

Résultats expérimentaux d'une méthode de goniométrie opérant sur un réseau hétérogène de capteurs

ERHEL Yvon¹, MARIE François², BERTEL Louis²

¹Centre de Recherches des Ecoles de Coetquidan
56381 GUER-Cedex

²L.S.R./L.R. UPRES A CNRS 6075
Université de Rennes I Campus de Beaulieu
35042 RENNES-Cedex

yvon_erhel@mailhost.esm-stcyr.terre.defense.gouv.fr,
fmarie@univ-rennes1.fr, bertel@univ-rennes1.fr

Résumé - Ce papier montre comment une méthode classique de goniométrie (algorithme MUSIC) peut être mise en œuvre sur un réseau hétérogène de capteurs dont les réponses spatiales (gains) sont supposées connues a priori. Certaines perspectives d'application dans le domaine radio sont présentées. Ainsi, on exploite le fait qu'un tel réseau est sensible à la polarisation et on utilise cette grandeur pour discriminer les signaux incidents. On envisage également de remplacer la diversité d'espace par la diversité des réponses spatiales ce qui conduit à la réalisation d'un radiogoniomètre à antennes colocalisées. Enfin sont présentés des résultats expérimentaux dans la gamme H.F. (3-30 MHz) dont les premières mesures réalisées sur le prototype du radiogoniomètre à antennes colocalisées.

Abstract – This paper shows how to derive a classical method of direction finding (MUSIC algorithm) as the array of sensors is heterogeneous, assuming however that their spatial responses (gain) are well known. Some possible applications are described in a context of radio waves. Thus, the array being polarization sensitive, the separation of incident signals can be more efficient. Additionally, it is investigated to replace the space diversity by the diversity in the spatial responses of the sensors, what induces the design of a compact radio direction finder set up with collocated antennas. At last, some experimental results are listed in the field of H.F. (3-30 MHz) radio direction finding, among which the first D.O.A. estimations resorting to the compact direction finder.

1 Introduction

Ce papier aborde le problème de la goniométrie opérant sur un réseau hétérogène, c'est-à-dire constitué de capteurs différents les uns des autres. La motivation d'une telle étude est, par exemple, d'implémenter la fonction localisation sur un champ d'antennes initialement dévolu à la seule interception.

Nous reformulons, dans ce contexte particulier, le modèle linéaire de signal reçu et nous proposons alors un développement original de l'algorithme MUSIC en soulignant la nécessité de normer le steering-vector qui est projeté dans le sous-espace bruit. Les avantages induits par cette méthode sont soulignés.

Enfin, plusieurs types de résultats expérimentaux sont présentés dans le domaine de la radiogoniométrie H.F. (bande 3-30 MHz). Les uns concernent des réseaux hétérogènes de géométries variées et les autres un dispositif original de radiogoniométrie n'utilisant aucune diversité d'espace (ou à antennes colocalisées) dont nous détaillons la structure et présentons les mesures.

2 Algorithme MUSIC et réseau homogène

Un réseau est dit homogène s'il est constitué de capteurs identiques. Les deux paragraphes qui suivent rappellent que la mise en œuvre de l'algorithme MUSIC sera la même, que les capteurs soient isotropes ou directifs

2-1 Réseau de capteurs isotropes

Le modèle linéaire des observations s'exprime généralement par $\underline{X}_i(t) = A\underline{S}(t) + \underline{N}(t)$ où $\underline{X}_i(t)$ note le vecteur des observations sur les NC capteurs, $\underline{S}(t)$ est le vecteur des NS signaux reçus exprimés sur le capteur isotrope (gain unité) de référence, $\underline{N}(t)$ est le vecteur des bruits supposés spatialement blancs, décorrélés des signaux et de même variance. A est la matrice dont les colonnes contiennent les réponses spatiales (ou steering-vectors) $\underline{a}(\theta)$ du réseau à une direction d'arrivée repérée par l'angle θ (où le couple d'angles dans un problème en 3-D) :

$$\underline{a}(\theta) = (e^{j\varphi_1(\theta)}, e^{j\varphi_2(\theta)}, \dots, e^{j\varphi_{NC}(\theta)})^t.$$

Les phases géométriques $\varphi_i(\theta)$ sont mesurées par rapport à une référence qui peut être un des capteurs du réseau ($\varphi_1(\theta) = 0$).

Le principe de l'algorithme est de rechercher les steering-vectors orthogonaux (asymptotiquement) au

sous-espace bruit en minimisant le module de leur projection dans ce sous-espace exprimé par la quantité $\underline{a}(\theta)^T \Pi_b \underline{a}(\theta)$ où Π_b est la matrice de cette projection. Cette opération concerne indifféremment le steering-vector $\underline{a}(\theta)$ ou le steering-vector normé $\underline{b}(\theta) = \frac{\underline{a}(\theta)}{|\underline{a}(\theta)|}$ puisque ces deux vecteurs sont colinéaires : $\underline{a}(\theta) = \sqrt{NC} \underline{b}(\theta)$

2-2 Réseau de capteurs directifs

Les capteurs pondèrent les signaux reçus par une réponse spatiale commune $F(\theta)$ fonction de la direction d'arrivée et prenant des valeurs complexes. Dans ce contexte, deux formalismes équivalents peuvent être utilisés. Le premier reprend les réponses spatiales du réseau mais pondère les composantes $s_k(t)$ du vecteur signal par le gain des antennes pour les directions d'arrivée correspondantes : $\underline{X}_d(t) = A \underline{S}_d(t) + \underline{N}(t)$

avec

$$\underline{S}_d(t) = (F(\theta_1)s_1(t) \dots F(\theta_k)s_k(t) \dots F(\theta_{NS})s_{NS}(t))^t$$

où les angles θ_k repèrent les directions d'arrivée des NS signaux. Ce faisant, les puissances des signaux reçus sont bien sûr modifiées par rapport au cas isotrope ; en revanche, on considère que dans l'hypothèse où des brouilleurs indépendants sont uniformément répartis à l'infini, le bruit reçu reste spatialement blanc.

Un autre formalisme consiste en une pondération des steering-vectors par les gains des capteurs : $\underline{X}_d(t) = A_d \underline{S}(t) + \underline{N}(t)$, écriture dans laquelle on retrouve comme composantes du vecteur $\underline{S}(t)$ les signaux engendrés sur un capteur isotrope de référence $s_k(t)$ et qui contient une matrice des signatures des sources A_d dont les colonnes $\underline{a}_d(\theta_k)$ sont pondérées par les gains des capteurs :

$$\underline{a}_d(\theta_k) = (F(\theta_k)e^{j\phi_1(\theta_k)}, F(\theta_k)e^{j\phi_2(\theta_k)}, \dots, F(\theta_k)e^{j\phi_{NC}(\theta_k)})^t$$

L'algorithme MUSIC exploite la décomposition en éléments propres de la matrice de covariance

$$R_{XX_d} = E[\underline{X}_d(t)\underline{X}_d(t)^T]$$

et plus particulièrement le projecteur dans le sous-espace bruit Π_{b_d} . En se référant au premier formalisme, la fonction de goniométrie se calcule à l'aide de l'expression $\underline{a}(\theta)^T \Pi_{b_d} \underline{a}(\theta)$, norme de la projection du steering-vector $\underline{a}(\theta)$ dans ce sous-espace. La normalisation de $\underline{a}(\theta)$ n'est pas indispensable d'après la remarque du paragraphe précédent. En revanche, si on se réfère au second formalisme, le vecteur source $\underline{a}_d(\theta)$ qui va parcourir la variété d'antenne n'est pas de norme constante. La mesure d'orthogonalité entre ce vecteur et le sous-espace bruit reposant sur la norme de la projection, il est impératif que la fonction de goniométrie soit calculée à partir de vecteurs candidats de même norme et donc du steering-vector normé

même norme et donc du steering-vector normé

$$\underline{b}_d(\theta) = \frac{\underline{a}_d(\theta)}{|\underline{a}_d(\theta)|}$$

Puisque $\underline{a}_d(\theta) = F(\theta)\underline{a}(\theta)$, il découle que

$$\underline{b}_d(\theta) = \frac{F(\theta)}{|F(\theta)|} \underline{b}(\theta) = \lambda(\theta) \underline{b}(\theta) \text{ où } \lambda \text{ est un scalaire}$$

complexe de module unité.

Finalement, le module de la projection de $\underline{b}_d(\theta)$ dans le sous-espace bruit est à un coefficient NC près le même que le résultat obtenu en projetant $\underline{a}(\theta)$:

$$\begin{aligned} \underline{b}_d(\theta)^T \Pi_{b_d} \underline{b}_d(\theta) &= \lambda^* \sqrt{NC} \underline{a}(\theta)^T \Pi_{b_d} \lambda \sqrt{NC} \underline{a}(\theta) \\ &= NC \underline{a}(\theta)^T \Pi_{b_d} \underline{a}(\theta) \end{aligned}$$

Ce calcul confirme le fait que, pour un réseau de capteurs directifs, la normalisation obligatoire du vecteur-source $\underline{a}_d(\theta)$ dans l'expression de la fonction de goniométrie conduit à opérer avec le vecteur-source $\underline{a}(\theta)$ d'un réseau de senseurs isotropes : pour un réseau homogène, la connaissance de la réponse spatiale $F(\theta)$ n'est pas nécessaire à la recherche des directions d'arrivée.

3 Algorithme MUSIC et réseau hétérogène

Un réseau hétérogène est constitué de capteurs différents les uns des autres dont les réponses spatiales sont notées $F_n(\theta)$, $n = 1, \dots, NC$.

3-1 Formulation du vecteur-source normé

Le modèle linéaire des observations s'exprime cette fois par $\underline{X}_h(t) = A_h \underline{S}(t) + \underline{N}(t)$. La matrice signature des sources A_h a pour colonnes des steering-vectors $\underline{a}_h(\theta_k)$ dont chaque composante est pondérée par une réponse spatiale variable d'un capteur à l'autre :

$$\underline{a}_h(\theta_k) = (F_1(\theta_k)e^{j\phi_1(\theta_k)}, F_2(\theta_k)e^{j\phi_2(\theta_k)}, \dots, F_{NC}(\theta_k)e^{j\phi_{NC}(\theta_k)})^t$$

Là encore, la norme de ce vecteur dépend de l'angle d'arrivée.

La recherche des directions d'arrivée se fait en projetant dans le sous-espace bruit de la matrice de covariance $R_{XX_h} = E[\underline{X}_h(t)\underline{X}_h(t)^T]$ le vecteur-source candidat qui doit être nécessairement normé d'après la remarque du paragraphe II-2. Le calcul s'effectue donc en construisant le vecteur (de norme unité) suivant :

$$\underline{b}_h(\theta) = \frac{1}{\sqrt{\sum_{n=1}^{NC} |F_n(\theta)|^2}} \left(F_1(\theta)e^{j\phi_1(\theta)} \quad \dots \quad F_{NC}(\theta)e^{j\phi_{NC}(\theta)} \right)^t$$

Cette version particulière du calcul du pseudo-spectre suppose bien sûr connues a priori les fonctions $F_n(\theta)$

3-2 Perspectives d'application

Nous avons présenté dans des publications récentes [1,2] les avantages que présente cette application particulière de l'algorithme MUSIC. Ainsi, dans un contexte de réception radioélectrique pour lequel deux types de polarisations orthogonales sont attendues (Ordinaire et eXtraordinaire en bande H.F., circulaire Droite ou Gauche en V.H.F), les capteurs (antennes) sont caractérisés par leurs réponses spatiales aux deux polarisations possibles et deux steering-vectors $\{b_T(\theta)\}$ (un par polarisation) sont calculables pour chaque direction d'arrivée. Dès lors, la méthode conduit au calcul de deux pseudo-spectres $PSSP_T(\theta)$ et permet une séparation des signaux par leur polarisation dans des cas de forte corrélation spatiale, ce qui également exploité par Wong et Zoltowsky [3]. L'autre conséquence que nous avons plus particulièrement développée concerne la réalisation d'un goniomètre (hétérogène) à antennes colocalisées. Les capteurs ayant le même centre de phase, le steering-vector a cette fois pour expression $a(\theta) = (F_1(\theta), F_2(\theta), \dots, F_{NC}(\theta))^t$ et la diversité des réponses spatiales $F_k(\theta)$ remplace la diversité d'espace. Cette technique suppose une bonne maîtrise de la modélisation de ces réponses spatiales et une minimisation des couplages inter capteurs.

4 Résultats expérimentaux

4-1 : Goniométrie 3-D réalisée à partir d'un réseau linéaire hétérogène.

Une recherche des angles d'arrivée (azimut et élévation) dans l'espace est impossible à partir d'un réseau linéaire uniforme (homogène) du fait de l'ambiguïté de la phase géométrique. A titre d'illustration, la figure 1 montre le pseudo-spectre ambigu obtenu expérimentalement sur un tel réseau orienté Est-Ouest sur le plan horizontal (à 8 voies) en goniométrie H.F.

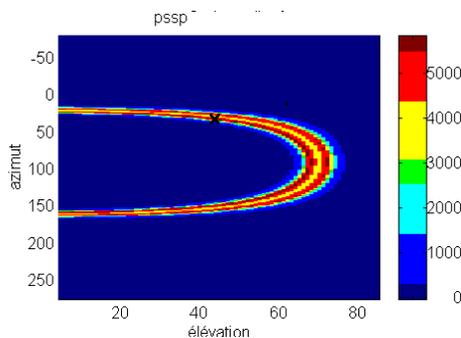


FIG 1 : pseudo-spectre ambigu

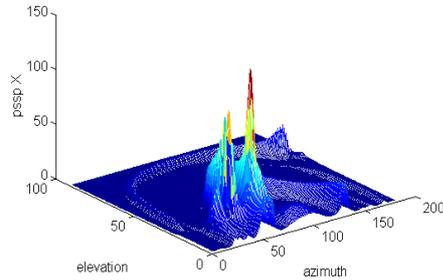


FIG 2 : pseudo-spectre 3-D (Horby)

Le réseau, qui utilise 8 antennes cadres actives est rendu hétérogène par une rotation des antennes de 30° autour d'un axe vertical quand on passe d'une position à la suivante.

Une goniométrie a été réalisée sur un émetteur situé en Suède (Horby, 13.69 MHz). Le traitement est en bande de 3 kHz, utilise 1000 échantillons par spectre ($F_e=40$ kHz) et le rapport S/B est de l'ordre de 30 dB (mesuré à l'analyseur de spectre). Un exemple de pseudo-spectre 3-D expérimental est présenté sur la figure 2.

Il met en évidence deux signaux incidents dont les angles d'arrivée estimés ($\hat{A}z=47^\circ$, $\hat{E}l=18^\circ$ et $\hat{A}z=53^\circ$, $\hat{E}l=10^\circ$) sont en bon accord avec l'azimut géographique (50°) d'une part et les élévations prédites par un logiciel de prévision de propagation ionosphérique d'autre part.

4-2 Goniométrie réalisée à partir d'un "réseau" d'antennes colocalisées

Le capteur est constitué de 7 antennes actives H.F. et associe cadres, dipôles et une antenne de géométrie plus complexe.

Le premier test a concerné la régularité de la matrice des steering-vectors A et pour cela, on a estimé de deux façons différentes le nombre de signaux incidents. Une première méthode (bande étroite) est une analyse spectrale du signal reçu sur une voie (algorithme de Burg); le nombre de pics du spectre (figure 3) donne le nombre de signaux incidents, chacun d'eux étant caractérisé par le décalage Doppler de sa porteuse. La seconde méthode (bande large sur les 7 voies) utilise la distribution des valeurs propres de la matrice de covariance (figure 4). Dans l'exemple choisi, le nombre de sources estimé est de 3 par les 2 méthodes ce qui confirme que la matrice A est de rang plein.

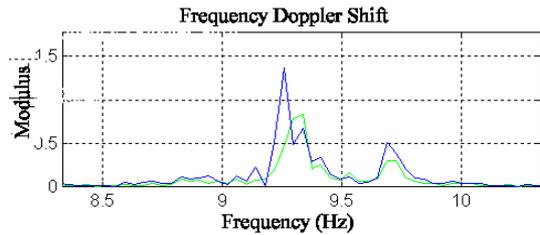


FIG 3 : analyse spectrale

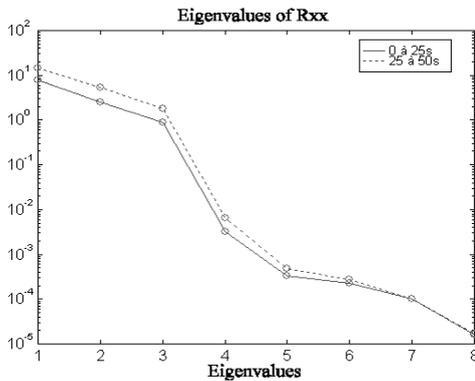


FIG 4 : distribution des valeurs propres

Des goniométries systématiques ont ensuite été réalisées sur divers émetteurs commerciaux éloignés d'environ 1000 km de la station de réception. La figure 5 présente un exemple de résultats expérimentaux à long terme concernant un émetteur situé à Lenk(CH) (azimut géographique 104°). Les azimuts estimés sur un grand nombre de fichiers de données présentent une dispersion acceptable

($\bar{A}_Z = 106.2^\circ$, $\sigma_{A_Z} = 3.3^\circ$) autour de cette valeur de référence compte-tenu de la faible ouverture du dispositif.

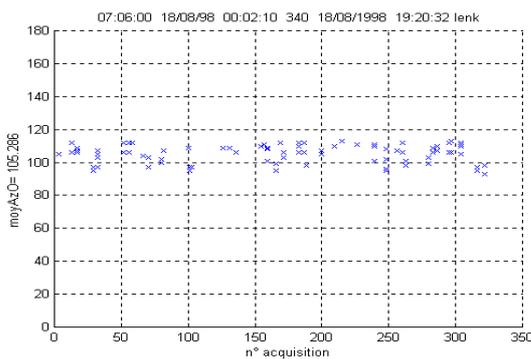


FIG 5 : azimuts estimés par la goniométrie sur antennes colocalisées (émetteur de Lenk)

5 Conclusion

Ce papier présente une méthode originale de radiogoniométrie opérant à partir d'un réseau hétérogène de capteurs et, par extension, à un dispositif ne présentant aucune diversité d'espace. On peut envisager de la coupler avec une technique de filtrage spatial (des moindres carrés par exemple) pour réaliser la séparation des signaux incidents et ainsi augmenter significativement le débit numérique des transmissions H.F.

Références

- [1] Erhel Y., Bertel L. "A method of direction finding operating on an heterogeneous array." Eusipco 98, Rhodes 8-11 Septembre 1998
- [2] Erhel Y., Bertel L., Marie F. "A method of direction finding operating on an array of collocated antennas." I.E.E.E.-A.-P. 98 International Symposium, Atlanta 21-26 Juin 1998.
- [3] Wong K.T., Zoltowski M.D. : "Diversely polarized Root-MUSIC for Azimuth-Elevation angle of Arrival Estimation." I.E.E.E. A.-P. 96 International Symposium, Baltimore (MD) 21-26 Juin 1996.