



MISE EN ŒUVRE DE TRAITEMENTS HAUTE RESOLUTION BIDIMENSIONNELS SPATIAUX ET SPATIO-FREQUENTIELS EN RADAR ACTIF

Daniel PUZENAT

THOMSON-CSF, division SDC

18 Avenue du Maréchal Juin, 92363 Meudon-La-Forêt Cedex, FRANCE

Résumé. Le présent exposé porte sur la mise en œuvre de traitements haute résolution en radar, pour distinguer des échos de cibles proches et en estimer des paramètres de position spatiale ou spatio-Doppler. Les échos sont confondus dans un plan site-gisement ou angle-Doppler, aussi s'intéresse-t-on aux traitements haute résolution bidimensionnels.

Abstract. This paper deals with the application of high resolution methods to radar, to separate close targets and estimate their angular and/or Doppler frequency parameters. The confusion domain is bidimensional in azimuth-elevation or in azimuth-Doppler so that we focus on bidimensional high resolution methods.

1. INTRODUCTION

Un radar a pour objectifs de détecter dans un secteur assigné de l'espace la présence d'objets d'intérêt, appelés cibles, et d'en estimer des paramètres de positions : distance au radar, position angulaire, vitesse Doppler..., grâce à l'exploitation de la réflexion par la cible d'une onde électromagnétique émise par le radar.

L'estimation de ces paramètres de position est classiquement réalisée par un ensemble de filtrages adaptés :

- la compression d'impulsion mesure la distance d'une cible au radar en repérant le temps écoulé entre l'émission d'énergie et la réception de l'écho (cet aspect n'est pas approfondi dans cet exposé) ;
- le filtrage Doppler (ou vitesse) mesure le décalage de la fréquence porteuse de l'onde, dû au mouvement de la cible. Un train d'impulsions échantillonne temporellement ce décalage et permet son exploitation ;
- la direction angulaire d'un écho est donnée soit par la direction de visée de l'antenne, soit par une formation de faisceaux par le calcul (FFC). L'antenne réalise une formation de voie(s) analogique alors que la FFC la réalise numériquement lorsque l'antenne est composée de capteurs élémentaires associés chacun à un récepteur.

Ainsi pour chaque axe d'estimation, distance, Doppler (vitesse), direction spatiale, les coordonnées des filtres dans lesquels une détection s'est produite fournissent une estimation des paramètres de position de l'écho correspondant.

Ces filtres adaptés ont un pouvoir de résolution limité, c'est-à-dire que deux cibles très proches ne peuvent être distinguées et n'engendrent qu'une seule détection, semblable à une cible unique. Cette limitation du pouvoir de résolution est directement liée à la taille de l'antenne et à la durée d'observation des phénomènes.

En effet, dans l'axe direction angulaire la largeur à 3 dB du lobe principal du diagramme de rayonnement de l'antenne quantifie la limite de résolution. Si la formation de voies n'est pas analogique mais numérique (par FFC), c'est de façon équivalente la largeur à 3 dB des filtres de FFC qui la mesure. Dans l'axe Doppler (c'est-à-dire l'axe vitesse), c'est la largeur à 3 dB des filtres de transformée de Fourier discrète du train

d'impulsions qui détermine le pouvoir de résolution, ainsi directement relié au nombre d'impulsions disponibles. Enfin dans l'axe distance la largeur de bande du signal émis conditionne la largeur à 3 dB du filtre de compression d'impulsion.

Ainsi deux cibles séparées, dans un quelconque axe, de moins de la largeur à 3 dB du filtre adapté correspondant, ne sont pas distinguées dans cet axe.

Plusieurs types de situations opérationnelles engendrent de telles confusions dans tous les axes d'estimation à la fois. Elles peuvent se regrouper en deux catégories : celles pour lesquelles les échos sont potentiellement séparables dans le domaine spatial, c'est-à-dire dans un plan site-azimut ou site-gisement, et celles pour lesquelles les échos sont potentiellement séparables dans un domaine spatio-fréquentiel, à savoir généralement un plan angle-Doppler (ie angle-vitesse). Par potentiellement il faut entendre à l'aide de techniques à haute résolution. Ces dernières ont connu un essor considérable dans la dernière décennie, dans le domaine de la localisation passive de signaux utiles appelés "sources", dans des contextes généralement monodimensionnels. Nous proposons ici d'examiner leur mise en œuvre à la fois dans le cas d'un système actif et dans des contextes bidimensionnels dont certains mêlent espace et temps.

2. HYPOTHESES ET FORMALISME

Considérons un radar disposant de N voies de réception associées à N capteurs (des voies somme et différences, des capteurs élémentaires éventuellement regroupés en sous-réseaux). On établit aisément que le signal après réception, complexe et numérisé, s'écrit vectoriellement :

$$\underline{x}(k, \rho) = \underline{D}(\rho) \underline{s}(k, \rho) + \underline{n}(k, \rho)$$

sous l'hypothèse que les fronts d'ondes sont connus et que le milieu de propagation est linéaire, homogène et isotrope. \underline{s} est le vecteur des échos observés en un point origine 0 (signaux sources), \underline{n} un bruit spatial ou spatio-temporel, et \underline{D} une matrice, dite directionnelle, contenant les paramètres spatiaux ou spatio-Doppler à estimer. Si P désigne le nombre d'échos sources présents à la distance ρ , $\underline{D}(\rho)$ est formée en colonnes de P vecteurs directionnels \underline{d} :

- dans le cas spatial bidimensionnel :
- $\underline{d} = \underline{d}(\underline{u}) = (a_1(\underline{u}) \exp(2j\pi F_e \underline{u} \cdot \underline{r}_1/c), \dots, a_N(\underline{u}) \exp(2j\pi F_e \underline{u} \cdot \underline{r}_N/c))^T$



- k désigne la $k^{\text{ième}}$ impulsion parmi K
- $\underline{s}(k, \rho)$ vecteur à P lignes formées des répliques des impulsions émises affectées par l'effet Doppler et par un coefficient d'amplitude et phase (propagation).

- dans le cas spatio-Doppler :

$$\mathbf{d} = \mathbf{d}(\mathbf{u}, f) = \begin{bmatrix} a_1(\mathbf{u}) \exp(2j\pi F_e \mathbf{u} \cdot \mathbf{r}_1 / c), \dots, \\ a_1(\mathbf{u}) \exp(2j\pi F_e \mathbf{u} \cdot \mathbf{r}_1 / c) \exp(2j\pi f(L-1)T_T) \\ \vdots \\ a_N(\mathbf{u}) \exp(2j\pi F_e \mathbf{u} \cdot \mathbf{r}_N / c), \dots, \\ a_N(\mathbf{u}) \exp(2j\pi F_e \mathbf{u} \cdot \mathbf{r}_N / c) \exp(2j\pi f(L-1)T_T) \end{bmatrix}^T$$

- ici k est le numéro d'un train d'impulsions de longueur L
- $\underline{s}(k, \rho)$ vecteur à P lignes formées des répliques des impulsions émises affectées d'un coefficient d'amplitude et de phase (propagation).

Dans tous les cas F_e désigne la fréquence d'émission du système, T_T la période de récurrence des impulsions, \mathbf{r}_i la position du $i^{\text{ème}}$ capteur et $a_i(\mathbf{u})$ son gain complexe dans la direction spatiale \mathbf{u} (\mathbf{u} normé), enfin c la vitesse de la lumière.

Il faut ici remarquer que le formalisme est le même aussi bien pour les problèmes d'estimation spatiale bidimensionnelle que pour les problèmes d'estimation spatio-Doppler bidimensionnelle. D'un cas à un autre, le vecteur \underline{x} contient ou non un axe temporel pour réaliser l'estimation Doppler, et c'est principalement l'expression de la matrice \underline{D} qui change. L'apparition de la variable distance ρ est due au fait que le système est actif.

Dans le contexte radar usuel on montre que l'hypothèse "tous les échos sources ont même fréquence porteuse connue a priori" est valide, et qu'on peut admettre que les signaux sont à bande étroite. Alors la matrice de corrélation \underline{R} du processus \underline{x} suffit pour décrire le phénomène observé. En supposant bruit et signaux décorrelés, bruit spatialement blanc ou spatio-temporellement blanc selon les cas (ou préalablement blanchi par des techniques appropriées) \underline{R} s'écrit $\underline{R} = \underline{D} \cdot \underline{R}_s \cdot \underline{D}^H + \underline{I}$ où \underline{R}_s est la matrice de covariance des sources et \underline{I} l'identité. \underline{R} joue un rôle important car tous les estimateurs haute résolution peuvent s'exprimer en fonction de cette matrice. Certains estimateurs reposent entièrement sur ses propriétés algébriques. \underline{R}_s n'est pas moins importante : elle exprime les relations statistiques entre les cibles ; beaucoup d'estimateurs y sont sensibles. Il faut remarquer que les signaux sources sont ici de nature déterministe et que la définition de \underline{R}_s n'est que formelle. On mesurera en fait le niveau de corrélation observé de deux sources en évaluant sur un horizon de K observations l'estimée \underline{R}_s^e de \underline{R}_s .

3. SOLUTIONS BIDIMENSIONNELLES

Le formalisme qui précède est identique au formalisme usuel dérivé des cas d'écoute passive spatiale. Aussi les mêmes méthodes de résolution s'appliquent, sous réserve qu'elles se généralisent au cas bidimensionnel. C'est le cas de beaucoup, dont la formulation générale est vectorielle. D'autres sont particulières au contexte bidimensionnel. Regroupons les estimateurs en sous-ensembles :

- maximum de vraisemblance (méthode optimale) [a];
- maximum d'entropie bidimensionnel (superrésolution) [b] ;
- analyse autorégressive bidimensionnelle (superrésolution) [c]
- filtrage spatial adaptatif (superrésolution) [d] ;
- projection dans une (des) direction(s) particulière(s) après décomposition de l'espace vectoriel des signaux en deux

- sous-espaces orthogonaux et supplémentaires (haute résolution) [e] ;
- modèles d'état (haute résolution) [f].

Ici une nuance est faite entre "haute résolution" et "superrésolution". Les méthodes superrésolution ont un pouvoir de résolution limité par le rapport signal à bruit des sources ; ce sont des estimateurs biaisés. Asymptotiquement les méthodes haute résolution ont un pouvoir de résolution infini et un biais nul. Les premières requièrent typiquement l'inversion de la matrice \underline{R} et les secondes sa décomposition en éléments propres.

La méthode du maximum de vraisemblance est optimale dans le sens qu'elle est susceptible d'atteindre les bornes de Cramer-Rao. Elle se ramène à la minimisation d'une fonctionnelle dépendant malheureusement d'un grand nombre de paramètres, ce qui la rend prohibitive en volume de calculs. Les algorithmes proposés par la littérature visent souvent à la remplacer par une fonctionnelle plus simple ou à l'approximer (approche connexioniste, méthode des projections alternées).

Le maximum d'entropie bidimensionnel n'est plus équivalent, comme en dimension un, à une modélisation autorégressive. Bien qu'il soit bien formalisé au niveau théorique, sa mise en œuvre est lourde. A vu de simulations effectuées par quelques auteurs, il n'atteint que de piètres performances.

Les modélisations autorégressives bidimensionnelles posent quelques problèmes de fond : du point de vue de la prédiction linéaire, pour que l'erreur de prédiction soit un bruit blanc, il faut étendre au plan la notion de causalité. On montre que les "passés" d'un point du plan qui rendent le bruit de prédiction blanc sont des demi-plans asymétriques infinis. Du point de vue maintenant des représentations ARMA, les équations de Yule-Walker ne définissent plus nécessairement, comme en dimension un, un filtre stable. D'un point de vue pratique les auteurs s'en tiennent aux modélisations autorégressives finies quart de plan (pour lesquelles la causalité est perdue). Elles possèdent un défaut structurel matérialisé par l'existence de directions privilégiées. On peut l'atténuer en effectuant la moyenne d'estimations obtenues sur des quarts de plan différents.

Le filtrage spatial adaptatif consiste à former numériquement des voies (FFC) en optimisant certains critères, comme la réjection des signaux provenant de toutes les directions sans altérer les signaux provenant de la direction visée. En exploitant les coefficients des filtres ainsi calculés, on obtient une estimation superrésolution des directions d'arrivée des sources (exemple : méthode de Capon). Ces méthodes reposent sur l'inversion de \underline{R} , sans qu'il soit nécessaire de faire des hypothèses sur les corrélations mutuelles de cibles. Néanmoins leurs performances se dégradent lorsque des sources sont cohérentes.

Toutes les méthodes véritablement haute résolution exploitent la structure de la décomposition propre de \underline{R} . L'espace vectoriel des directions (cest-à-dire de l'ensemble des vecteurs colonnes de \underline{D} possibles) est scindé en deux sous espaces orthogonaux : l'un appelé "espace signal" contient les vecteurs des directions d'arrivée des signaux sources ; l'autre est appelé espace bruit. La projection du modèle de vecteur directionnel sur l'espace bruit s'annule lorsque ce vecteur coïncide avec une direction d'arrivée des échos sources. C'est là le principe d'une grande famille de méthode, dont la plus populaire est le goniomètre MUSIC.

Les méthodes du type "modèle d'état" exploitent les mêmes propriétés. Ils ont la particularité de fournir une solution directe, c'est-à-dire sans minimisation de fonctionnelle. Malheureusement ils ne s'appliquent que dans des contextes monodimensionnels. Nous rangeons ESPRIT et TAM dans cette famille.

Les estimateurs haute résolution souffrent tous d'une faiblesse : ils sont pris en défaut en présence de fronts d'ondes cohérents ou même seulement très fortement corrélés, comme des trajets multiples d'échos dus à une même cible. La parade consiste à

FIGURE 1

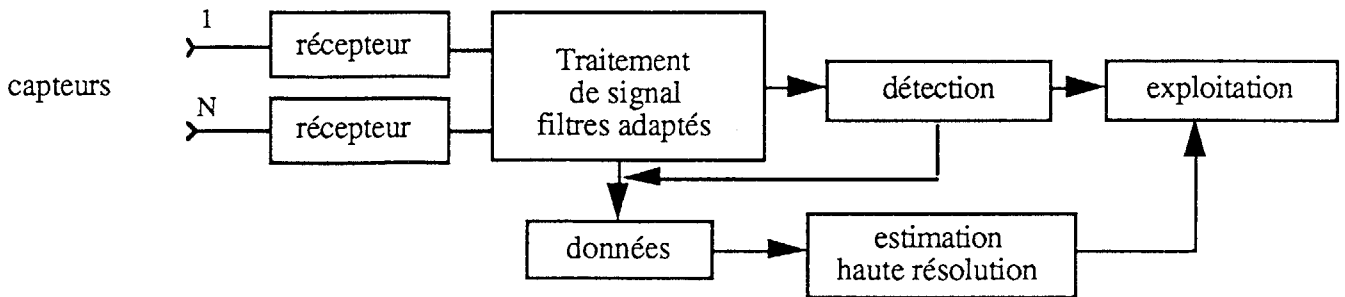
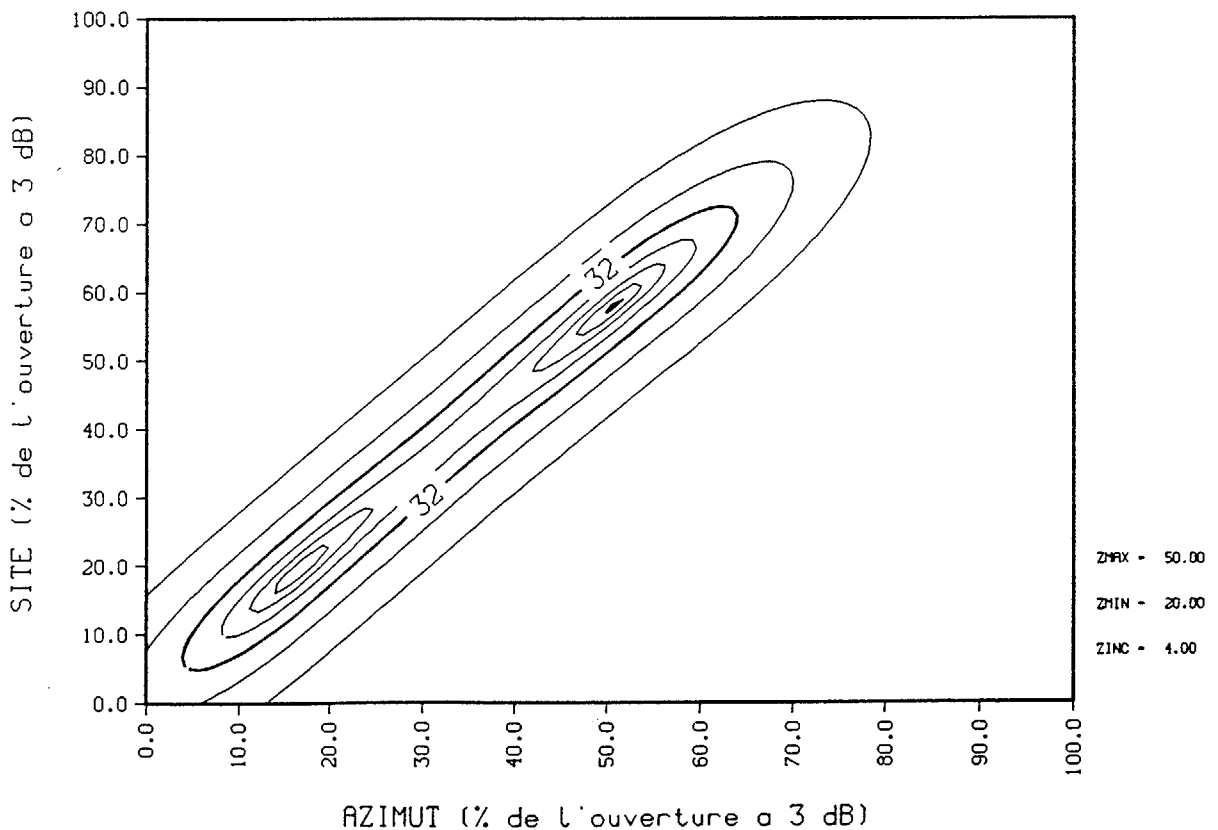


FIGURE 2 : Estimation conjointe d'un angle et de la fréquence Doppler

Remarques	Existence de prétraitements de décorrélation des sources	Pas d'hypothèse sur la corrélation des sources	Hypothèse : sources non cohérentes deux à deux
Forme du réseau			
Voies somme et différences, réseau quelconque dans l'espace, T_r quelconque	NON	[a], [b], [d]	[e]
Voies somme et différences, réseau quelconque dans l'espace, T_r constante	OUI (axe Doppler)	[a], [b], [d]	[e]
Réseau linéaire uniforme et $T_r =$ constante	OUI (spatio-Doppler)	[a], [b], [c], [d]	[e] variante de [c]

FIGURE 3 : PSEUDOSPECTRE SPATIAL SITE-AZIMUT deux cibles corrélées à 99%.





estimer la matrice des corrélations intercapteurs par des lissages spatio-temporels ou spatio-Doppler réalisés dans le cas bidimensionnel par blocs le long de la diagonale principale de \underline{R} et de même dans chaque bloc, pour décorréler algébriquement les sources sans modifier la structure des directions d'arrivée des échos [g]. Cela n'est réalisable que pour des réseaux de forme particulière, car en effet, il faut que \underline{R} soit Toeplitz par blocs, eux-mêmes éventuellement Toeplitz. De plus ces lissages améliorent les performances globales des estimateurs pour un nombre fini d'observations (diminution du biais par deux, robustesse face aux défauts de modélisation, accroissement du pouvoir séparateur).

Il faut aussi signaler que tous les estimateurs énumérés ci-dessus, excepté ceux dérivés du filtrage spatial adaptatif, supposent connu a priori le nombre d'échos dont on cherche la position spatiale ou spatio-Doppler. Pour l'estimer il existe quelques tests [h], principalement basés sur l'analyse de la distribution des valeurs propres de la matrice \underline{R} (tests de sphéricité à partir de la mesure de Kullback). Le test d'Akaike en est un exemple. L'évaluation des performances des traitements haute résolution doit donc aussi tenir compte des performances de ces tests, puisqu'au niveau opérationnel on ne connaît généralement pas a priori le nombre de sources.

4. MISE EN ŒUVRE

La première mission du radar est de surveiller l'espace pour détecter la présence de cible. C'est le mode veille ; le traitement se compose des filtres adaptés classiques (cf 1), suivis d'une détection sur seuil. Les méthodes haute résolution visent à fournir des informations supplémentaires quant au contenu d'une cellule de résolution dans laquelle la présence d'objet(s) a été préalablement détectée. Par ailleurs la nature active du système fait dépendre l'estimation haute résolution de la variable distance ρ (cf 2) et interdit de substituer des méthodes haute résolution aux traitements de détection classiques, à cause des puissances de calcul qui seraient requises. Pour ce double motif il faut en radar envisager les traitements haute résolution dans un mode analyse ou un mode poursuite, c'est-à-dire de façon sectorielle et adressée, ce qui est schématisé FIGURE 1. Un ensemble d'observations du signal reçu dans la cellule de résolution classique à analyser est traité : estimation de \underline{R} , calculs algébriques sur \underline{R}^e ou directement sur les données, recherche des minima ou maxima d'une fonctionnelle (appelée pseudospectre).

L'exploration d'une fonctionnelle est obligatoire pour réaliser l'estimation conjointe de deux paramètres, car les seules méthodes fournissant une solution directe opèrent par estimations monodimensionnelles successives (ESPRIT par exemple), ce qui n'est d'une part envisageable que lorsque les variables sont séparables et d'autre part conduit à des performances moindres en termes de pouvoir séparateur par rapport à une estimation bidimensionnelle (en particulier lorsque les échos ont un rapport signal à bruit faible). Comme on n'analyse que le contenu d'une cellule de résolution classique, l'exploration de la fonctionnelle ne s'effectue que dans un secteur rectangulaire de taille la largeur à 3 dB des filtres adaptés dans chaque axe (FFC site, FFC azimut, ou DFT-Doppler). Dans ce secteur la présence d'artéfact n'a pas été observée lors de simulations sur ordinateur.

Selon la nature des voies de réception, tous les estimateurs ne sont pas également envisageables. De plus ils ne présentent pas tous la même robustesse face aux cohérences de sources. Le tableau de la FIGURE 2 établit les méthodes possibles en fonction de la nature de l'antenne du radar, dans le cadre de l'estimation bidimensionnelle angle-Doppler (on transpose ce tableau aisément dans le cadre site-azimut).

5. ILLUSTRATION

Afin d'illustrer les méthodes proposées, un résultat de simulation est présenté ici. Les signaux traités proviennent d'un réseau plan de capteurs contenant d'importants défauts de modélisation. En effet, si (x,y) est la position nominale du centre de phase d'un élément, $(x + dx, y + dy)$ est sa position réelle, où dx et dy suivent une loi gaussienne centrée d'écart type 7 % de l'espacement entre deux capteurs voisins. La FIGURE 3 montre un résultat obtenu à l'aide de l'estimateur MUSIC dans le cadre bidimensionnel site-azimut. Les axes de coordonnées X et Y sont gradués de 0 % à 100 % de la largeur à 3 dB du diagramme du réseau dans chaque axe. Deux échos de faible puissance et corrélés à 99 % sont présents et correspondent aux deux pics apparents sur le pseudospectre. Le nombre d'observations intégrées est très faible (16 récurrences disponibles) et correspond à un séquençement radar typique.

6. CONCLUSION

Le radar actif apparaît comme un nouveau cadre d'application de méthodes bidimensionnelles d'estimation à haute résolution. Celles-ci constituent des solutions efficaces pour la distinction de cibles confondues par les filtrages classiques de détection, aussi bien dans un plan site-azimut que dans un plan angle-Doppler, dans des proportions importantes. En effet, malgré l'horizon d'observation très court dont on dispose usuellement en traitement radar, la résolution obtenue est de l'ordre de dix fois meilleure qu'avec les traitements classiques.

7. BIBLIOGRAPHIE

- [a] Ziskind, Vax : "Maximum Likelihood localization of multiple sources by alternating projection". (IEEE transactions on AP, janvier 88)
- [b] Lang, Mc Lellan : "Multidimensionnal MEM spectral estimation" (IEEE transactions on ASSP, décembre 1982)
- [c] Loubaton : "champs stationnaires au sens large sur Z^2 : propriétés structurelles et modèles paramétriques" (Traitement du signal, vol6, N° 4, 1989)
- [d] Capon : "high resolution frequency-wavenumber spectrum analysis" (proc. of IEEE, août 1989)
- [e] Bienvenu, Kopp : "optimality of high resolution array processing using the eigen system approach" (IEEE transactions on ASSP, octobre 1983)
- [f] Le Cadre, Ravazzola : "Représentation des sorties de capteurs par un système linéaire, application au traitement d'antenne" (Traitement du signal, vol 6, N° 1, 1989)
- [g] Yeh, Chen "estimating two-dimensional angles of arrival in coherent source environment" (IEEE transactions on ASSP, janvier 1989)
- [h] Tas, Latombe : "détection multiple par les valeurs propres de la matrice spectrale" (Traitement du signal, vol3, N° 2, 1986).

8. REMERCIEMENTS

Les résultats présentés dans cet exposé ont fait l'objet d'une recherche financée par la Direction des Recherches, Etudes et Techniques (Délégation Générale pour l'Armement).