

Estimation de la vitesse radiale robuste aux perturbations additives d'une cible marine dans un contexte ISAR

VINCENT CORRETJA^{1,4}, ERIC GRIVEL⁴, YANNICK BERTHOUMIEU⁴,
JEAN-MICHEL QUELLEC², THIERRY SFEZ³ ET STEPHANE KEMKEMIAN³

THALES SYSTEMES AEROPORTES S.A.

¹ 26 avenue Gustave Eiffel, 33600 PESSAC, ² 10 avenue de la 1^{ère} dfl, 29200 BREST, ³ 2 avenue Gay-Lussac, 78990 ELANCOURT

⁴ Université Bordeaux 1 – IPB ENSEIRB-MATMECA – IMS – UMR CNRS 5218

351 cours de la Libération, 33405 TALENCE CEDEX

¹vincent.corretja@fr.thalesgroup.com, ⁴eric.grivel@ims-bordeaux.fr, ⁴yannick.berthoumieu@ims-bordeaux.fr,

²jean-michel.quellec@fr.thalesgroup.com, ³thierry.sfez@fr.thalesgroup.com, ³stephane.kemkemian@fr.thalesgroup.com

Résumé – En traitement du signal radar, le mode radar à ouverture synthétique inverse (ISAR, pour inverse synthetic aperture radar) tire profit des mouvements propres de la cible et fournit une image range-Doppler de celle-ci. Si les mouvements de la cible ne sont pas compensés, l'image obtenue est floue. Dans cette communication, nous proposons une nouvelle approche de compensation de mouvement fondée sur l'estimation de la vitesse radiale de la cible. Chaque écho est caractérisé par des paramètres qui varient au cours du temps et que l'on stocke pour construire des séquences. L'analyse spectrale de ces séquences conduit à des estimations de la fréquence Doppler. Pour rendre l'estimation de la vitesse radiale de la cible marine robuste vis-à-vis des perturbations additives, ces estimations de la fréquence Doppler sont sélectionnées et combinées.

Abstract – In radar processing, inverse synthetic aperture radar (ISAR) takes advantage of the target rotational motion to provide a 2-D range-Doppler image characterizing the target. If the target motion is not compensated, a blurred image is obtained. In this paper, we propose a new approach for motion compensation based on the target radial velocity estimation. This method consists in characterizing the radar echoes by features and in storing them in sequences. Spectrum analysis methods are then used to get Doppler frequency estimates. To make the target radial velocity estimation robust against additive disturbances, several estimates are selected and combined.

1 Introduction

La fonction d'imagerie des navires en vue de leur classification est devenue une exigence pour les radars aéroportés de surveillance maritime. Parmi les différents modes d'imagerie radar, le traitement radar à ouverture synthétique inverse (ISAR pour inverse synthetic aperture radar) fournit des images range-Doppler (RD), c'est-à-dire des représentations de la fréquence Doppler induite par le mouvement propre de la cible marine (à savoir le roulis, le tangage, le lacet, etc.), en fonction de sa distance par rapport au radar. Cette image permet à l'opérateur de déterminer le profil du navire. Cependant, l'image RD obtenue est parfois floue. Ce phénomène est principalement dû à la conjugaison d'erreurs de compensation de mouvement.

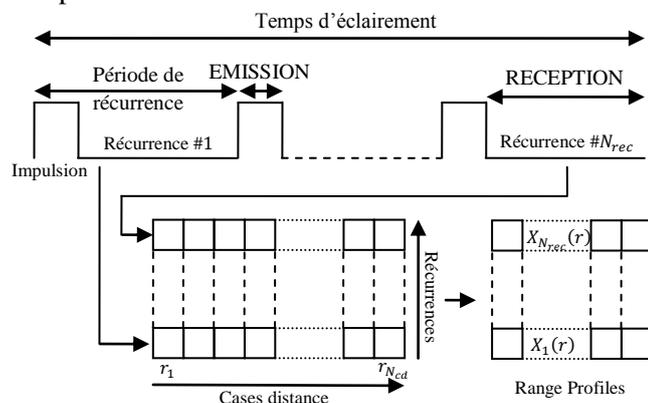


Figure 1 : Analyse du signal reçu par le radar

Plus précisément, lorsqu'un radar à impulsions avec une commutation périodique entre l'émission et la

réception est utilisé, les signaux collectés pour une impulsion émise par le radar, appelée aussi récurrence, sont associés à des cases distances données. Le signal à deux dimensions correspondant à la concaténation des différentes récurrences, illustrée par la figure 1, constitue le signal d'entrée de la chaîne de traitement ISAR. Cette chaîne comprend une série d'étapes de compensation des mouvements du porteur et de la cible marine. La compensation du mouvement du porteur repose sur l'utilisation de centrales inertielles embarquées tandis que celle du mouvement d'ensemble¹ de la cible reste un sujet plus délicat à traiter. Elle requiert une estimation de la vitesse radiale² de la cible marine et s'opère en deux temps :

1/ *alignement de chaque récurrence avec une récurrence de référence* (la première par exemple), de manière à ce qu'un point brillant apparaisse dans la même case distance pour toutes les récurrences. Diverses approches ont été proposées ces dernières années que l'on peut distinguer suivant deux points :

- soit la vitesse radiale de la cible est déduite du décalage en distance entre deux récurrences, soit elle est estimée directement.

¹ Le mouvement d'ensemble de la cible marine correspond au mouvement du navire pour suivre la trajectoire désirée. C'est un mouvement de translation plane le long de la surface de la mer. Il s'agit en général d'un mouvement rectiligne uniforme.

² L'estimation de la vitesse radiale de la cible, qui est la vitesse de celle-ci projetée sur l'axe radar-cible, repose sur une estimation fréquentielle du signal car la vitesse radiale v_r de l'objet marin est liée à la fréquence Doppler f_d par $f_d = -\frac{2 \cdot v_r}{\lambda}$, où λ désigne la longueur de l'onde émise.

- soit la méthode d'estimation est fondée sur ce que l'on appelle les « range profiles »³ soit sur le signal 2-D cases distance/réurrences.

Commençons par détailler les méthodes qui visent à estimer le décalage distance à partir de range profiles. Dans [1], les auteurs recherchent le décalage en distance qui maximise la corrélation entre deux range profiles successifs. Cependant, selon Sauer *et al.* [2], la présence d'un clutter supposé stationnaire peut modifier la valeur de ce décalage distance. Par conséquent, Sauer *et al.* proposent d'utiliser la transformée de Hough pour effectuer la recherche de lignes droites caractéristiques des points brillants d'une cible sur l'image 2-D cases distance/réurrences. Dans [3], une approche similaire a été développée avec l'utilisation d'un autre outil de traitement d'image, à savoir la transformée de Radon. Dans [4] et [5], les auteurs considèrent deux range profiles successifs notés $\{X_{n_{rec}}(r)\}_{r=1,\dots,N_{cd}}$ et $\{X_{n_{rec}+1}(r)\}_{r=1,\dots,N_{cd}}$, où $n_{rec} = 1, \dots, N_{rec} - 1$. Le décalage distance Δr est recherché de manière à ce que l'entropie de $X_{n_{rec}}(r) + X_{n_{rec}+1}(r - \Delta r)$ soit minimale. La manière d'estimer Δr diffère selon les auteurs : une méthode de recherche exhaustive est présentée dans [4] alors qu'une procédure à complexité calculatoire moindre fondée sur les algorithmes génétiques est détaillée dans [5]. Dans [6], le décalage distance pour les récurrences de $n_{rec} = 1$ à $n_{rec} = N_{rec}$ est modélisé comme un polynôme d'ordre supérieur à deux. Exprimé comme une somme pondérée des puissances de n_{rec} , le décalage distance peut ainsi être déduit si les poids ont été préliminairement estimés. Toutes les méthodes présentées sont utilisées dans le cas où le décalage distance est petit. Pour de grands décalages distance, les auteurs dans [7] jugent leur approche rapide et précise. Parmi les approches qui ne nécessitent pas l'utilisation du range profile, l'algorithme proposé dans [1] consiste à prendre la transformée de Fourier de deux récurrences successives et à calculer la différence de phase entre les deux, ce qui permet d'en déduire le décalage distance. Enfin, intéressons-nous aux approches fondées sur une estimation directe de la vitesse radiale du navire. Dans [8], les auteurs proposent de faire une poursuite du centre de gravité de la cible à l'aide d'un filtre de Kalman, en supposant le mouvement de la cible rectiligne uniforme. Cependant, la recherche du centre de gravité est difficile à mettre en place. Pour une forme d'onde « step-frequency », un algorithme d'estimation de la vitesse radiale de la cible fondée sur un estimateur des moindres carrés non-linéaire est présenté dans [9]. Les performances de précision sont jugées « bonnes », mais l'approche ne peut être appliquée pour une forme d'onde « classique ».

2/ compensation de phase due à l'effet Doppler lié au mouvement d'ensemble. En ce qui concerne l'état de l'art sur la compensation de phase, le lecteur peut se référer à [6].

³ Le range profile est une représentation de la puissance rétrodiffusée de la cible en fonction de la distance.

Après ces étapes de compensation de mouvement, l'image RD est obtenue par une analyse spectrale de chaque case distance. Le choix de la technique d'analyse spectrale influe sur le rendu de l'image RD, notamment du fait de sa résolution fréquentielle.

Dans cette communication, nous présentons un nouvel algorithme d'estimation de la vitesse radiale d'une cible marine. Cette méthode consiste à caractériser chaque récurrence par plusieurs paramètres tels que les coefficients d'ondelettes. Ils sont stockés pour former des séquences qui représentent l'évolution des paramètres au cours du temps. Une analyse fréquentielle de chacune de ces séquences permet d'en déduire des estimations de la fréquence Doppler. Ensuite, nous sélectionnons certaines d'entre elles et les combinons de manière à fournir une estimation robuste de la vitesse radiale de la cible. Il est noté que l'estimation de la vitesse radiale de la cible doit être aussi précise que possible. En effet, si l'erreur d'estimation de la vitesse navire vaut 1,5 cm/s, pour un radar en bande X, cela peut engendrer des décalages fréquentiels de 1 Hz dans la représentation RD.

La suite de cette communication s'organise en 4 parties. Tout d'abord, nous présentons le principe générique de l'estimation de la vitesse radiale du navire. Dans la partie 3, des résultats de simulation confirment la validité de l'approche proposée. Enfin, nous donnons quelques perspectives de travail.

2 Principe proposé de l'estimation de la vitesse radiale de la cible marine

La méthode que nous proposons pour estimer la vitesse radiale d'une cible se décompose en deux étapes, dont le principe est présenté sur la figure 2.

- Première étape, appelée transformation :

L'objectif est de caractériser les échos du radar pour une récurrence par N paramètres composés de la moyenne du signal sur plusieurs cases distances successives et des coefficients d'ondelettes. Comme les N paramètres évoluent au cours des N_{rec} récurrences, ils sont stockés pour créer N séquences de taille N_{rec} .

- Deuxième étape, appelée méthode d'analyse :

Le but est de mener une analyse fréquentielle sur les N séquences, puis de sélectionner les différents pseudo-spectres fournis par l'analyse fréquentielle afin de combiner les différentes estimées de la vitesse radiale de la cible. Cette étape sera détaillée dans la section 2.2.

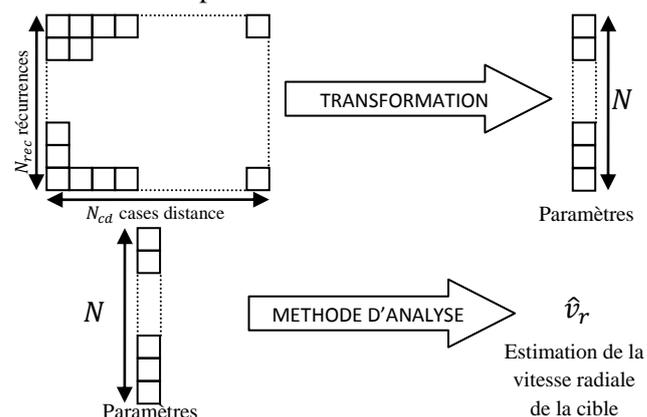


Figure 2 : Principe de l'estimation de la vitesse radiale de la cible

2.1 Transformation

Parmi les transformations qui peuvent être considérées, on pourrait opter pour la moyenne et/ou la puissance des différentes récurrences.

Une alternative serait les distributions temps-fréquence, telles que le spectrogramme ou la distribution de Wigner-Ville. Cependant, ces méthodes ont des inconvénients. Ainsi, le spectrogramme présente une faible résolution alors que la distribution de Wigner-Ville introduit des « termes croisés ».

Pour cette raison, nous optons pour la transformée en ondelettes. Dans ce qui suit, nous avons choisi l'ondelette de Haar, mais d'autres ondelettes peuvent être utilisées comme celles de Morlet, etc. Chaque récurrence est décomposée à partir de la transformée en ondelette pour obtenir N_{rec} grilles dyadiques de coefficients (Cf. figure 3). Ainsi, on caractérise chaque récurrence par $N_{cd} - 1$ paramètres.

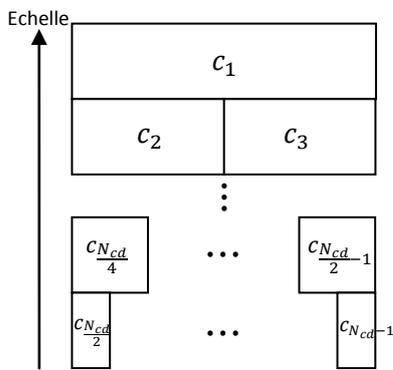


Figure 3 : Grille dyadique de coefficients d'ondelettes

La robustesse de l'estimation réside dans la diversité des paramètres caractérisant le signal reçu par le radar pour chaque récurrence.

2.2 Méthode d'analyse

La méthode d'analyse est détaillée sur la figure 4 :

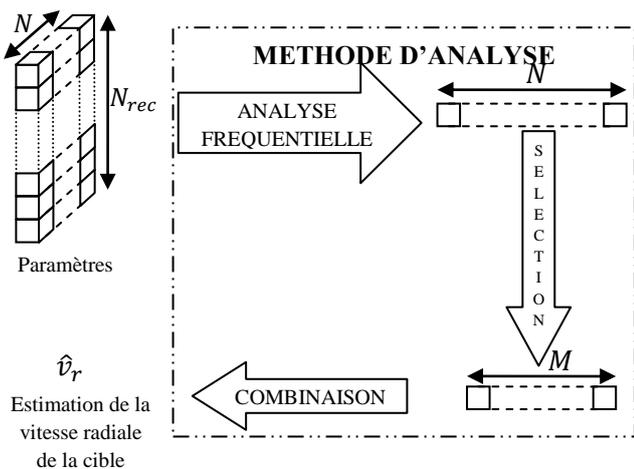


Figure 4 : Principe de la méthode d'analyse

La méthode d'analyse opère en trois étapes :

1/ une analyse fréquentielle des N séquences traduisant l'évolution des paramètres au cours du temps est effectuée. Bien que leur complexité calculatoire soit élevée, les méthodes haute-résolution telles que MUSIC ou ESPRIT sont privilégiées.

2/ La fréquence Doppler de la cible f_d peut être déduite de l'analyse fréquentielle des paramètres. Nous proposons alors de sélectionner $M < N$ pseudo-spectres. La sélection se fonde sur le calcul de distances spectrales à partir de la divergence de Kullback-Leibler⁴ (DKL). Deux types de sélection peuvent être envisagés :

Stratégie n°1 : $\log_2(N_{cd})$ pseudo-spectres sont sélectionnés ; cela correspond à un pseudo-spectre par échelle. Le premier coefficient c_1 est sélectionné et son pseudo-spectre est considéré comme le spectre de référence. Ensuite, les distances spectrales entre les pseudo-spectres de c_1 et de c_2 et entre ceux de c_1 et de c_3 , notées respectivement d_{12} et d_{13} sont calculées. Le paramètre c_i est sélectionné tel que : $i = \begin{cases} 2 & \text{si } d_{12} \leq d_{13} \\ 3 & \text{si } d_{12} > d_{13} \end{cases}$. Le pseudo-spectre de c_i devient le spectre de référence et on réitère la procédure pour chaque échelle de la grille dyadique.

Stratégie n°2 : Le processus est le même que celui de la stratégie n°1, mais le pseudo-spectre de c_1 reste le spectre de référence. Un seuil sur la distance spectrale est fixé pour sélectionner uniquement les pseudo-spectres les plus proches du pseudo-spectre de c_1 . Quelle que soit la stratégie utilisée, nous supposons que M pseudospectres sont sélectionnés.

3/ La dernière étape de la méthode d'analyse est la combinaison des M estimations de la fréquence Doppler obtenues à partir des M pseudo-spectres sélectionnés. L'estimation de la fréquence Doppler, et donc de la vitesse radiale, se fait à partir de la valeur moyenne ou médiane des différentes estimées. Une moyenne pondérée peut également être effectuée avec des poids choisis en fonction de la valeur de la distance spectrale donnée par la DKL.

3 Tests sur données synthétiques

L'approche présentée lors de la section 2 est testée sur des données synthétiques. Les résultats obtenus sont comparés à ceux acquis à partir de la méthode du maximum de corrélation [1].

Le protocole de simulation est le suivant : un radar aéroporté, embarqué sur un porteur en mouvement rectiligne uniforme à altitude constante de 10000 ft éclaire une cible marine. Le radar émet en bande X (à 10 GHz) un signal de largeur de bande égale à 150 MHz pour obtenir une résolution distance de 1 m. Nous considérons 1024 cases distance et 256 récurrences. La cible générée est caractérisée par 268 points brillants de réflectivité égale et par une surface équivalente radar de 1000 m² et suit également un mouvement rectiligne uniforme avec une vitesse de 5 kt. Les mouvements propres de la cible sont supposés sinusoïdaux :

⁴ La divergence de Kullback-Leibler est définie comme une mesure pour quantifier la distance entre deux densités de probabilité S_{xx} et S_{yy} de deux séquences x et y :

$$KL(S_{xx}, S_{yy}) = \langle S_{xx}, \ln \left(\frac{S_{xx}}{S_{yy}} \right) \rangle$$

où $\langle \rangle$ représente le produit scalaire.

Tab. 1 : Paramètres des mouvements propres de la cible marine

roulis (°)	tangage (°)	lacet (°)
$\theta_r(t) = 5 \sin(13,8t)$	$\theta_t(t) = 0,9 \sin(32,1t)$	$\theta_l(t) = 1,4 \sin(10,9t)$

Les données reçues par le radar sont constituées :

- de la cible de puissance P_{cible} ,
- de bruit thermique additif, qui est supposé blanc Gaussien et centré de puissance P_{bruit} ,
- et/ou de clutter de mer distribué selon une loi K avec un paramètre de forme ν et de puissance $P_{clutter}$.

Dans les simulations, ν est fixé à 2. Pour rappel, la densité de probabilité de la loi K est donnée en annexe. Nous traitons plusieurs cas avec différentes valeurs de rapport signal à bruit $RSB = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{cible}}{P_{bruit}} \right)$ et de rapport clutter à bruit $RCB = 10 \log_{10} \left(\frac{P_{clutter}}{P_{bruit}} \right)$. Il est à noter que le RSB et le RCB décroissent avec la distance radar-cible d .

Les résultats présentés dans les sous-sections 3.1 et 3.2 sont moyennés sur 10 réalisations.

3.1 Simulation n°1 : Bruit thermique seulement

Tab. 2 : Erreur absolue de l'estimation de la vitesse radiale de la cible – Stratégie de sélection n°1

d	Combinaison	Moyenne	Médiane
29,60 NM ($RSB= 30$ dB)		0,0226%	0,0326%
52,64 NM ($RSB= 20$ dB)		0,0130%	0,0056%

Tab. 3 : Erreur absolue de l'estimation de la vitesse radiale de la cible – Stratégie de sélection n°2

d	Combinaison	Moyenne	Médiane
29,60 NM ($RSB= 30$ dB)		0,0217%	0,0331%
52,64 NM ($RSB= 20$ dB)		0,0127%	0,0059%

En utilisant la méthode du maximum de corrélation [1], l'erreur absolue de l'estimation de la vitesse radiale de la cible est de 1,4864 % pour les deux distances.

3.2 Simulation n°2 : Bruit thermique et clutter de mer

Tab. 4 : Erreur absolue de l'estimation de la vitesse radiale de la cible – Stratégie de sélection n°1

d	Combinaison	Moyenne	Médiane
29,60 NM ($RSB= 30$ dB, $RCB= 10$ dB)		0,0193%	0,0324%
52,64 NM ($RSB= 20$ dB, $RCB= 0$ dB)		0,0293%	0,0071%

Tab. 5 : Erreur absolue de l'estimation de la vitesse radiale de la cible – Stratégie de sélection n°2

d	Combinaison	Moyenne	Médiane
29,60 NM ($RSB= 30$ dB, $RCB= 10$ dB)		0,0201%	0,0331%
52,64 NM ($RSB= 20$ dB, $RCB= 0$ dB)		0,0270%	0,0050%

En utilisant la méthode du maximum de corrélation [1], l'erreur absolue de l'estimation de la vitesse radiale de la cible est de 1,4864 % pour les deux distances.

4 Conclusion

Dans cette communication, une nouvelle méthode d'estimation de la vitesse radiale d'une cible marine est présentée pour compenser « au mieux » les mouvements de la cible dans la chaîne de traitement du mode ISAR. Contrairement à la plupart des approches existantes, cette approche n'est pas fondée sur les range profiles, mais sur une caractérisation de chaque récurrence par plusieurs paramètres tels que les coefficients en ondelettes. L'analyse fréquentielle haute-résolution de ces paramètres permet de fournir une estimation de la vitesse radiale de la cible précise et robuste aux perturbations additives telles que le bruit thermique et le clutter de mer comme l'illustrent les simulations menées. L'utilisation d'une méthode haute-résolution d'analyse spectrale améliore la précision au prix d'une augmentation du coût calculatoire.

5 Annexe

La densité de probabilité de la loi K est :

$$p(x|a, \nu) = \frac{2}{a\Gamma(\nu)} \left(\frac{x}{2a}\right)^\nu K_{\nu-1}\left(\frac{x}{a}\right) \quad (1)$$

où a est le paramètre d'échelle, ν le paramètre de forme, Γ la fonction gamma et K_ν est la fonction modifiée de Bessel de deuxième espèce d'ordre ν .

6 Références

- [1] C. C. Chen et H. A. Andrews, "Target-Motion-Induced Radar Imaging," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, Vol. 16, n°1, pp. 2-14, 1980.
- [2] T. Sauer et A. Schroth, "Robust Range Alignment Algorithm via Hough Transform in an ISAR Imaging System," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, Vol. 31, n°3, pp. 1173-1177, 1995.
- [3] S. Philippe, K. Leon et G. Sjoerd, "Radon Transform and time-frequency representations for ISAR motion compensation and Imaging," Proceedings of SPIE, Vol. 4738, pp. 252-263, 2002.
- [4] G. Wang et Z. Bao, "The minimum Entropy Criterion of Range Alignment in ISAR Motion Compensation," Proceedings of IEEE Radar Conference, pp. 236-239, 1997.
- [5] L. Wang, D. Zhu et Z. Zhu, "Range Alignment for ISAR using Genetic Algorithms," Proceedings of IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium, pp. 4666-4669, 2005.
- [6] J. Wang et X. Liu, "Improved Global Range Alignment for ISAR," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, Vol. 43, n°3, pp. 1070-1075, 2007.
- [7] S.-H. Park, H.-T. Kim, K.-T. Kim et J.-I. Park, "An Efficient Range Alignment Method for Long-Range ISAR Imaging," Proceedings of IEEE Radar Conference, 2009.
- [8] T. Itoh, H. Sueda et Y. Watanabe, "Motion Compensation for ISAR via Centroid Tracking," IEEE Transactions on Aerospace and Electronic System, Vol. 32, n°3, pp. 1191-1197, 1996.
- [9] Y. Liu, H. Meng, G. Li et X. Wang, "Velocity Estimation and Range Shift Compensation for High Range Resolution Profiling in Stepped-Frequency Radar," IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, Vol. 7, n°4, pp. 791-795, 2010.