



Amélioration de la résolution angulaire d'un radar FMCW panoramique

R.Fouettilloux^{1,2}, O.Lacrouts¹, G.Motyl¹, L.Ferro-Famil², S.Méric²

¹DIADES MARINE, 70 rue Jean Doucet Pôle d'activité du Grand Girac 16470 SAINT MICHEL

²Université de RENNES 1, IETR Campus de Beaulieu 263 avenue du Général Leclerc 35042 Rennes CEDEX

Mots-clés: RADAR, technologie FMCW, déconvolution, problème inverse, Tikhonov, Richardson-Lucy, ISRA, BBSMA (Blind BeamSpace Music Algorithm) . . .

Keywords: RADAR, FMCW technology, deconvolution, inverse problem, Tikhonov, Richardson-Lucy, ISRA, BBSMA (Blind BeamSpace Music Algorithm) . . .

Résumé:

Pour des capteurs d'imagerie, la résolution angulaire θ est limitée par la dimension d'ouverture D de l'antenne à la valeur $\theta \propto \lambda/D$ où λ est la longueur d'onde. En effet, l'image radar acquise étant le résultat de la convolution de la densité de réflectivité de la scène radar par le diagramme de rayonnement de l'antenne ayant des dimensions finies devient alors floue. Néanmoins, la résolution de cette image peut être améliorée en déconvoluant celle-ci par le diagramme d'antenne. Cette déconvolution, ou filtrage inverse, est intrinsèquement numériquement instable. Notre contribution consiste à adapter des méthodes pour obtenir des résultats stables présentant une résolution et discrimination angulaire améliorées. Dans la version étendue, des exemples de simulation radar en onde centimétrique ainsi que des mesures de terrain sont présentés. Pour terminer un nouvel algorithme BBSMA (Blind BeamSpace Music Algorithm) sera démontré.

Abstract: For imaging sensors, the angular resolution θ is limited by the aperture dimension D of the antenna to the value $\theta \propto \lambda/D$ where λ is the wavelength. Indeed, the acquired radar image being the result of the convolution of the reflectivity density of the radar scene by the radiation pattern of the antenna having finite dimensions then becomes fuzzy. Nevertheless, the resolution of this image can be improved by deconvoluting it by the antenna pattern. This deconvolution, or inverse filtering, is intrinsically numerically unstable. Our contribution is to adapt methods to obtain stable results with improved resolution and angular discrimination. Examples of centimeter wave radar simulation as well as field measurements are presented. To complete a new BBSMA (Blind BeamSpace Music Algorithm) algorithm will be demonstrated.

1 Introduction

Cet article se place dans un contexte de conception d'un radar à onde continue modulée en fréquence FMCW pour améliorer la détection, la discrimination et le pistage de petites cibles dans le fouillis de mer. Les portées instrumentées de ces types de radar sont en général de l'ordre 48 NM (89 Km). Ce radar devra posséder une antenne dont son angle d'ouverture devra être inférieur à 2 degrés et devra être capable de discriminer angulairement deux bouées séparées de 2.5 degrés à 1 NM (radar certifiable IMO). Pour respecter ces critères tout en gardant un capteur compact et léger, une solution pour améliorer la résolution et la discrimination angulaire de ce radar par post-traitement sur l'image radar est présentée. Dans un premier temps, cet article reprend le principe de convolution, puis présente des méthodes de déconvolution.

2 Principe de convolution

L'écho en azimut peut être modélisé, pour une position en distance donnée, comme la convolution de la densité de réflectivité de la scène observée $x(\theta)$, par le diagramme de rayonnement de l'antenne utilisée, $h(\theta)$ (voir fig. 1) et nous avons :

$$y(\theta) = h(\theta) * x(\theta) + n(\theta) \quad (1)$$

où $n(\theta)$ représente le bruit de mesure indépendant de $x(\theta)$ et $y(\theta)$ est le signal mesuré par le radar à la position angulaire θ .

Les données enregistrées à la sortie du système radar sont une version filtrée passe-bas de la scène d'origine en raison de la taille finie de l'antenne [1]. Les données filtrées correspondent aux composantes spectrales hautes

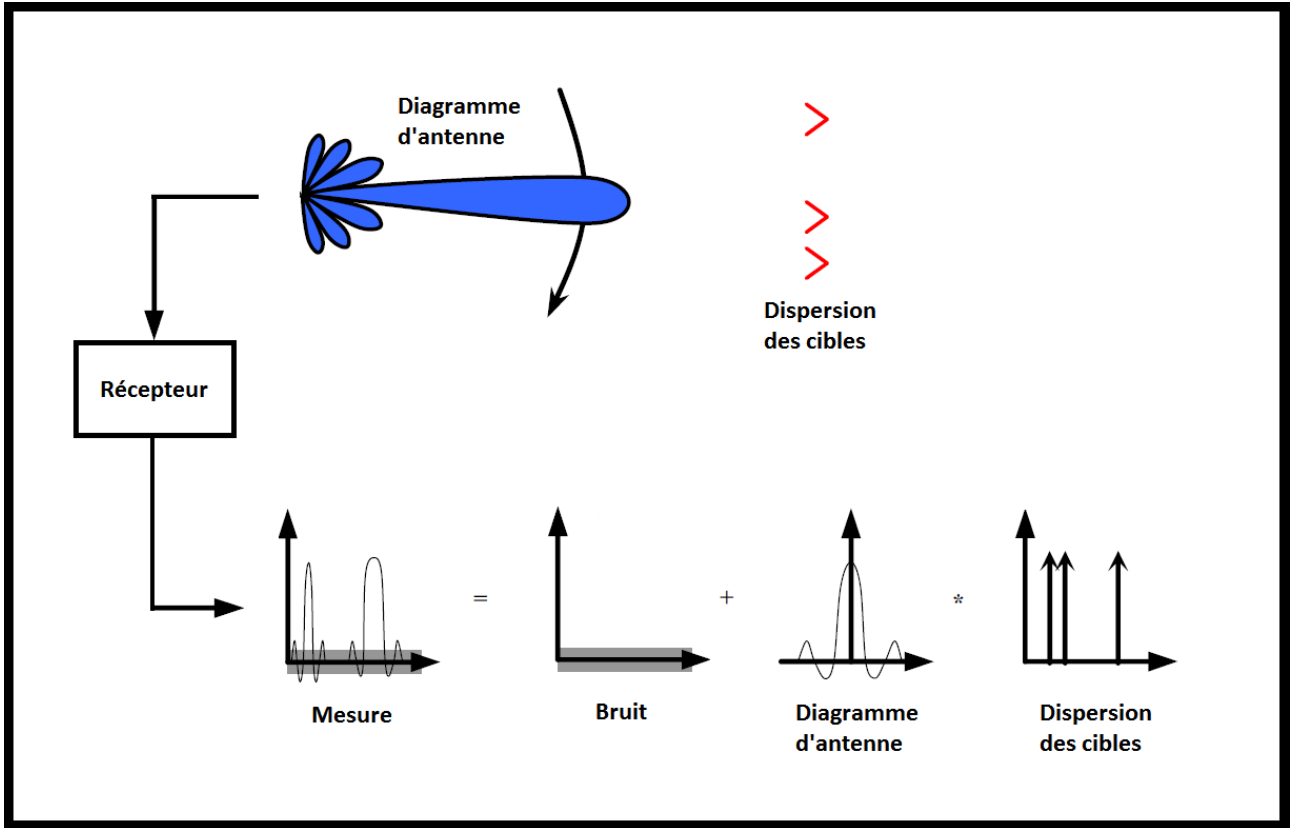


FIGURE 1 – Configuration de mesure.

fréquences ce qui génère un flou sur l'image radar. Une opération de déconvolution peut alors être effectuée pour réduire ce flou et améliorer la résolution.

3 Opération de déconvolution

En l'absence de bruit ($n(\theta) = 0$), l'estimation de x à partir de y peut être effectuée à l'aide d'une simple division dans le domaine spectral. Néanmoins, en présence de bruit, ce problème inverse mal conditionné conduit à une variance de bruit en sortie qui dépend du diagramme de rayonnement et qui peut atteindre des valeurs importantes. La déconvolution par filtrage linéaire peut ainsi être reformulée comme :

$$\hat{x}(\theta) = f(\theta) * y(\theta) \quad (2)$$

Le but ici est de trouver une fonction $f(\theta)$ permettant de donner la meilleure estimation possible $\hat{x}(\theta)$ à partir du signal mesuré $y(\theta)$. On note $[\mathbf{x}]_j$, la réflectivité de la scène à l'angle azimutal θ_j et $[\mathbf{y}]_i$ représente la réponse bruitée de la scène complète, mesurée pour la position du radar θ_i . L'expression du signal mesuré devient :

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n}, \text{ avec } [\mathbf{H}]_{ij} = h(\theta_i - \theta_j) \quad (3)$$

Ce papier présente 2 méthodes de déconvolution permettant de préciser la position et le nombre de cibles radar.

3.1 Méthode de la régularisation de Tikhonov

Une première méthode est la régularisation de Tikhonov [2] qui consiste à régulariser l'approche des moindres carrés et permet de mieux conditionner la technique de déconvolution, en maintenant la variance de $\hat{\mathbf{x}}$ à un faible niveau.

$$J_T(\mathbf{x}) = \|\mathbf{H}\mathbf{x} - \mathbf{y}\|_2 + \lambda\|\mathbf{x}\|_2 \quad (4)$$

et

$$\hat{\mathbf{x}}_T = (\mathbf{H}^T\mathbf{H} + \lambda I)^{-1}\mathbf{H}^T\mathbf{y} \quad (5)$$

avec \mathbf{H}^T , la transposée de \mathbf{H} . Néanmoins la régularisation de Tikhonov présente un paramètre de régularisation λ dont le réglage efficace requiert un fort rapport signal à bruit. Un certain nombre de méthodes permettent d'estimer automatiquement la valeur que doit prendre ce paramètre pour réaliser le meilleur compromis entre le niveau du bruit et la fidélité des données (méthode L curves) [3].

3.2 Méthode de Richardson-Lucy

La méthode de Richardson-Lucy est une approche de super-résolution estimant \mathbf{x} selon le principe du maximum de vraisemblance basée sur la règle de Bayes. Il repose sur le principe de l'estimateur MAP (maximum à posteriori) qui résout le problème suivant [4] :

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \max_{\mathbf{x}} p(\mathbf{x}|\mathbf{y}) = \arg \max_{\mathbf{x}} p(\mathbf{y}|\mathbf{x})p(\mathbf{x}) \quad (6)$$

où $p(\mathbf{x})$ et $p(\mathbf{x}|\mathbf{y})$ représentent la densité de probabilité a priori et a posteriori de la réflectivité des cibles et $p(\mathbf{y}|\mathbf{x})$ est la fonction de vraisemblance associée.

L'algorithme Richardson-Lucy est basé sur l'hypothèse que le bruit de mesure est indépendant dans les cellules observées et obéit à la distribution de Poisson. La distribution a priori des réflectivités étant inconnue, on la suppose uniforme et l'on remplace l'estimation selon le maximum a posteriori (MAP) de (6) par une approche utilisant le maximum de vraisemblance (ML) :

$$\hat{\mathbf{x}} = \arg \max_{\mathbf{x}} p(\mathbf{x}|\mathbf{y}) = \arg \max_{\mathbf{x}} p(\mathbf{y}|\mathbf{x}) \quad (7)$$

Or :

$$p(y/x) = \prod_{i=1}^M \frac{(Hx)_i^{y_i} * e^{-(Hx)_i}}{y_i!} \quad (8)$$

où i est la cellule en azimuth et avec $(Hx)_i = \sum_{j=1}^M h_{ij}x_j$

Le critère devient donc :

$$\begin{aligned} J_{RL}(x) &= -\log p(y/x) \\ &= \sum_{i=1}^M (Hx)_i + \log(y_i!) - y_i \log[(Hx)_i] \end{aligned} \quad (9)$$

La déconvolution, ou optimisation de (7), revient donc à déterminer $\hat{\mathbf{x}}$, qui minimise la log-vraisemblance $J_{RL}(\mathbf{x}) = -\log p(\mathbf{y}|\mathbf{x})$. L'annulation du gradient de $J_{RL}(\mathbf{x})$ conduit à une expression récursive que l'on résout simplement de manière itérative :

$$\hat{\mathbf{x}}_{i+1} = \text{diag}(\mathbf{H}^T \text{diag}^{-1}(\mathbf{H}\hat{\mathbf{x}}_i)\mathbf{y}) \hat{\mathbf{x}}_i \quad (10)$$

4 Résultats de simulation

Les paramètres de la scène et du radar simulé sont répertoriés dans le tableau 1. Ces 2 méthodes sont testées sur

Paramètres du radar et de la scène observée	
vitesse de rotation du radar	120 degrés/s (20 t/min)
PRF	2000Hz
Nombre d'antennes (réseau)	50 ($\theta_{-3dB} = 2$ degrés)
Largeur angulaire des cibles	0.3 degrés
Scène observée	+/-12 degrés
Rapport signal à bruit	25 dB

TABLE 1 – Paramètres du radar et scène

une scène radar simulée pour déterminer deux critères : la résolution et la discrimination angulaire. Deux cibles espacées 1.26 degrés (fig. 2) ainsi qu'une troisième cible seule forment cette scène. La courbe bleu représente la scène radar idéale et la courbe verte représente le signal de sortie du radar. Les courbes rouge et jaune sont les signaux de sortie après application des algorithmes.

Ces résultats montrent qu'il est totalement impossible de discriminer deux cibles sans déconvolution (courbe verte). La méthode de la régularisation de Tikhonov permet de discriminer les deux cibles seulement avec un paramètre de régularisation faible. La méthode R-L permet de mieux discriminer les deux cibles et un ratio de super-résolution de $2/1.26 = 1.59$ est obtenu.

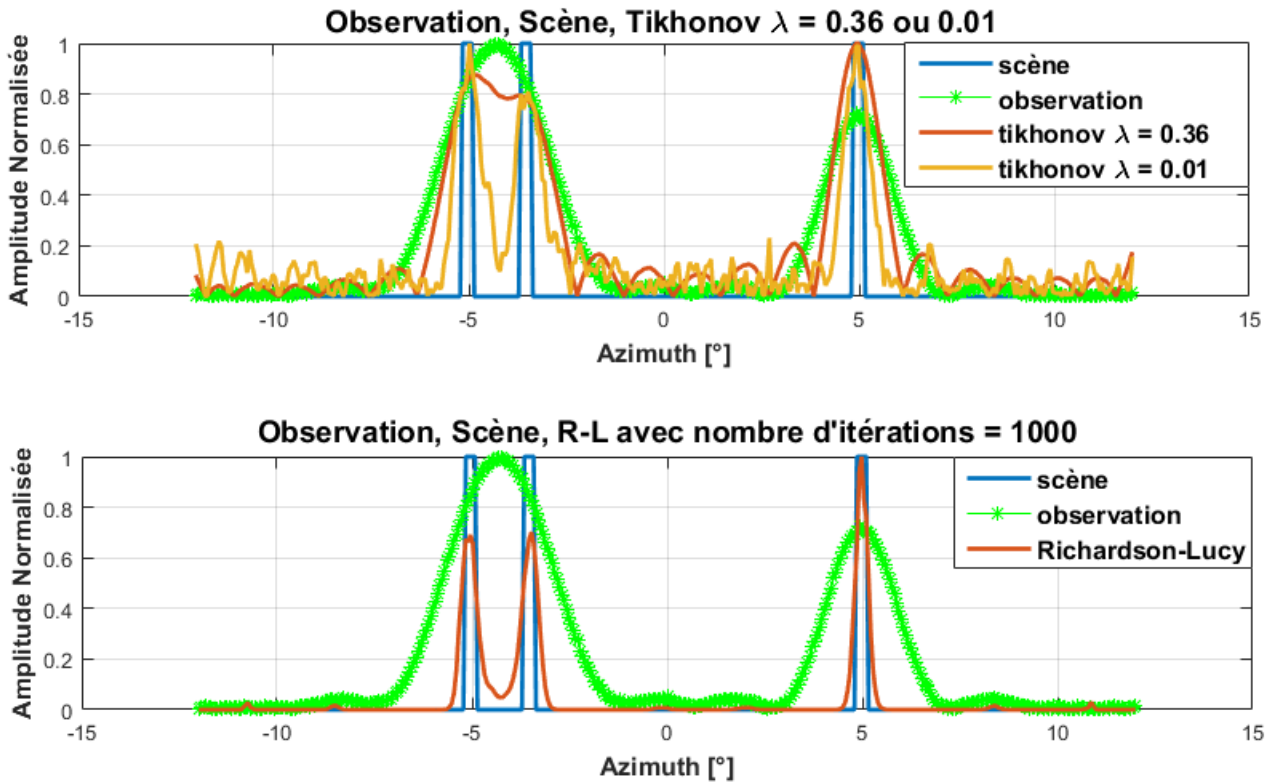


FIGURE 2 – Cibles espacées de 1.26 degrés

5 Conclusion

Dans la partie étendue, il serait intéressant de présenter un nouvel algorithme nommé BBSMA qui permet, sans connaître le diagramme de rayonnement d'un réseau d'antennes panoramique et en travaillant dans le domaine doppler, d'appliquer la décomposition en espace signal et bruit d'une scène radar Music). Cet algorithme est plus rapide à exécuter que la méthode R-L.

6 Remerciements

Les auteurs tiennent à remercier la DGA qui participe à ce projet par l'intermédiaire du financement de la thèse CIFRE Défense numéro 009/2015/DGA.

7 Références

- [1] M. A. Richards, "Iterative noncoherent angular superresolution [radar]," in *Radar Conference, 1988., Proceedings of the 1988 IEEE National*. IEEE, 1988, pp. 100–105.
- [2] A. N. Tikhonov, "Regularization of incorrectly posed problems." SOVIET MATHEMATICS DOKLADY, 1963.
- [3] P. C. Hansen and D. P. O Leary, "The use of the l-curve in the regularization of discrete ill-posed problems," *SIAM Journal on Scientific Computing*, vol. 14, no. 6, pp. 1487–1503, 1993.
- [4] Y. Zha, Y. Huang, Z. Sun, Y. Wang, and J. Yang, "Bayesian deconvolution for angular super-resolution in forward-looking scanning radar," *Sensors*, vol. 15, no. 3, pp. 6924–6946, 2015.