite apparu :  $\Delta\varphi_n = \vec{k}(\theta_0) \Delta\vec{r}_n$  (avec  $\Delta\vec{r}_n = \vec{r}_n(A) - \vec{r}_n(A_0)$ ) dépend de la position (ici uniquement angulaire) de la source et qu'ainsi la condition d'isoplanétisme (ie d'indépendance entre distorsion et position de la source) n'est pas respectée.

Cette condition est fondamentale dans la démonstration de la propriété du Maximum de contraste [1], [6], [11].

Toutefois si  $\Delta\theta$  reste faible et  $\Delta r$  petit (ou à composante essentielle en  $y$ ),  $\Delta\varphi_n$  est indépendant de  $\theta$  au premier ordre en  $\theta$  et la propriété garde sa validité pratique.

En imagerie acoustique sous marine, l'antenne fonctionnant en hautes fréquences, les déformations envisageables peuvent être de plusieurs longueurs d'onde. On a donc été amené à développer un algorithme de Focalisation d'Antenne Déformée Autonome (FADA) que l'on désignera désormais par ces quatre lettres (En anglais DAFT pour Deformable Array Focusing Technique).



### III - PRINCIPE DE L'ALGORITHME FADA

Propriétés :

$\Gamma_R$  est rigoureusement une matrice de rang plein dans le cas général

$\Gamma_R$  est approximativement (\*) une matrice de rang

$N_v = \Delta\theta/2\theta_3$  avec  $2\theta_3 =$  largeur à 3dB d'une voix classique ( $2\theta_3 \approx \lambda/L$ , L longueur d'antenne)

(\*) Ceci signifie que sur N (N = Nombre de capteurs) valeurs propres de  $\Gamma_R$  qui est hermitienne, N- $N_v$  d'entre elles ont des valeurs très faibles (rapport  $10^{-4}$ ) par rapport aux autres. Cette propriété, empirique, est une propriété bien connue des suites sphéroïdales qui peuvent être vues comme les vecteurs propres de la matrice  $\Gamma_R$  lorsque les sources sont à l'infini, l'antenne échantillonnée à  $\lambda$  et l'intégration en  $d\sin\theta$  au lieu de  $d\theta$  (voir [10]). 2

Problème posé :

Il s'agit de trouver une fonction coût,  $g(\underline{X}, A)$ ,

( $\underline{X}$  = observations =  $\{\underline{X}(f, A_0), f \in B\}$ , A = paramètres décrivant l'antenne), qui soit maximum pour l'antenne réelle  $A_0$  dans le cas d'un champ à réverbération dominante.

Solution proposée :

Soit  $\Gamma_R'(A, f) = \int d(\theta, f) d^*(\theta, f) d\sin\theta$  (ou  $d\theta$ )  $\forall f \in B$   
 Soit  $\Pi(A, f)$ ,  $f \in B$ , le projecteur sur l'espace associé aux  $N_v$  vecteurs propres correspondant aux  $N_v$  valeurs propres les plus grandes de  $\Gamma_R'(A, f)$   
 alors on choisit  $A_0 = \text{Arg} (\text{Max}_{A, f} \sum \|\Pi(A, f)\underline{X}(f, A_0)\|^2)$

Justification : Théorème FADA :

En moyenne la projection des observations Bande Etroite est maximale pour  $A = A_0$

ie  $\forall f \in B E(\|\Pi(A, f)\underline{X}(f, A_0)\|^2)$  est maximum pour  $A = A_0$   
 où E ( ) désigne l'espérance mathématique.

Démonstration :

$$E \text{Tr} (\Pi \underline{X} \underline{X}^* \Pi) = \text{Tr} (\Pi \Gamma(A_0) \Pi) = \sum \lambda_{0j} \underline{u}_{0j}^* \Pi \underline{u}_{0j}$$

avec  $(\lambda_{0j}, \underline{u}_{0j})$  valeurs propres et vecteurs propres associés de  $\Gamma(A_0)$ .

Interprétation physique :

L'opération  $\Pi(A)\underline{X}(A_0)$  consiste à filtrer spatialement le champ  $\underline{X}(A_0)$  en gardant uniquement les composantes spatiales issues de l'espace insonifié sous hypothèse d'une antenne de mesure de type A. Lorsque  $A = A_0$ , comme par hypothèse  $\underline{X}$  est physiquement issu de l'espace insonifié, toute l'énergie de  $\underline{X}$  est conservée, et la projection est maximale.

Remarque :

+ Cette solution apparaît comme relativement robuste aux changements de configuration de champ et en particulier à la présence de sources ponctuelles. En effet, la non uniformité du champ change peu le projecteur associé aux directions principales "non nulles".

De plus, dans le cas où le champ est formé de sources ponctuelles isolées, le projecteur idéal théorique devient celui associé aux directions des sources, cf. [9]. Or ce projecteur est quasi invariant par projection  $\Pi(A)$  de sorte que la propriété est conservée.

+ Le théorème reste vrai en présence de bruit blanc puisque les  $N_v$  vecteurs propres principaux de  $\Gamma_R + \sigma_B^2 \text{Id}$  sont les mêmes que ceux de  $\Gamma_R$ .

+ Il est clair que l'on pourrait aussi minimiser  $\Pi^+(A)\underline{X}(A_0)$  où  $\Pi^+$  est le projecteur associé aux N- $N_v$  valeurs propres minimales.

### IV - PERFORMANCES

On a testé le critère d'optimisation FADA en le comparant à la technique du maximum de contraste.

L'antenne est constituée de N capteurs équirépartis au sein d'une structure filiforme de longueur L.

La déformation en y est une fonction harmonique, d'amplitude A, de phase nulle à l'origine, d'ordre i ( $H(A, i)$ ) de l'abscisse curviligne s. (La déformation en x s'en déduit par une intégrale elliptique de deuxième espèce). On appelle  $f_0$  la fréquence du signal (supposé Bande Etroite).

On fixe : N = 30 capteurs,  $\Delta\theta = 12$  degrés, L = 10 m,  $F_0 = 12$  KHz,  $N_v = 19$ ,  $H(A_0, i) = H(2\lambda, 5)$ ,  $\lambda = 12,5$  cm.

On a évalué, pour des rapports de réverbération sur bruits différents, à partir de 3 x 50 tirages statistiques indépendants, les performances des deux algorithmes. Les critères de performances choisis sont l'amplitude  $\hat{A}_0$  estimée de la déformation et l'index de directivité  $\hat{l}_0$  de l'antenne ainsi focalisée.

On note  $C_{R/B}$  = rapport réverbération sur bruit sur capteurs

$$= \frac{\gamma_R \Delta\theta}{\gamma_B}$$

avec  $\Gamma_R = \gamma_R \Gamma_R$  et  $\Gamma_B = \gamma_B \text{Id}$  (Id = matrice identité)

On a obtenu (précision d'échantillonnage sur  $\hat{A}_0 = 0,05\lambda$ ):

$C_{R/B}$	Algorithme	$\hat{A}_0$ (en nombre de $\lambda$ )		$\hat{l}_0$ (normalisé à 1)	
		Moyenne	écart-type	Moyenne	écart-type
10 dB	FADA	1.98	0	0.99	0
	Contraste	1.93	0.59	0.77	0.25
0 dB	FADA	2.00	0.02	0.98	0.02
	Contraste	2.13	0.53	0.75	0.26
- 10 dB	FADA	2.00	0.05	0.96	0.04
	Contraste	1.91	0.95	0.70	0.30



## V - CONCLUSION

La présentation faite dans les lignes précédentes ne constitue qu'une première approche de l'algorithme FADA, qui sera complétée ultérieurement par des tests plus complets de robustesse et de fiabilité.

Du point de vue pratique, la méthode pose évidemment (comme celle du maximum de contraste) le problème de la paramétrisation de la déformation d'antenne et du coût calcul qui croît comme une fonction puissance du nombre de paramètres. Pour un nombre de paramètres supérieur à 2 ou 3 le coût calcul devient prohibitif. Pour l'utilisation opérationnelle de FADA il conviendrait donc d'optimiser au mieux la stratégie de recherche du maximum du critère.

## VI - REMERCIEMENTS

Les travaux présentés ont été réalisés grâce au soutien de la DRET (contrat n° 89.015.18).

## VI - BIBLIOGRAPHIE

- [1] R.A. Muller, A. Buffington, "Real-time correction of atmospherically degraded telescope images through image sharpening", *Jour. of the Opt. Soc. of Am.*, vol. 64, No 9, pp. 1200-1210, Sept. 1974.
- [2] B.D. Steinberg, "Microwave Imaging of Aircraft", *Proc. IEEE*, vol. 76, No 12, pp.1578-1592, Dec.88.
- [3] B.D. Steinberg, "Radar Imaging from a Distorted Array: the radio Camera Algorithm and Experiments", *IEEE Trans. on Antennas and Propagat.*, vol. AP-29, No. 5, pp. 740-748, Sept. 1981.
- [4] E.H. Attia, B.D. Steinberg, "Self-Cohering Large Antenna Arrays Using the Spatial Correlation Properties of Radar Clutter", *IEEE Trans. on Antennas and Propagat.*, vol. 37, No 1 pp. 30-38, Jan. 1989.
- [5] B. Kang, H.M. Subbaram, B.D. Steinberg, "Improved Adaptive-Beamforming Target for Self-Calibrating a Distorted Phased Array", *IEEE Trans. on Antennas and Propagat.*, vol. 38, No. 2, pp. 186-194, Féb. 1990.
- [6] L. Kopp, M. Aiach, "Traitement spatial avec des antennes déformées", *GRETSI 81*, pp. 365-370, Nice, Juin 1981.
- [7] H.P. Bucker, "Beamforming a towed line array of unknown shape", *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 63, No. 5, pp. 1451-1454, May 19 .
- [8] Y. Rockah, P.M. Schultheiss, "Array Shape Calibration Using Sources in Unknown Locations...", *IEEE Trans. on ASSP.*, vol. 35, No. 3, pp. 286-299, Mars 1987 et vol. 35, No. 6, pp. 724-735, Juin 1987.
- [9] A.J. Weiss, B. Friedlander, "Array shape Calibration using eigenstructure methods", *Signal Processing*, vol. 22, No. 3, pp. 251-258, March 1991.
- [10] G. Vezzosi, F. Florin, B. Bouthemy, "Localisation de sources ponctuelles à large-bande", *GRETSI 89*, Juan-les-Pins, 1989.
- [11] J.P. Hamaker, J.D. O'Sullivan and J.E. Noordam, "Image sharpness, Fourier optics, and redundant-spacing interferometry", *J. Opt. Soc. Am.*, vol. 67, No. 8, pp. 1122-1123, August 1977.