

# Localisation d'objets enfouis en présence de bruit coloré

Zineb SAIDI<sup>1</sup>, Salah BOURENNANE<sup>2</sup>

<sup>1</sup>CRAN - ESSTIN / UHP - Nancy 1, 2 rue Jean Lamour,  
54 519 VANDOEUVRE les Nancy cedex, France

<sup>2</sup>Institut Fresnel, UMR CNRS 6133-EGIM,  
D.U. de saint Jérôme, 13 397 Marseille Cedex 20, France

zineb.mehel-saidi@esstin.uhp-nancy.fr, salah.bourennane@egim-mrs.fr

**Résumé** – Cette étude traite le problème de la localisation (l'estimation de l'angle et de la distance) d'objets enfouis dans le sédiment marin en présence d'un bruit coloré. Nous proposons une méthode qui incorpore la solution exacte du champ réfléchi dans la méthode MUSIC et qui utilise les cumulants pour éliminer le bruit gaussien afin d'estimer correctement les directions d'arrivée des signaux réfléchis et les distances obliques entre l'antenne et les objets à localiser. Les performances de la méthode proposée sont validées sur des données expérimentales enregistrées durant des expériences d'acoustique sous-marine.

**Abstract** – This study deals with the bearing and the range estimation for buried objects problem in presence of gaussian noise. We propose a method that incorporates the exact solution for the scattered field in the MUSIC method, uses the cumulants to reduce the gaussian noise in order to obtain a correct estimation of the range and the bearing objects. Finally, the performances of the proposed method are validated on experimental data recorded during an underwater acoustics experiments.

## 1 Introduction

Le traitement d'antenne est un domaine de recherche qui s'intéresse à la détection et à la localisation de sources rayonnantes dans un milieu. Il a été récemment étendu à la sismique pour séparer des ondes et à la détection et localisation d'objets enfouis [6] [5]. Historiquement, la première méthode de localisation développée est la formation de voies. Ensuite les travaux de recherche visant à améliorer la résolution spatiale ont conduit aux développements de méthodes dites à haute résolution. La plus connue est la méthode du goniomètre ou de MUSIC [7]. Ces méthodes exploitent les statistiques à l'ordre deux des signaux enregistrés. L'idée de base de ces méthodes est le partage de l'espace d'observation en deux sous espaces complémentaires : le sous espace signal et le sous espace bruit. Ces méthodes utilisent la propriété d'orthogonalité entre les deux sous espaces pour localiser les sources ce qui les rend indépendantes des paramètres physiques associés à l'expérimentation. La méthode MUSIC est liée à une bonne connaissance du bruit. En réalité, ce bruit regroupe les bruits ambiants (turbulences océaniques, vagues, pluie, bruits biologiques, ...) et les bruits propres au trafic maritime, d'origine mécanique, électrique ou hydrodynamique (bruits de machines, vibrations de coques). Dans cette étude, nous considérons que ce bruit est seulement gaussien. Ils existent plusieurs méthodes exploitant les statistiques d'ordre deux du bruit pour éliminer ce dernier, nous citerons la méthode de soustraction et la méthode de blanchiment du bruit [3]. Nous proposons pour éliminer ce bruit gaussien d'utiliser les statistiques d'ordre supérieur (les cumulants). En effet, les cumulants d'un bruit gaussien sont nuls.

Nous formulerons d'abord le problème de localisation d'objets en présence de bruit gaussien. Ensuite, nous présenterons l'algorithme, exploitant les propriétés statistiques d'ordre supérieur (cumulants) du bruit, qui permet d'estimer simultanément

les directions d'arrivées des ondes et les distances antenne-objets. Nous terminerons cette étude par des expérimentations pour illustrer l'effet du bruit sur la méthode de localisation géographique des objets, ainsi que l'amélioration apportée par l'utilisation des cumulants.

## 2 Formulation du problème

Nous considérons une antenne rectiligne composée de  $N$  capteurs recevant des signaux large bande réfléchis par  $K$  objets ( $N > K$ ) en présence d'un bruit additif gaussien (figure 1). Le vecteur des signaux reçus à la fréquence  $f_n$  s'écrit:

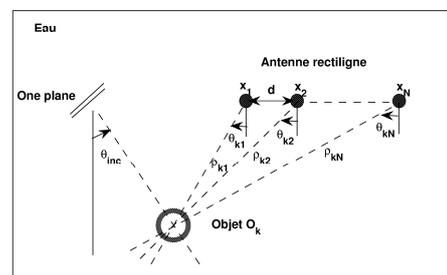


FIG. 1 – Configuration du problème.

$$\mathbf{r}(f_n, \theta, \rho) = \mathbf{A}(f_n, \theta, \rho) \mathbf{s}(f_n) + \mathbf{b}(f_n), \quad (1)$$

où  $\mathbf{A}(f_n, \theta, \rho) = [\mathbf{a}(f_n, \theta_1, \rho_1), \mathbf{a}(f_n, \theta_2, \rho_2), \dots, \mathbf{a}(f_n, \theta_K, \rho_K)]$ .  $\mathbf{A}(f_n, \theta, \rho)$  est la matrice de transfert, le vecteur signal  $\mathbf{s}(f_n)$  est supposé stationnaire et non gaussien, le vecteur  $\mathbf{b}(f_n)$  contient

les bruits supposés gaussiens et statistiquement indépendants des signaux sources. Chaque composante du vecteur  $\mathbf{a}(f, \theta_i, \rho_i)$  ( $i = 1, \dots, N$ ) est obtenue en utilisant les modèles de diffusion acoustique [2], [4].

$$a(f_n, \theta_{ki}, \rho_{ki}) = \begin{cases} \text{pour un cylindre creux :} \\ p_{c0} \sum_{m=0}^{\infty} j^m \epsilon_m b_m H_m^{(1)}(K_n \rho_{ki}) \\ \times \cos(m(\pi - \theta_{ki} - \theta_{inc})), \\ \\ \text{pour une sphère creuse :} \\ p_{s0} \sum_{m=0}^{\infty} (2m+1) j^m B_m h_m^{(1)}(K_n \rho_{ki}) \\ \times P_m(\cos(\pi - \theta_{ki} - \theta_{inc})), \end{cases} \quad (2)$$

où  $p_{c0}$  et  $p_{s0}$  sont des constantes,  $K_{n1} = \frac{2\pi f_n}{c}$  est le nombre d'onde et  $c$  est la vitesse de propagation,  $\epsilon_0 = 1, \epsilon_1 = \epsilon_2 = \dots = 2$ ,  $b_m$  et  $B_m$  sont des coefficients dépendant des conditions aux limites,  $m$  est le nombre de modes,  $H_m^{(1)}$  et  $h_m^{(1)}$  sont, respectivement, la fonction de Hankel cylindrique et sphérique et  $P_m(\cos(\pi - \theta_{ki} - \theta_{inc}))$  est le polynôme de Legendre [2], [4].

A partir des signaux reçus, nous définissons la matrice tranche cumulants d'ordre quatre de dimension  $(N \times N)$  [1], [5]:

$$\begin{aligned} \mathbf{C}_t(f_n) &\triangleq \text{Cum}(r_1(f_n), r_1^*(f_n), \mathbf{r}(f_n), \mathbf{r}^+(f_n)) \\ &= \begin{bmatrix} c_{1,1} & c_{1,N+1} & \cdots & c_{1,N^2-N+1} \\ c_{1,2} & c_{1,N+2} & \cdots & c_{1,N^2-N+2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ c_{1,N} & c_{1,2N} & \cdots & c_{1,N^2} \end{bmatrix} \\ &= \mathbf{A}(f_n) \mathbf{U}_s(f_n) \mathbf{A}^+(f_n) \end{aligned} \quad (3)$$

où  $\mathbf{U}_s(f)$  est la matrice diagonale de Kurtosis des sources où son  $i^{\text{ème}}$  élément est défini par:  $\text{Cum}(s_i(f_n), s_i^*(f_n), s_i(f_n), s_i^*(f_n))$  avec  $i = 1, \dots, K$ .

Notons que la matrice  $\mathbf{C}_t(f_n)$  obtenue ne contient pas la contribution du bruit comme dans le cas de l'utilisation de la matrice interspectrale [5]. En effet, Les cumulants d'ordre quatre d'un bruit gaussien sont nuls.

### 3 Algorithme de localisation d'objets en présence d'un bruit gaussien

Après avoir défini la matrice tranche cumulants dans la section précédente, nous allons présenter dans cette section comment l'intégrer dans la méthode de localisation géographique des objets.

1. estimation initiale de  $\theta_i$ , où  $i = 1, \dots, p$ , en utilisant la formation de voies.  $p$  représente le nombre de sources estimé initialement,
2. estimation initiale de  $\rho_i$  en utilisant la formule suivante,

$$\rho_i = \frac{h}{\cos(\theta_i)},$$

où  $h$  représente la distance entre l'axe horizontal de l'antenne et le fond marin ,

3. estimation de la matrice de transfert  $\hat{\mathbf{A}}(f_n)$  pour chaque fréquence de la bande de fréquences ( $n = 1, \dots, L$ ,  $L$  est

le nombre de fréquences dans la bande de fréquences) en utilisant:

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{A}}(f_n) &= [\mathbf{a}(f_n, \theta_1, \rho_1), \mathbf{a}(f_n, \theta_2, \rho_2), \dots, \mathbf{a}(f_n, \theta_p, \rho_p)], \\ \mathbf{a}(f_n, \theta_i, \rho_i) &= [a(f_n, \theta_{i1}, \rho_{i1}), \dots, a(f_n, \theta_{iN}, \rho_{iN})]^T, \end{aligned}$$

où chaque composant du vecteur  $\mathbf{a}(f_n, \theta_p, \rho_p)$  est calculé en utilisant les modèles acoustiques développés au deuxième chapitre:

4. estimation de la matrice tranche cumulants des signaux reçus  $\mathbf{C}_t(f_n)$  puis décomposition en éléments propres,
5. calcul de la matrice diagonale des kurtosis pour chaque fréquence  $f_n$  pour obtenir:

$$\begin{aligned} \mathbf{U}_s(f_n) &= (\hat{\mathbf{A}}^+(f_n) \hat{\mathbf{A}}(f_n))^{-1} \hat{\mathbf{A}}^+(f_n) \\ &\quad [\mathbf{C}_t(f_n)] \hat{\mathbf{A}}(f_n) \\ &\quad (\hat{\mathbf{A}}^+(f_n) \hat{\mathbf{A}}(f_n))^{-1}, \end{aligned} \quad (4)$$

6. calcul de la matrice moyenne des matrices diagonales des kurtosis:

$$\bar{\mathbf{U}}_s(f_0) = \frac{1}{L} \sum_{n=1}^L \mathbf{U}_s(f_n), \quad (5)$$

7. calcul de  $\hat{\mathbf{C}}_t(f_0) = \hat{\mathbf{A}}(f_0) \bar{\mathbf{U}}_s(f_0) \hat{\mathbf{A}}^+(f_0)$ ,
8. formation de l'opérateur de focalisation en utilisant les matrices des vecteurs propres:

$$\mathbf{T}(f_0, f_n) = \hat{\mathbf{V}}(f_0) \mathbf{V}^+(f_n) \quad (6)$$

où  $\mathbf{V}(f_n)$  et  $\hat{\mathbf{V}}(f_0)$  sont les matrices des vecteurs propres issues respectivement de la décomposition en éléments propres des matrices des cumulants  $\mathbf{C}_t(f_n)$  et  $\hat{\mathbf{C}}_t(f_0)$ ,

9. formation de la matrice moyenne tranche cumulants  $\bar{\mathbf{C}}_t(f_0)$  ainsi que sa décomposition en éléments propres:

$$\bar{\mathbf{C}}_t(f_0) = \frac{1}{L} \sum_{n=1}^L \mathbf{T}(f_0, f_n) \mathbf{C}_t(f_n) \mathbf{T}^+(f_0, f_n) \quad (7)$$

10. estimation du nombre d'objets  $K$  en appliquant la méthode AIC ou MDL [9] sur la matrice des valeurs propres  $\bar{\mathbf{C}}_t(f_0)$ .

En décomposant la matrice tranche cumulants  $\bar{\mathbf{C}}_t(f_0)$  en éléments propres nous obtenons:

$$\bar{\mathbf{C}}_t(f_0) = \sum_{i=1}^N \lambda_i(f_0) \mathbf{v}_i(f_0) \mathbf{v}_i^+(f_0) \quad (8)$$

où  $\lambda_i(f_0)$  et  $\mathbf{v}_i(f_0)$  avec  $i = 1, \dots, N$ , représentent, respectivement les valeurs propres et leurs vecteurs propres correspondants de la matrice tranche cumulants  $\bar{\mathbf{C}}_t(f_0)$ .

Soit, en représentation matricielle,

$$\bar{\mathbf{C}}_t(f_0) = \mathbf{V}(f_0) \mathbf{\Lambda}(f_0) \mathbf{V}^+(f_0) \quad (9)$$

où

$$\mathbf{V}(f_0) = [\mathbf{v}_1(f_0), \dots, \mathbf{v}_N(f_0)]$$

et

$$\mathbf{\Lambda}(f_0) = \text{diag}(\lambda_1(f_0), \dots, \lambda_N(f_0)).$$

Nous supposons que les colonnes de  $\mathbf{A}(f_0)$  sont différentes et non colinéaires, ce qui implique une matrice  $\bar{\mathbf{C}}_t(f_0)$  non singulière et de rang  $K$ . Cette hypothèse implique que:

- les  $(N - K)$  valeurs propres sont les plus petites,  $\lambda_{K+1}(f_0) = \dots = \lambda_N(f_0) \cong 0$ .

- les vecteurs propres, correspondant aux plus petites valeurs propres, sont orthogonaux aux colonnes de la matrice  $\mathbf{A}(f_0)$ :

$$\mathbf{V}_b(f_0) \triangleq \{\mathbf{v}_{K+1}(f_0) \dots \mathbf{v}_N(f_0)\} \perp \{\mathbf{a}(f_0, \theta_1, \rho_1) \dots \mathbf{a}(f_0, \theta_K, \rho_K)\}$$

Finalement le spectre spatial, à la fréquence  $f_0$ , qui nous permet d'estimer les coordonnées spatiales des objets (la distance objet-captteur  $\rho$  et l'angle  $\theta$ ) en présence d'un bruit gaussien est donné par:

$$Z(f_0, \theta_k, \rho_k) = \frac{1}{|\mathbf{a}^+(f_0, \theta_k, \rho_k) \mathbf{V}_b(f_0)|^2}, \quad (10)$$

où  $\mathbf{V}_b(f_0)$  est la matrice des vecteurs propres de la matrice  $\bar{\mathbf{C}}_t(f_0)$  associée aux  $(N - K)$  plus petites valeurs propres. La matrice tranche cumulants  $\bar{\mathbf{C}}_t(f_0)$  est utilisée exactement de la même façon que la matrice interspectrale des signaux reçus. L'avantage est que la matrice  $\bar{\mathbf{C}}_t(f_0)$  est une matrice "propre" (sans bruit) donc l'estimation des directions d'arrivée des objets et des distances objets-captteurs est nettement améliorée par l'utilisation de cette matrice

## 4 Validation expérimentale

### 4.1 Conditions expérimentales

Des mesures expérimentales ont été réalisées dans une cuve remplie d'eau douce et de sable fin (figure 2 pour évaluer les performances de la méthode développée. Le fond de la cuve est

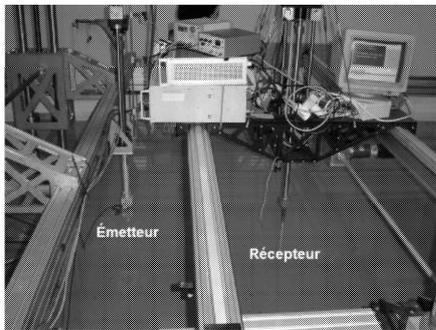


FIG. 2 – Cuve expérimentale.

rempli de sable fin et homogène, dans lequel sont enfouis, entre 0 et 0.005 m, 4 couples d'objets notés  $Cou_i$ , avec  $i = 1, \dots, 4$  (le 1<sup>er</sup> couple est de forme sphérique et les 3 autres couples sont de forme cylindrique). Ces 4 couples d'objets sont représenté sur la figure 3 et leurs caractéristiques sont résumées dans le tableau 1.

	$Cou_1$	$Cou_2$	$Cou_3$	$Cou_4$
$a$ (m)	0.03	0.01	0.018	0.02
remplissage	air	air	eau	air
espacement (m)	0.33	0.13	0.16	0.06

TAB. 1 – caractéristiques des différents objets (le rayon interne  $b = a - 0.001$  m,  $a$  est le rayon externe,  $Cou_i = i^{\text{ème}}$  couple,  $i = 1, \dots, 4$ )

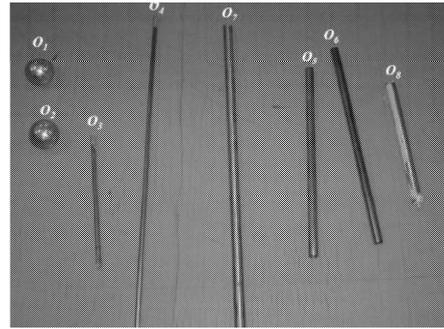


FIG. 3 – Objets utilisés pour la validation expérimentale.

Nous avons réalisé huit expériences. Pour chaque expérience, l'axe vertical de l'émetteur est fixé 0.8 m à gauche du premier objet de chaque couple. Le récepteur se déplace horizontalement de la position initiale à la position finale avec un pas de déplacement  $d = 0.002$  m. Pour les 4 premières expériences, nous avons fixé l'axe horizontal du récepteur à 0.2 m du fond de la cuve. Pour les 4 dernières expériences, l'axe horizontal du récepteur est fixé à 0.4 m du fond de la cuve. La figure 4 montre la configuration de la première expérience.

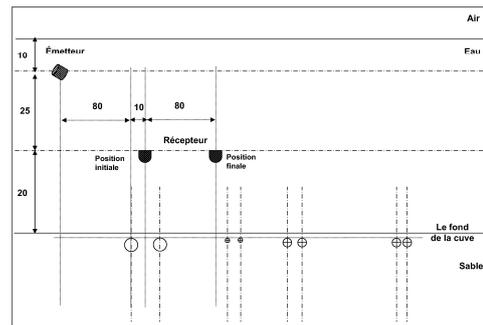


FIG. 4 – Configuration de la première expérience.

### 4.2 Données expérimentales

Les signaux reçus sont composés d'un mélange de l'écho de surface eau-air, l'écho de fond eau-sable, l'écho des objets enfouis et le bruit comme l'illustre la figure 5. le nombre d'objets à localiser, associé à chaque expérience, est  $K = 2$ . Ainsi pour pouvoir localiser ces  $K$  objets, nous avons besoin de  $N$  capteurs avec  $N > K$ . En considérant alors les signaux reçus sur les 10 premières positions du récepteur, la condition sera largement satisfaite. Par ailleurs, le rapport signal sur bruit est de 0 dB. La bande de fréquence est  $[f_{min} = 150, f_{max} = 250]$  kHz, la fréquence centrale  $f_0 = 200$  kHz et la fréquence d'échantillonnage est  $f_e = 2$  MHz.

### 4.3 Résultats et discussions

Les principales étapes de la méthode développée, listées ci-dessus, sont appliquées à toutes les données expérimentales. Un balayage sur  $r$  et sur  $\theta$  a été appliqué ( $[0.1, 0.5]$  m pour  $r$  et  $[-90^\circ, 90^\circ]$  pour  $\theta$ ) et le nombre de positions du récepteur est  $N = 10$ . Nous avons appliqué l'opérateur de fo-

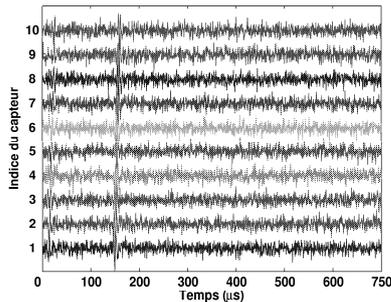


FIG. 5 – Représentation temporelle des données expérimentales associées à la mesure de la première expérience.

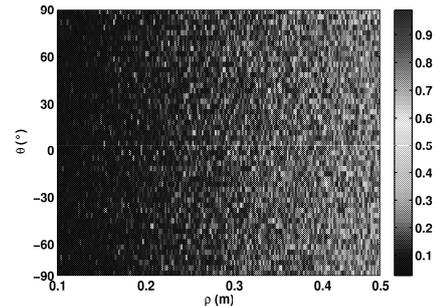
calisation sur les signaux en divisant la bande de fréquences  $B = [150, 250]$  kHz en 100 bandes étroites.

Pour illustrer l'effet du bruit sur l'estimation simultanée des directions d'arrivée des objets et des distances objets-capteurs, nous appliquons dans un premier temps, la méthode de localisation géographique des objets en utilisant la matrice interspectrale [6], qui n'intègre pas de prétraitement pour réduire le bruit gaussien. Les performances de l'estimateur de  $\theta$  et de  $\rho$  sont considérablement dégradées, dans ce cas, comme nous le montre la figure 6-(a). Le spectre spatial de la méthode de localisation géographique des objets en présence de bruit gaussien traité par les cumulants est montré à la figure 6-(b). Nous constatons que le bruit a plus d'effet sur l'estimation des distances objets-capteurs  $\rho$  que sur l'estimation des directions d'arrivée des objets  $\theta$ . L'Erreur Quadratique Moyenne ( $EQM$ ), entre les valeurs estimées et les valeurs expérimentales de  $\theta$  et de  $\rho$ , pour toutes les expériences confondues, sont:  $l'EQM_{\theta_{exp}-\theta_{est}} = 0.11^\circ$  et  $l'EQM_{\rho_{exp}-\rho_{est}} = 0.004$  m.

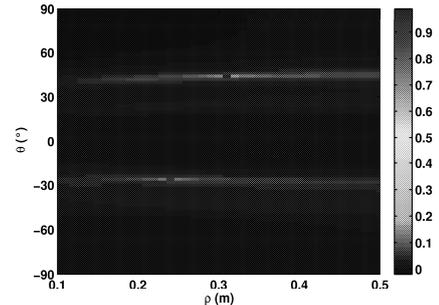
## 5 Conclusion

Nous avons présenté dans cette étude une méthode permettant de traiter le bruit gaussien. Nous nous sommes intéressés aux statistiques d'ordre supérieur (cumulants) du bruit et comme ce dernier est gaussien sa matrice cumulants est nulle. C'est cette propriété, que nous avons exploitée et intégrée dans la méthode de localisation géographique des objets. Par soucis de réduire le temps de calcul nous avons envisagé d'utiliser la matrice tranche cumulants à la place de la matrice interspectrale des signaux reçus. Pour compléter cette étude, nous avons traité le cas des signaux corrélés et en présence du bruit, en proposant un algorithme assez simple qui combine l'utilisation à la fois de la matrice tranche cumulants et l'opérateur de focalisation bilinéaire. Cet algorithme nous permet d'estimer simultanément les directions d'arrivée des objets et les distances objets-capteurs.

Pour illustrer les avantages de l'utilisation de la matrice des cumulants, nous avons d'abord estimé les directions d'arrivée des objets et les distances objets-capteurs en utilisant la matrice interspectrale sans prétraitement du bruit. Ensuite, c'est la matrice tranche cumulants qui a été utilisée. Les directions d'arrivée des objets et des distances objets-capteurs ont été estimées avec une erreur relativement faible devant les dimensions des objets considérés c'est-à-dire que les valeurs estimées correspondent toujours à un point de l'objet.



(a)



(b)

FIG. 6 – Spectre spatial de la localisation géographique des objets. (a) En utilisant la matrice interspectrale. (b) En utilisant les cumulants.

Les résultats obtenus sont encourageant et valident notre méthode de localisation géographique des objets en présence de bruit.

## Références

- [1] S. Bourennane, M. Frikel and A. Bendjama, Fast wide band source separation based on higher order statistics. *IEEE Signal Processing Workshop On higher order statistics*. Canada, July 1997.
- [2] R. D. Doolittle and H. Uberall, "Sound scattering by elastic cylindrical shells", *J. Acoust. Soc. Am.*, 39 (2), 1966.
- [3] M. Frikel, Traitement d'antenne en présence d'un bruit coloré, *Thèse de Doctorat de l'Université de Corse, Décembre, 1996*.
- [4] R. Goodman, and R. Stern, "Reflection and transmission of sound by elastic spherical shells", *J. Acoust. Soc. Am.*, 34 (3), 1962.
- [5] Z. Saidi, and S. Bourennane, Cumulant-based coherent signal subspace method for bearing and range estimation, *EURASIP Journal on Advances in Signal Processing*, vol. 2007, Article ID 84576, 9 pages, 2007.
- [6] Z. Saidi and S. Bourennane, "Buried objects localization in presence of correlated signals", *IEEE Workshop Statistical Signal Processing*, Bordeaux, France, 2005.
- [7] R. O. Schmidt, "Multiple emitter location and signal parameter estimation", *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal processing*, 35(3), March 1983.
- [8] S. Valaee and P. Kabal, "Wideband array processing using a two-sided correlation transformation", *IEEE Transaction On signal Processing*, 43(1), 1995.
- [9] M. Wax and T. Kailath, "Detection of signals information theoretic criteria", *IEEE transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, 33(2), 1985.