



**HAL**  
open science

## Amélioration de la résolution angulaire d'un radar FMCW panoramique

R Fouettilloux, O Lacrouts, G Motyl, Laurent Ferro-Famil, S. Meric

► **To cite this version:**

R Fouettilloux, O Lacrouts, G Motyl, Laurent Ferro-Famil, S. Meric. Amélioration de la résolution angulaire d'un radar FMCW panoramique. Journées Nationales Micro-ondes, May 2017, Saint-Malo, France. hal-02478182

**HAL Id: hal-02478182**

**<https://hal.science/hal-02478182v1>**

Submitted on 13 Feb 2020

**HAL** is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

## Amélioration de la résolution angulaire d'un radar FMCW panoramique

R. Fouettilloux<sup>1,2</sup>, O. Lacrouts<sup>1</sup>, G. Motyl<sup>1</sup>, L. Ferro-Famil<sup>2</sup>, S. Méric<sup>2</sup>

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

<sup>2</sup>Université de RENNES 1, IETR Campus de Beaulieu 263 avenue du Général Leclerc 35042 Rennes CEDEX  
romain.fouettilloux@diadesmarine.com

**Résumé** — Pour des capteurs d'imagerie, la résolution angulaire  $\theta$  est limitée par la dimension d'ouverture  $D$  de l'antenne à la valeur  $\theta \propto \lambda/D$  où  $\lambda$  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 augmentée. Des exemples de simulation radar en onde centimétrique ainsi que des mesures de terrain sont présentés.

### 1. Introduction

Cet article se place dans un contexte de conception d'un radar à onde continue modulée en fréquence pour améliorer la détection et le pistage de petites cibles dans le fouillis de mer. Les portées instrumentées de ces types de radar sont en général de 48NM (89km). Ce radar devra posséder une antenne dont son angle d'ouverture devra être inférieur à  $2^\circ$  et devra être capable de discriminer angulairement deux bouées séparées de  $2.5^\circ$  à 1NM (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  $\theta$ . Les données enregistrées à la sortie du système radar sont une version filtrée passe-bas de la scène d'origine

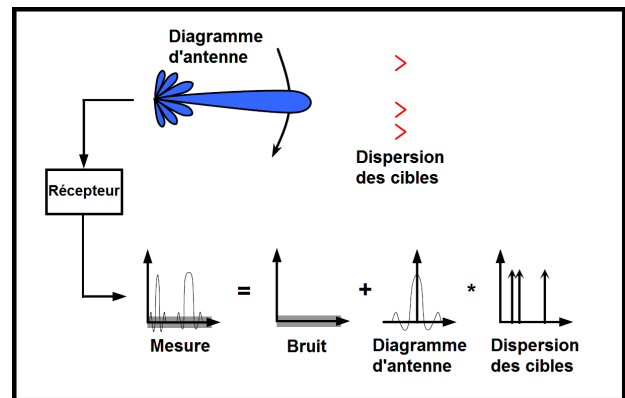


Figure 1. Configuration de mesure.

en raison de la taille finie de l'antenne [1]. Les données filtrées correspondent aux composantes spectrales hautes 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 ( $n(\theta) = 0$ ), alors l'estimation de  $x$  à partir de  $y$  peut être effectuée à l'aide d'une simple division dans le domaine spectral. Néanmoins, ce problème est mal conditionné car le filtre inverse conduit à une variance de bruit en sortie qui dépend du diagramme de rayonnement et qui peut atteindre des valeurs importantes. Le problème de déconvolution par filtrage linéaire peut ainsi être reformulé comme :

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

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  $[x]_j$ , où l'indice  $j = 1, \dots, M$  représente la réflectivité de la scène à l'angle azimutal  $\theta_j$  et  $[y]_i$  représente la réponse bruitée de la scène complète, mesurée pour la position du radar  $\theta_i$ . L'expression du signal mesuré devient :

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

Ce papier présente quelques méthodes de déconvolution permettant de retrouver la position de cibles radar.

### 3.a. 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  $\hat{x}$  à un faible niveau. La matrice Identité ( $I$ ) est choisie pour favoriser les solutions dont les normes sont petites.

$$J_{MCP}(x) = \|Hx - y\|_2^2 + \lambda \|Ix\|_2^2 \quad (4)$$

et

$$\widehat{x}_{MCP} = (H^t H + \lambda I)^{-1} H^t y \quad (5)$$

Néanmoins la régularisation de Tikhonov présente un paramètre de régularisation  $\lambda$  qui nécessite un fort rapport signal à bruit pour que cette méthode soit facilement exploitable.

### 3.b. Méthode de Richardson-Lucy

La méthode de Richardson-Lucy est une approche de super-résolution utilisant le 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 [3] :

$$\hat{x} = \arg \max_x p(x/y) = \arg \max_x p(y/x)p(x) \quad (6)$$

où  $p(x/y)$  est la densité de probabilité a posteriori ;  $p(y/x)$  est la fonction de vraisemblance et  $p(x)$  est la connaissance à priori des cibles.

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.

En outre, on suppose que le coefficient de diffusion de la cible obéit à la répartition uniforme qui rend l'estimateur du MAP égale à l'estimateur ML :

$$\begin{aligned} \hat{x} &= \arg \max_x p(x/y) = \arg \max_x p(y/x) \\ &= \arg \min_x -\ln p(y/x) \end{aligned} \quad (7)$$

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 :

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

On aboutit à l'équation récurrente suivante en annulant le gradient de  $J_{RL}(x)$ , et en adoptant une méthode itérative multiplicative :

$$\widehat{x}_{i+1} = \widehat{x}_i \cdot [H^t (\frac{y}{H\widehat{x}_i})] \quad (10)$$

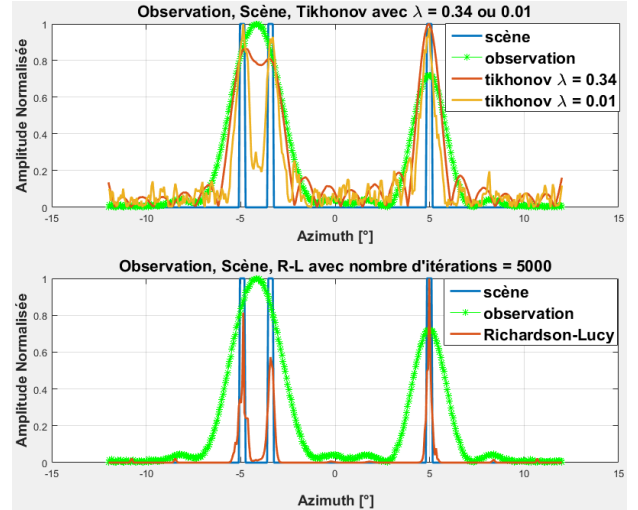


Figure 2. Cibles espacées de 1.26°

### 3.c. Méthode ISRA

La méthode ISRA (Image Space Reconstruction Algorithm) est quand à elle une méthode itérative multiplicative, qui présente l'avantage d'incorporer de manière implicite une contrainte de positivité.

## 4. Résultats de simulation

Les paramètres de la scène et du radar utilisés sont répertoriés dans le tableau 2. Ces deux méthodes sont testées

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

Tableau 1. Paramètres du radar et scène

pour deux cibles espacées dans le premier cas de 1.26° (fig. 2) et dans le second cas de 0.6° (fig. 3). 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). Nous pouvons observer un ratio de super-résolution de  $2^\circ/1.26^\circ = 1.59$  dans le premier cas et de  $2^\circ/0.6^\circ = 3.33$  dans le deuxième cas (seule la méthode Richardson-Lucy permet de discriminer les deux cibles). De plus, ce ratio de super-resolution pourrait être augmenté dans le cas où le SNR serait supérieur à 25 dB.

## 5. Résultats de mesure

Un démonstrateur de radar FMCW a également été mis en oeuvre dans le but de réaliser des mesures d'environnement pour tester ces algorithmes sur de vraies scènes

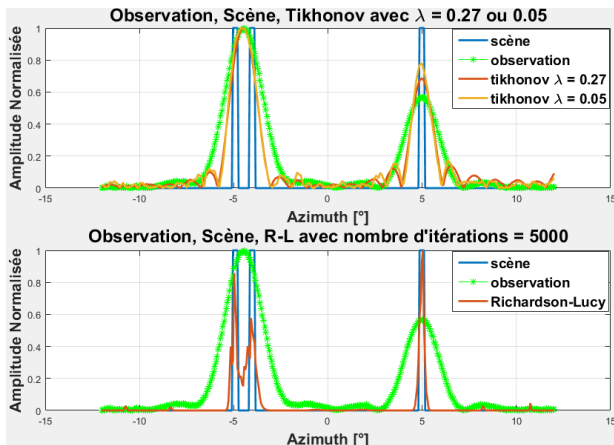


Figure 3. Cibles espacées de 0.6°

radar. Ce radar a l'avantage de posséder une résolution en distance maximale de 1.5m de part sa forte bande d'excursion émise  $\Delta F$  :

$$\delta R = \frac{c}{2 \cdot \Delta F} \quad (11)$$

Les paramètres du radar réalisés sont répertoriés dans le tableau 2.

| Paramètres du radar réalisé             |                  |
|---|------------------|
| Emetteur FMCW linéaire                  |                  |
| Puissance d'émission                    | 2W               |
| Fréquence centrale                      | 9.35GHz          |
| Largeur de bande                        | 100MHz           |
| PRF                                     | 670Hz            |
| Durée d'émission                        | 700 $\mu$ s      |
| Récepteur                               |                  |
| Bande de fréquence intermédiaire        | 12.5MHz          |
| Facteur de bruit LNA                    | 2.2dB            |
| Gain                                    | 100dB            |
| Antennes                                |                  |
| Polarisation                            | horizontale      |
| gain                                    | 28 dB            |
| $\theta_{-3dB}$ azimut/élévation        | 3.4°/9°          |
| Lobes secondaires horizontaux/verticaux | <-20dB/<-18dB    |
| vitesse de rotation du radar            | 144°/s (24t/min) |

Tableau 2. Paramètres du radar et scène

Voici une image de ce démonstrateur radar FMCW :  
La scène radar observée se situe aux coordonnées GPS

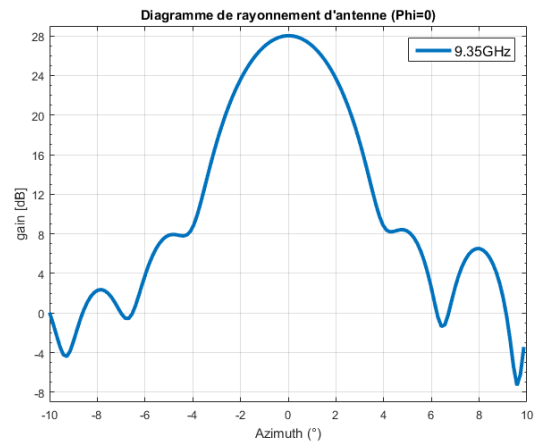


Figure 4. diagramme de rayonnement d'antenne

suivantes : 45°39'07.0"N 1°07'26.5"W. Le phare de Cordouan est visé. Voici cette scène :

## 6. Conclusion

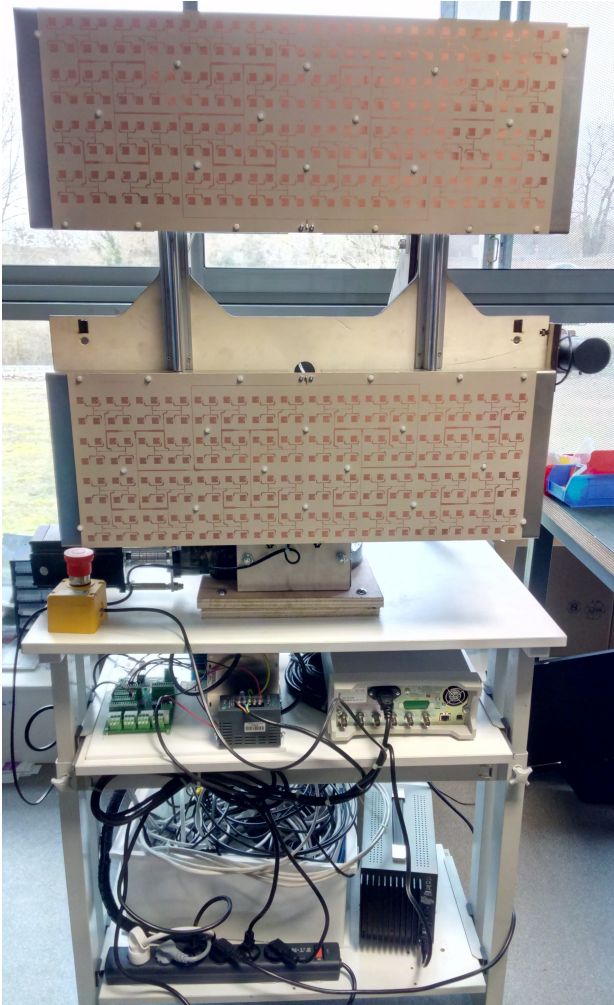
Cet article propose trois méthodes permettant d'améliorer la résolution et la discrimination angulaire d'un radar par post traitement. Un démonstrateur de radar FMCW panoramique utilisant une antenne réseau comportant 256 patches a été réalisé et des études d'algorithmes ont été présentées sur ces scènes réelles. Ce démonstrateur FMCW sera équipé plus tard d'une antenne FSA (Frequency Scanning Antenna) en cours de réalisation pour appliquer d'autres types d'algorithmes. Un passage en traitement cohérent est prévu (Scan MUSIC).

## 7. Remerciements

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

## Références

- [1] M. A. Richards, "Iterative noncoherent angular super-resolution [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] 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.



**Figure 5. Démonstrateur de Radar FMCW**