

Application des moments d'ordre supérieur à la focalisation des images ISAR

F. TOTIR⁽¹⁾, C. IOANA⁽²⁾, A. QUINQUIS⁽²⁾

⁽¹⁾ METRA, Bucarest, tél. 40.01.423.30.58, Roumanie, totirfe@ensieta.fr

⁽²⁾ ENSIETA, 2 rue François Verny, Brest, 29806 cedex, France, tél. 0298348886, ioanaco@ensieta.fr

Résumé – L'écart entre le modèle cinématique ISAR et le mouvement réel de la cible a comme conséquence la dé-focalisation de l'image acquise. L'article aborde le cas peu traité de la cible très mobile (loi de mouvement d'ordre élevé) et utilise une approche basée sur la fonction d'ambiguïté d'ordre supérieur afin d'estimer les trajets des points brillants. La compensation est effectuée en deux étapes, visant l'élimination des résidus de translation et des non-uniformités du mouvement de rotation.

Abstract – The difference between the target's theoretical motion law and the real one affects the quality of the retrieved ISAR image, which is blurred. The article considers the case of the high mobility targets and proposes a high-order ambiguity function based method to estimate the scatterers' trajets. The images are focused in two steps, through translation residues elimination followed by high-order rotation terms compensation.

1. Introduction

Les systèmes ISAR utilisent le principe de l'ouverture synthétique inverse afin d'obtenir une bonne résolution transversale de l'image reconstruite. Le mouvement de la cible engendre des vitesses relatives différentes de ses points brillants par rapport au système radar, ce qui conduit à l'apparition d'un spectre Doppler à la réception. Par conséquent, ce spectre contient toute l'information sur la distribution transversale des points brillants de la cible. La méthode classique pour retrouver cette information basée sur la transformée de Fourier est soumise à certaines limitations et contraintes. Par exemple, la résolution transversale est limitée par la bande du spectre Doppler, alors que celui-ci doit rester invariant en temps afin d'éviter la défocalisation de l'image ISAR. Si le spectre Doppler varie dans le temps il est nécessaire de trouver d'autres méthodes pour assurer la qualité des images ISAR, qui est déterminante pour les performances de la reconnaissance automatiques des cibles.

2. Modèle du signal

L'interaction entre le système radar et la cible illuminée est présentée sur la Figure 1. Le système radar est localisé à l'origine du système cartésien de coordonnées (U, V, W) . Les différents points brillants de la cible sont définis en utilisant le système de coordonnées (x, y, z) dont l'origine est située au centre géométrique de la cible. Le système de coordonnées (X, Y, Z) a le même centre comme (x, y, z) mais sa direction reste fixe, parallèle à la direction du système (U, V, W) . Le cas d'un mouvement bidimensionnel de la cible est considéré à titre d'exemple (les axes W , Z et z ne sont pas donc montrés).

Le mouvement de la cible peut être exprimé comme une combinaison entre ses mouvements de translation et de rotation, en général non-uniformes. L'expression du signal reçu dans une cellule de résolution a la forme suivante [Chen,2002] :

$$s_R(t)|_x = \sum_{k=1}^{N_k} A_k \exp \left\{ -j \frac{4\pi f_0}{c} R(t) + x \cos \theta(t) - y_k \sin \theta(t) \right\} \quad (1.1)$$

où :

$$R(t) = R_0 + V_R t + \frac{1}{2} a_R t^2 + \dots \quad (1.2)$$

$$\theta(t) = \theta_0 + \Omega t + \frac{1}{2} \gamma t^2 + \dots$$

expriment les lois non-uniformes des mouvements de translation et de rotation.

Il en résulte (après le développement) :

$$s_R(t)|_x = \sum_{k=1}^{N_k} A_k \exp \left\{ -j \frac{4\pi f_0}{c} [(R_0 + x) + (V_R + \Omega y_k) t + \frac{1}{2} (a_R - \Omega^2 x + \gamma y_k) t^2 + \dots] \right\} \quad (1.3)$$

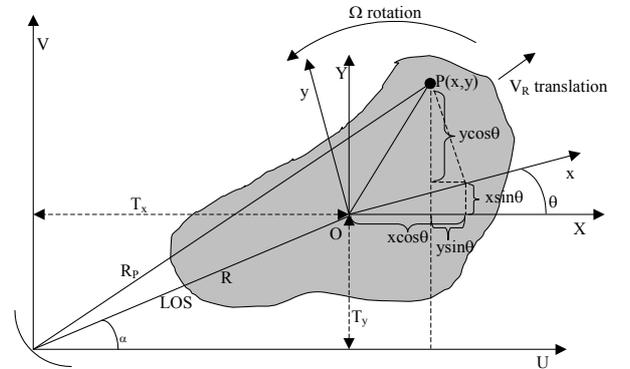


Figure 1 Représentation schématique du principe ISAR

Chaque terme de la somme (1.3) décrit le signal écho provenant d'un certain point brillant. Son spectre Doppler associé s'obtient en dérivant l'expression de sa phase, à un facteur de proportionnalité près. Donc, les spectres Doppler des points brillants appartenant à la cellule de résolution analysée sont donnés par :

$$f_{D_k} = \frac{1}{2\pi} \frac{d}{dt} \left\{ -\frac{4\pi f_0}{c} [(R_0 + x) + (V_R + \Omega y_k) t + \frac{1}{2} (a_R - \Omega^2 x + \gamma y_k) t^2 + \dots] \right\} \quad (1.4)$$

Il est à noter que même si le mouvement de la cible est uniforme en translation et en rotation (les accélérations sont négligeables), le spectre Doppler est non-stationnaire puisque

le terme en Ω^2 ne peut plus être négligé, surtout lorsque le temps d'intégration cohérente augmente.

3. Méthode de focalisation

La solution proposée consiste à utiliser les moments d'ordre supérieur pour estimer et ensuite compenser les termes qui introduisent le comportement non-stationnaire du spectre Doppler. Même si, pour simplicité, la discussion est limitée à la compensation des accélérations, la procédure reste similaire pour les autres termes d'ordre supérieur.

Considérons dans un premier temps le problème de la compensation de l'influence du mouvement de rotation de la cible. L'expression (1.1) devient donc en première approximation :

$$s_R(t)|_x = \sum_{k=1}^{N_k} A_k \exp \left\{ -j \frac{4\pi f_0}{c} \cdot \left[(V_R + \Omega y_k) t + \frac{1}{2} (a_R + \gamma y_k) t^2 \right] \right\} \quad (1.5)$$

V_R et a_R sont les résidus de la compensation grossière du mouvement de la cible par poursuite en distance et fréquence Doppler. Leur influence peut être éliminée en deux étapes [Chen,2002] :

- estimation de la loi de mouvement du point brillant dominant de la cible sous la forme :

$$\exp \left[-j 2\pi \left(f_{D_0} t + \frac{1}{2} f_{D_1} t^2 \right) \right] \quad (1.6)$$

- compensation de ce mouvement en multipliant par l'expression conjuguée de (1.6), d'où on obtient les nouvelles lois de phase sous la forme :

$$\exp \left\{ -j \frac{4\pi f_0}{c} \left[(y_i - y_1) \left(\Omega t + \frac{1}{2} \gamma t^2 \right) \right] \right\} \quad (1.7)$$

Après cette compensation le point brillant dominant peut être considéré fixe par rapport au système radar, alors que les autres points brillants n'effectuent que des mouvements de rotation non-uniformes autour de celui-ci. Ceci a pour conséquence des écarts variables entre les angles de visée, ce qui introduit deux effets conjugués, la rotation et la compression apparente de l'image reconstruite, qui se rajoutent à la dispersion des points brillants (dé-focalisation). On appelle ce nouveau modèle *image pré-focalisée* de la cible. Son amélioration n'est pas importante mais le nouveau ensemble de données constitue un modèle mathématique adéquate. Dans ce cas il s'agit seulement d'un mouvement de rotation dont le centre est connu.

Ces effets peuvent être éliminés si le mouvement d'un deuxième point brillant est estimé sous la

forme $\exp \left[-j 2\pi \left(f_{D_0} t + \frac{1}{2} f_{D_1} t^2 \right) \right]$, ce qui permet ensuite

de compenser le terme correspondant à l'accélération angulaire (rendre les déviations Doppler des points brillants stationnaires). En pratique, la relation suivante est utilisée pour réaliser une interpolation des données acquises pour des écarts angulaires constants :

$$\theta(t) = \Omega t + \frac{1}{2} \gamma t^2 \propto f_{D_0} t + \frac{1}{2} f_{D_1} t^2 \quad (1.8)$$

De cette manière, obtenir les profils en distance à des écarts angulaires constants équivaut au modèle de la cible dont la

vitesse angulaire est constante. Afin d'exploiter au maximum l'aperture acquise il est souhaitable que le domaine des angles d'interpolation coïncide avec le domaine des angles réels de rotation. Pour simplifier la procédure d'interpolation nous considérons l'ensemble d'angles engendré par la vitesse angulaire initiale de la cible (voir Figure 2 c)).

4. Estimation des composantes

Il est à remarquer que l'algorithme de compensation est fortement dépendent de la mise en oeuvre d'une procédure d'estimation des coefficients des polynômes de phase des points brillants. Notre idée est d'utiliser une généralisation des moments multi-lags instantanés d'ordre supérieur (ml-HIM) [Peleg,1991]. La fonction d'ambiguïté multi-lags d'ordre supérieure (ml-HAF) est la transformée Fourier de ces moments.

Si le signal est composé de plusieurs signaux à phase polynomiale, c'est-à-dire :

$$x(t) = \sum_{k=1}^K A_k \exp \left(j 2\pi \sum_{m=1}^M a_{k,m} t^m \right), \quad t=0, \dots, N-1 \quad (1.9)$$

alors son moment d'ordre M contient les sinusoides ayant les fréquences suivantes :

$$f_k = 2^{M-1} M! \left(\prod_{i=1}^{M-1} \tau_i \right) a_{k,M} \quad (1.10)$$

Ces fréquences, correspondant aux sinusoides utiles, sont par conséquent proportionnelles aux produits des lags. Mais, étant donnée l'interférence des composantes, d'autres sinusoides vont apparaître. La distinction est faite compte tenant du fait que les sinusoides utiles sont les seules dont la fréquence est un multiple du produit des lags [Barbarossa,1998]. Afin d'utiliser cette information, un changement d'échelle des fonctions ml-HAF est envisageable. De cette manière les pics utiles reviennent toujours dans la même position. Le produit des fonctions ml-HAF pour différents ensembles de lags, à des échelles adéquates, peut être donc utilisé afin de conserver uniquement les sinusoides utiles [Barbarossa,1998]. La fonction obtenue est la fonction PHAF.

L'inconvénient de cette méthode est le choix de lags. Il peut être montré qu'il existe une valeur optimale qui minimise la variance des coefficients estimés autour de laquelle les valeurs de τ_i seront choisies. Nous avons également proposé un autre critère de type « warped » qui assure une dépendance linéaire entre les fréquences et les lags (la fonction warped-HAF) [Ioana,2003]. L'utilisation des opérateurs « warping » a aussi un autre avantage, éliminant le phénomène de propagation de l'erreur, qui est caractéristique pour les méthodes itératives [Ioana,2003].

Afin de détecter toutes les composantes à phase polynomiale de (1.9), un algorithme récursif a été proposé en [Barbarossa,1998]. Il est essentiellement basé sur l'estimation des pics valides à chaque itération. La procédure d'estimation est ensuite reprise pour chaque composante ainsi détectée. La particularité du problème de focalisation ici présenté est d'éliminer l'étape d'estimation du nombre de composantes, ce qui permet d'utiliser une implémentation non-récursive. En effet, le nombre de composantes à estimer dans une certaine cellule de distance est connu a priori (une ou deux composantes).

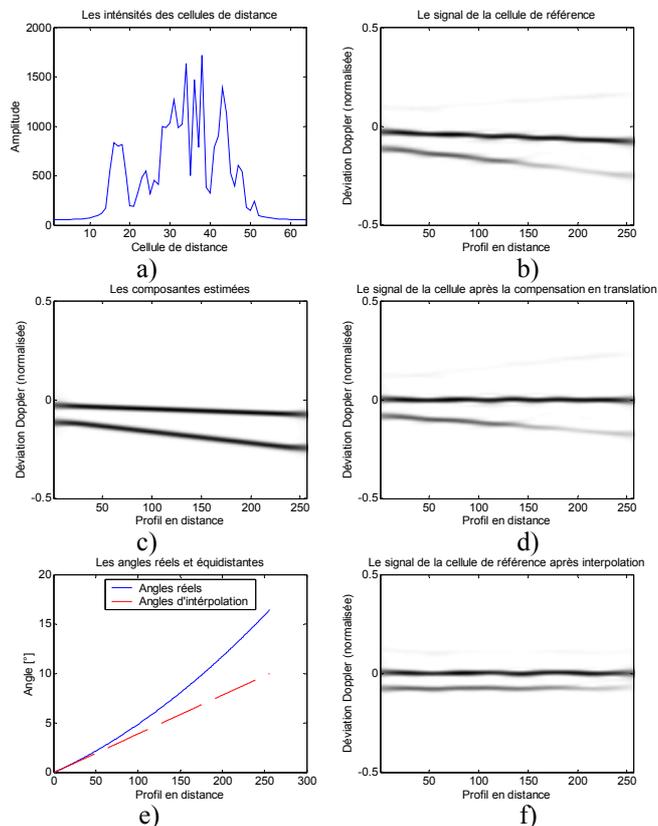


Figure 2 Les étapes du processus de focalisation d'une image ISAR en utilisant la méthode PHAF : a) les intensités des cellules de résolution, b) le signal de la cellule de distance analysée, c) les composantes estimées, e) les angles réels et ceux utilisées à l'interpolation, f) le signal de la cellule de distance analysée après la compensation

La récupération des coefficients des signaux à phase polynomiale permet d'implémenter la procédure de compensation, au moins pour le cas où la cible a un mouvement de rotation dans le plan d'observation. Si le mouvement de la cible est plus complexe, il faut détecter le cas propre de rotation planaire pour bien effectuer la compensation. La détection d'un tel cas est fondée sur l'observation que pour la rotation planaire de la cible le rapport des coefficients de même ordre des polynômes associés aux différents points brillants est constant [Chen,2002].

En effet, si le mouvement de la cible est une rotation bidimensionnelle, les "trajectoires" temps-fréquence des points brillants peuvent s'exprimer par le même polynôme (qui est la loi de rotation). La compensation des toutes ces spectres non-stationnaires est faite utilisant la même interpolation. Même si la cible a toujours un mouvement non-planaire, la focalisation peut être encore envisagée en considérant, par exemple, plusieurs points brillants dont les lois de mouvement sont estimées.

Du point de vue de l'implémentation, il est préférable de choisir deux cellules de distance afin d'en extraire les lois de phase des deux points brillants. Le cas contraire, i.e. si les lois des deux points brillants appartenant à la même cellule sont estimées, il faut d'abord s'assurer de la présence des deux points brillants. Les deux cellules de distance sont choisies automatiquement, à partir des intensités des signaux réfléchis.

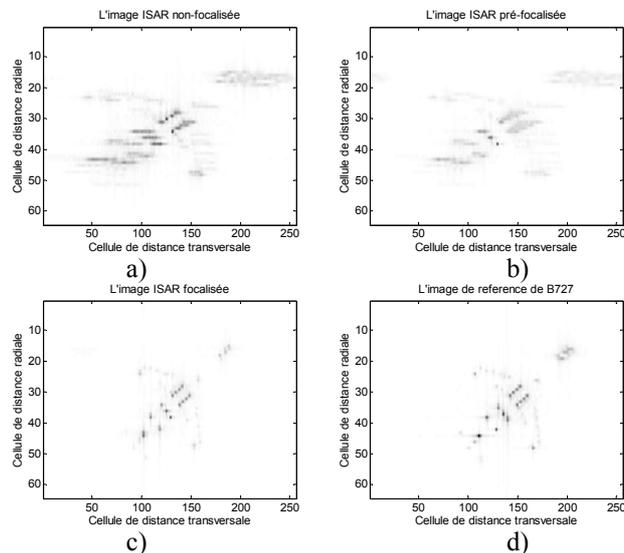


Figure 3 La focalisation d'une image ISAR : a) l'image ISAR non-focalisée, b) l'image ISAR pré-focalisée c) l'image ISAR focalisée d) image de référence de la cible

5. Résultats

La méthode proposée a été validée sur les données acquises en utilisant un modèle d'avion B727 disponible à l'adresse <http://airborne.nrl.navy.mil/~vchen/tftsa.html> (voir Figure 3). Nous présentons, pour comparaison, l'image de référence de la cible, obtenue par imagerie ISAR quand la cible n'exécute qu'un mouvement de rotation uniforme (Figure 3 d)).

6. Critère d'appréciation

Afin d'évaluer de manière exacte l'effet de l'opération de focalisation des images ISAR 2D, on peut utiliser la fonction de corrélation bidimensionnelle ou plus exactement la largeur de son lobe central. En effet, puisque cette fonction est étroitement liée à la distribution/concentration énergétique sur les deux axes, elle peut constituer une mesure d'évaluation. De par son principe, la méthode présentée améliore la concentration énergétique sur l'axe transversale.

Les deux fonctions de corrélation bidimensionnelles, pour l'image non-focalisée et pour sa version focalisée sont présentées sur la Figure 4. Le rapport de la largeur du lobe central (au niveau 0.5) est égal à $30/5=6$ (sur l'axe transversal). Donc, selon ce critère, l'image est six fois meilleure. La largeur du même lobe sur l'axe radial est égal pour les deux fonctions.

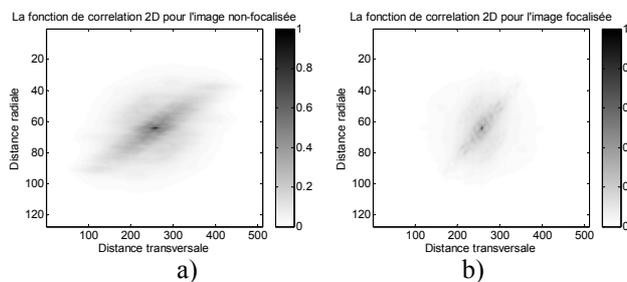


Figure 4 Les fonctions d'auto-corrélation bidimensionnelles de l'image non-focalisée (a) et focalisée (b)

7. Conclusion

Nous avons proposé une technique de focalisation des images ISAR basée sur l'estimation des lois de mouvement des plusieurs points brillants. L'implémentation de cette méthode est basée sur l'utilisation des moments d'ordre supérieur afin de retrouver les coefficients de la loi de mouvement des points brillants. Un critère d'évaluation utilisant la fonction d'auto-corrélation bidimensionnelle a été présenté.

Bibliographie :

- [Barbarossa,1998] Sergio Barbarossa, Anca Scaglione, Georgios Giannakis, « Product High-Order Ambiguity Function for Multicomponent Polynomial-Phase Signal Modeling », IEEE Transactions On Signal Processing, Vol. 46, No. 3, Mars, 1998
- [Chen,2002] Victor Chen, Hao Ling, « Time-Frequency Transforms for Radar Imaging and Signal Analysis », Artech House, London, 2002
- [Ioana,2003] Cornel Ioana, André Quinquis, « On the Unitary Equivalence Application in the Polynomial Phase Signal Processing », 7th International Symposium on Signal Processing and Applications (ISSPA) 2003, Paris, France, *special session on « Time-Frequency : Methods and Applications »*
- [Peleg,1991] S. Peleg, B. Porat, « Estimation and classification of signals with polynomial phase », IEEE Transactions on Information Theory, vol. 37, pp. 422–430, 1991