

Estimation de profils de distance à haute résolution avec un radar ST

Lydi SMAINI¹, Hubert LUCE², Michel CROCHET¹, Fabien GHIO¹

¹Laboratoire de Sondages Electromagnétiques de l'Environnement Terrestre (LSEET)
Université de Toulon et du Var / CNRS, bât. F, BP 132, 83957 La Garde Cedex (France)

²Radio Science Center for Space and Atmosphere, Kyoto university, Gokanoshō, UJI 611-0011, Kyoto (Japan)

Lydi.Smainsi@lseet.univ-tln.fr, luce@kurasc.kyoto-u.ac.jp, Michel.Crochet@lseet.univ-tln.fr,
Fabien.Ghio@lseet.univ-tln.fr

Résumé – La technique de compression d'impulsion par saut de fréquence couplée à des méthodes adaptatives et Haute Résolution, généralement utilisées en traitement d'antennes, permet d'accroître considérablement la résolution des radars atmosphériques Doppler à impulsion fonctionnant dans le bas de la gamme VHF (50 MHz). Ainsi il est possible de construire des profils de distance à Haute Résolution dans le but de détecter des couches d'extension verticale beaucoup plus petite que la résolution initiale classique fixée par la durée des impulsions émises. Nous présentons les différentes méthodes utilisées ainsi que leur application sur les données du mini-radar VHF du LSEET installé à Toulon, France (43.7° N, 5.58° E).

Abstract – *The pulse compression by frequency hopping technique used with adaptive and High-Resolution methods, commonly used in antenna array processing, permits to significantly improve the range resolution of atmospheric pulsed Doppler radars working in low VHF band (50 MHz). Thus, it is possible to obtain High-Resolution range profiles in order to detect layers with vertical extent much smaller than the initial range resolution defined by the transmitted pulse duration. Here, we present the different methods used and their application on the data collected with the VHF mini-radar profiler of LSEET located at Toulon, France (43.7° N, 5.58° E).*

1. Introduction

Les radars atmosphériques Doppler à impulsion, ou radars MST (Mésosphère-Stratosphère-Troposphère), fonctionnant dans la gamme VHF (30-300 MHz) permettent de sonder l'atmosphère en air clair grâce aux variations spatio-temporelles de l'indice de réfraction de l'air [1]. Il est alors possible de mesurer la direction et la vitesse moyenne du vent ainsi qu'un certain nombre de paramètres atmosphériques tels que la turbulence. La résolution radiale minimale de ces instruments, limitée par la durée des impulsions émises, est généralement de 150 mètres. Ainsi ils ne sont pas appropriés pour l'étude de phénomènes ayant des dimensions de l'ordre du mètre tels que les feuillets de température par exemple responsables du renforcement de la puissance rétrodiffusée en vertical.

L'interférométrie fréquentielle utilisant l'intercorrélation de signaux reçus à deux fréquences légèrement différentes fut la première technique proposée pour estimer la position et l'épaisseur d'une couche à l'intérieur des portes radars [2]. Bien qu'elle ait été étudiée, utilisée et implémentée sur plusieurs radars MST, elle présente des limitations dues à ses hypothèses qui supposent la présence d'une couche unique, d'allure gaussienne, à l'intérieur du volume sondé.

Le saut de fréquences est une technique de compression d'impulsion qui consiste à changer de fréquence d'émission, périodiquement, d'une impulsion à l'autre. Elle fut introduite dans le domaine des radars MST dans le but d'accroître leur résolution sans utiliser le codage de phase [3, 4]. De plus, comme en traitement d'antennes où il est possible d'effectuer un balayage angulaire, la diversité fréquentielle permet le balayage de la porte radar afin de décrire l'image de la distribution de la réflectivité le long de la ligne de visée grâce

à une Transformée de Fourier Discrète (TFD) [3 à 6] appelée le profil de distance. La résolution assurée par ce type de traitement est limitée et imposée par la bande du signal émis. Pour s'en affranchir et améliorer le pouvoir de résolution du profil de distance, il est alors possible d'appliquer des méthodes Haute Résolution généralement utilisées en traitement d'antennes.

Le LSEET a implémenté la technique du saut de fréquence sur son mini-radar VHF [7] et une campagne de mesures a été effectuée en novembre 2000 avec quatre fréquences et une bande totale de 1 MHz autour de 45 MHz (fréquence nominale du radar). En plus de la méthode de Capon [8] et de l'algorithme MUSIC [9] déjà utilisés [5, 6], nous avons introduit et appliqué la méthode de Lagunas-Gasull [10] qui est une légère modification de celle de Capon. Les simulations et les résultats sur les données réelles montrent que cette dernière présente de meilleurs résultats que la méthode de Capon en matière de pouvoir de résolution et quantifie l'intensité des structures détectées par l'algorithme MUSIC.

2. Principe

Le saut de fréquence consiste à changer périodiquement de fréquence d'émission-réception d'une impulsion à l'autre. Soient $x_0(t)$, $x_1(t)$, ..., $x_{N-1}(t)$ les signaux reçus correspondant aux fréquences f_0 , f_2 , ..., f_{N-1} avec

$$f_n = f_0 + n \cdot \Delta f \quad (1)$$

où les indices n et N indiquent respectivement l'indice de la fréquence et le nombre de fréquences utilisées. En considérant l'amplitude des signaux reçus identique (le plus grand écart fréquentiel beaucoup plus petit que la fréquence nominale du

radar), il existe uniquement un déphasage linéaire entre ces derniers proportionnel à la distance de la cible et à l'écart fréquentiel. Le principe de base est la sommation de tous les signaux reçus avec une compensation de phase pour sélectionner une altitude d'observation à l'intérieur de la porte radar délimitée par la durée de l'impulsion émise :

$$y(t, z) = \sum_{n=0}^{N-1} x_n(t) \cdot e^{jn2\pi \frac{2\Delta f}{c} z} \quad (2)$$

avec z représentant l'altitude d'observation et c la vitesse de la lumière. Pour simplifier l'écriture, nous allons réécrire l'expression (2) en notation vectorielle :

$$y(t, z) = \mathbf{a}(z)^H \mathbf{x}(t) \quad (3)$$

avec

$$\mathbf{x}(t) = [x_0(t), x_1(t), \dots, x_{N-1}(t)]^T \text{ le vecteur signal,}$$

$$\mathbf{a}(z) = \left[1, e^{-j2\pi \frac{2\Delta f}{c} z}, \dots, e^{-j2\pi(N-1) \frac{2\Delta f}{c} z} \right]^T \text{ le vecteur d'exploration.}$$

Les indices H et T signifient respectivement la transposition hermitienne et la transposition. A partir de la relation (3), il est possible d'obtenir la distribution de puissance en fonction de l'altitude appelée le profil de distance :

$$P(z) = E\{y(t, z) \cdot y^*(t, z)\} = \mathbf{a}(z)^H \mathbf{R} \mathbf{a}(z), \quad (4)$$

avec $\mathbf{R} = E\{\mathbf{x} \cdot \mathbf{x}^H\}$ représentant la matrice de covariance ($N \times N$) des N signaux reçus aux différentes fréquences et le signe $*$ représentant la conjugaison. Ainsi le profil de distance « classique », calculé par la relation (4), est obtenu grâce une Transformation de Fourier Discrète dont le pouvoir de résolution est matériellement limité par la bande totale utilisée :

$$\text{Résolution}_{\text{Fourier}} = \frac{c}{2N\Delta f}. \quad (5)$$

Fonctionnant dans le bas de la gamme VHF, les radars MST ont des bandes fréquentielles réduites et le pouvoir de résolution obtenu par la méthode de Fourier n'améliore pas leur résolution initiale. Par exemple, pour 4 fréquences espacées de 250 kHz (configuration utilisée pendant la campagne de mesures) le pouvoir de résolution obtenu est de 150 mètres qui est la résolution classique du radar pour des impulsions de 1 μ s. Un autre choix important concerne l'espacement minimal, Δf , entre les fréquences. Ce dernier doit être choisi de telle sorte à éviter toute ambiguïté pendant le balayage de la porte radar :

$$\Delta f \leq \frac{1}{\tau}, \quad (6)$$

avec τ qui est la durée des impulsions émises.

Il est clair que le pouvoir de résolution obtenu par Transformée de Fourier n'est pas suffisant pour la détection de couches d'extension verticale plus petite que la largeur des

portes radar. Pour améliorer la résolution des profils de distance, il est alors possible d'appliquer des techniques de traitement du signal appelées méthodes adaptatives ou Haute Résolution généralement utilisées en traitement d'antennes.

3. Profils de distance à Haute Résolution

Nous allons brièvement présenter les différentes méthodes utilisées ainsi que la comparaison de leurs performances concernant le pouvoir de résolution.

3.1. Méthode de Capon

Contrairement au traitement par la méthode de Fourier ou le filtre est identique quelle que soit l'altitude d'observation, la méthode de Capon [8] va l'adapter pour chaque altitude en fixant un gain unitaire pour l'altitude d'observation tout en minimisant la contribution de la puissance reçue aux autres altitudes. C'est une méthode adaptative. Ainsi l'estimateur de Capon du profil de distance s'exprime :

$$P_{\text{Capon}}(z) = \frac{1}{\mathbf{a}(z)^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}(z)} \quad (7)$$

Une différence essentielle avec Fourier : le pouvoir de résolution dépend du rapport signal à bruit.

3.2. Méthode de Lagunas-Gasull

La méthode de Lagunas-Gasull [10], qui est une légère modification de celle de Capon, est aussi une méthode adaptative car elle calcule le filtre de manière identique. La différence est qu'elle normalise la puissance, obtenue par la relation (7), par la bande effective du filtre pour être homogène à une densité spectrale de puissance et non pas une puissance. On obtient alors pour l'estimation du profil de distance :

$$P_{\text{Lag}}(z) = \frac{\mathbf{a}(z)^H \mathbf{R}^{-1} \mathbf{a}(z)}{\mathbf{a}(z)^H \mathbf{R}^{-2} \mathbf{a}(z)} \quad (8)$$

La méthode de Lagunas-Gasull présente un meilleur pouvoir de résolution et une meilleure estimation du bruit blanc que celle de Capon.

3.3. Algorithme MUSIC

L'algorithme MUSIC (Multiple Signal Classification) [9] est basé sur la décomposition de la matrice de covariance \mathbf{R} [11] en deux sous-espaces orthogonaux : les sous-espaces signal et bruit. Ainsi pour trouver la position de cibles discrètes, l'algorithme MUSIC calcule l'inverse du carré de la norme de la projection d'un vecteur d'exploration, considéré comme l'altitude d'arrivée d'une source, sur l'espace bruit :

$$P_{\text{MUSIC}}(z) = \frac{1}{\mathbf{a}(z)^H \mathbf{V}_B \mathbf{V}_B^H \mathbf{a}(z)}, \quad (9)$$

où \mathbf{V}_B est la matrice dont les colonnes correspondent aux vecteurs propres de l'espace bruit. Si la matrice de covariance est estimée sans erreur, alors $P_{\text{MUSIC}}(z)$ est infini lorsque z est l'altitude d'une source (une couche très fine pour notre application). En réalité, à cause des erreurs d'estimation, les

altitudes des sources seront données par les maxima de $P_{MUSIC}(z)$. Attention, l'algorithme MUSIC donne l'altitude des sources mais pas leur intensité.

Cette méthode présente un meilleur pouvoir de résolution, conditionné par les erreurs d'estimation de la matrice de covariance, que celles de Capon et Lagunas-Gasull.

3.4. Simulations

Le but de ces simulations est de comparer les pouvoirs de résolution des différentes méthodes présentées précédemment. Nous avons considéré 4 fréquences espacées de 250 kHz autour de 45 MHz car c'est la configuration qui a été utilisée lors de la campagne de mesures.

Dans la Figure 1, nous avons considéré deux couches infiniment fines dont la distance de séparation varie de 0 à 300 mètres et un rapport signal à bruit d'environ 20 dB. L'algorithme MUSIC présente le meilleur résultat en localisant les deux couches pour la plus petite distance. Fourier quant à lui est de loin le moins performant, il localise les deux couches pour une distance d'environ 150 mètres confirmant la valeur théorique donnée par la formule (5). Concernant les méthodes adaptatives, Lagunas-Gasull améliore les performances de Capon et confirme ainsi son meilleur pouvoir de résolution.

La Figure 2 représente deux couches séparées de 75 mètres en fonction du rapport signal à bruit (RSB) variant de 0 à 30 dB. Fourier est insensible au RSB et ne localise jamais les deux couches alors que les méthodes de Capon et Lagunas-Gasull ont leur pouvoir de résolution qui croît avec le RSB. Comme pour la simulation précédente, la méthode de Lagunas-Gasull présente de meilleures performances que celle de Capon et MUSIC est de loin le meilleur.

Ces simulations ont montré le faible pouvoir de résolution de Fourier dû à la faible bande fréquentielle utilisée et son indépendance au RSB. Comme attendu les méthodes adaptative et Haute Résolution améliorent considérablement les résultats et peuvent permettre la détection de plusieurs couches à l'intérieur des portes radar.

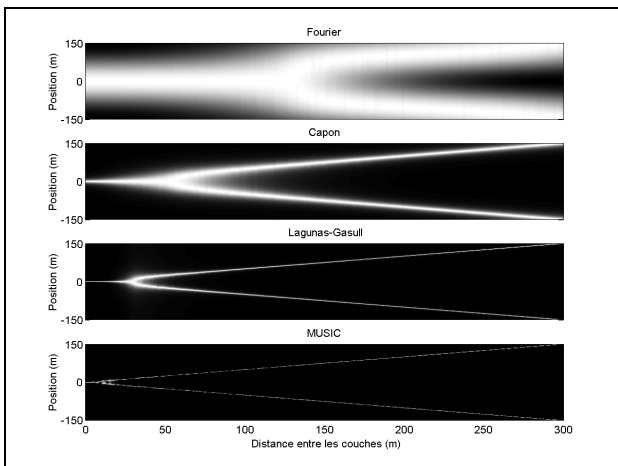


Figure 1.

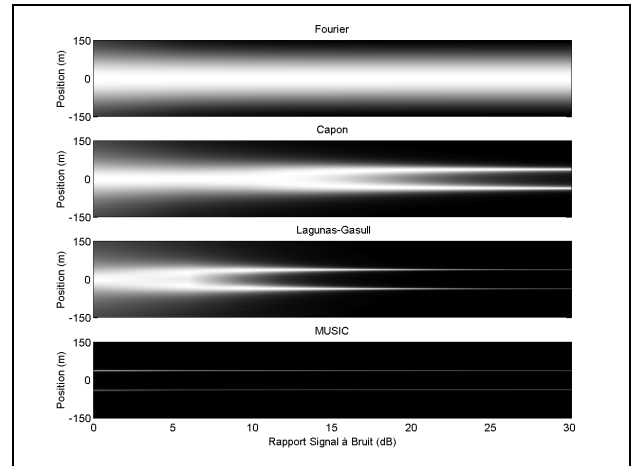


Figure 2.

4. Résultats expérimentaux

Dans le but de mettre en application les différentes méthodes sur des données réelles, une campagne de mesures a été menée en Novembre 2000 à Toulon (France), pendant une semaine, avec le mini-radar VHF du LSEET [7] en mode saut de fréquence.

4.1. Configuration expérimentale

La principale modification a consisté à remplacer l'oscillateur local de 45 MHz par un commutateur rapide, piloté par le système radar, et 4 synthétiseurs de fréquence (44.625, 44.875, 45.125 et 45.375 MHz). Le changement de fréquence s'effectuait à chaque impulsion, soit 80 μ s. La durée des impulsions émises était de 2 μ s donnant une résolution initiale de 300 mètres. Les mesures ont été effectuées entre 2250 et 9600 mètres à l'aide de 50 portes espacées de 150 mètres (recouvrement spatial).

4.2. Résultats

Les résultats présentés sont issus d'une période de 30 minutes commençant le 10 novembre à 00H10 Heure Locale. Chaque profil de distance a été calculé avec une série temporelle de 128 points donnant un temps d'intégration d'environ 41 secondes.

La Figure 3 montre l'évolution temporelle sur 30 minutes des profils de distance, correspondant à 44 profils, estimés par les différentes méthodes. Il s'agit de la porte radar numéro 7 (centre à 3150 m) où une structure est clairement détectée pendant les 15 premières minutes et disparaît par la suite. La méthode de Lagunas-Gasull indique la plus faible épaisseur de couche comparée à celles de Capon et de Fourier. Cela confirme son meilleur pouvoir de résolution. L'algorithme MUSIC quant à lui, qui possède le meilleur pouvoir de résolution, tend à indiquer la présence de plusieurs sources de renforcement distribuées à l'intérieur de la porte radar et non pas une seule structure. Attention, il faut se rappeler que MUSIC ne donne accès qu'aux positions des sources détectées et non pas à leurs puissances.

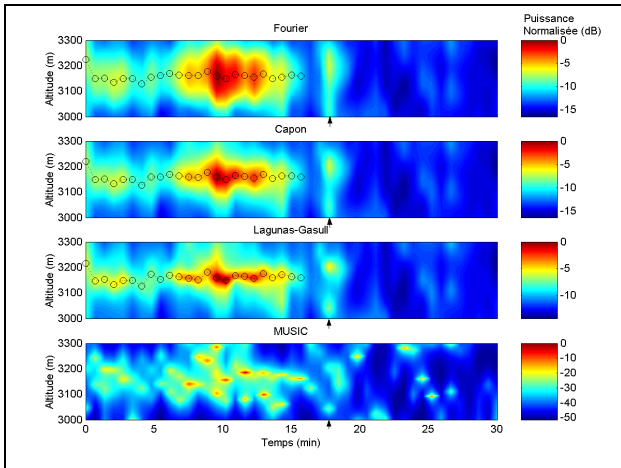


Figure 3.

La Figure 4 est la représentation d'un profil de distance, toujours pour la porte numéro 7, dans lequel deux renforcements sont détectés. Il correspond à la « double structure » présente aux alentours de la 18^{ème} minute et indiquée par une flèche sur la Figure 3. Toutes les méthodes coïncident et confirment les résultats des simulations présentés dans la Figure 1.

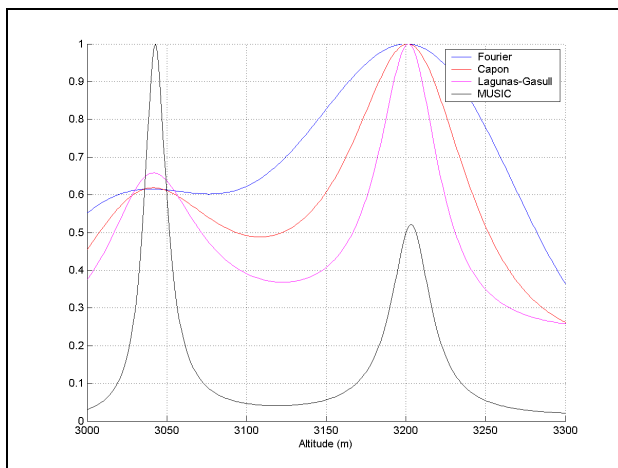


Figure 4.

5. Conclusions et Perspectives

En plus des méthodes déjà proposées pour l'estimation de profils de distance avec des radars MST, nous avons introduit la méthode de Lagunas-Gasull. A l'aide de simulations, nous avons montré que cette méthode présente un meilleur pouvoir de résolution que celui de Capon pour des RSB plus faibles et quantifie les structures détectées par l'algorithme MUSIC qui a été développé pour des cibles discrètes. De plus, dans le but d'évaluer les performances des différentes méthodes d'estimation de profils de distance, la technique du saut de fréquence (avec quatre fréquences) a été implémentée sur le mini-radar VHF localisé à Toulon (France). L'idée étant de détecter des structures d'extension verticale beaucoup plus petite que la résolution initiale fixée par la durée des impulsions émises. La méthode de Fourier n'est pas adaptée

car elle présente un faible pouvoir de résolution (150 mètres) limité par la bande utilisée. Par contre l'application de méthodes adaptatives et Haute Résolution sur les données a permis d'améliorer considérablement la description des profils de distance. Les résultats expérimentaux étant prometteurs, ils ont cependant besoin d'être comparés et validés par des mesures in-situ (mesures ballons par exemple) pour une meilleure compréhension de la nature des renforcements et des sources détectées.

Références

- [1] M. Crochet. *L'étude de l'atmosphère par radar ST*. Le courrier du CNRS, 54-58, 1985.
- [2] E. Kudeki et G. R. Stitt. *Frequency Domain Interferometry: a high resolution radar technique for studies of atmosphere turbulence*. Geophysical Research Letters, Vol. 14, 198-201, 1987.
- [3] Stitt G. R. et S. A. Bowhill. *Improving range resolution with a frequency hopping technique*. Middle Atmosphere Program, Handbook for MAP, Vol. 20, 448-457, 1986.
- [4] S. J. Franke. *Pulse compression and frequency domain interferometry with a frequency-hopped MST radar*. Radio Science, Vol. 25, 565-574, 1990.
- [5] R. D. Palmer, T. Yu, et P. B. Chilson. *Range imaging using frequency diversity*. Radio Science, Vol. 34, 1485-1496, 1999.
- [6] H. Luce, M. Yamamoto, S. Fukao, D. Héral, et M. Crochet. *A Frequency radar Interferometric Imaging (FII) applied with High Resolution Methods*. J. Atmos. Terr. Phys., Vol. 63, 221-234, 2001.
- [7] J. P. Candusso et M. Crochet. *Effect of beam broadening on the VHF Doppler mini-radar, simple method for correcting wind velocity errors*. J. Atmos. Terr. Phys., Vol. 63, 275-284, 2001.
- [8] J. Capon. *High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis*. Proceedings of the IEEE, Vol. 57, 1408-1419, 1969.
- [9] R. O. Schmidt. *Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation*. IEEE Trans. on Antennas and Propagation, Vol. 34, 276-280, 1986.
- [10] M. A. Lagunas-Hernandez et A. Gasull-Llampallas. *An improved maximum likelihood method for power spectral density estimation*. IEEE Trans. on Acoustics, Speech and Signal Processing, Vol. 32, 170-173, 1986.
- [11] G. Bienvu et L. Kopp. *Optimality of High Resolution Array Processing Using The Eigensystem Approach*. IEEE Trans. on Acoustics, Speech and Signal Processing, Vol. 34, 276-280, 1986.