



**IMAGERIE ISAR (RADAR A SYNTHESE D'OUVERTURE INVERSE)
DE SATELLITES.**

Alain LAMOULIE et Luc Vignaud

Division Systèmes Radar, Direction des études de Synthèse
ONERA
B.P. 72, F 92260 Châtillon, France

RESUME

La compensation de mouvement est une étape critique dans les traitements d'imagerie radar. Les méthodes paramétriques sont une alternative des méthodes d'autofocalisation, intéressantes pour le radariste qui recherche des solutions simples et rustiques pour obtenir des images focalisées dans le but d'identifier et de reconnaître les objets qu'il observe, le plus rapidement possible. Dans ce but, l'autofocalisation par corrélation complexe des profils en distance radiale, méthode bien connue à ce jour, a été développée à l'ONERA dans une procédure d'imagerie complète permettant à partir de signaux enregistrés par un radar situé à la surface de la terre de former des images d'objets volants ou en orbite autour de celle-ci. Le but de cet article est de montrer les possibilités de cette méthode. Son originalité consiste à l'appliquer dans le contexte particulier de l'imagerie de satellites.

ABSTRACT

Motion compensation is a critical step in ISAR data processing. Parametric methods are an alternative to autofocus techniques that are very attractive to the radarist in search of simple and rustic solutions to obtain focalized images for identification and recognition of the observed object as quickly as possible. The well known autofocus method (cross correlation of slant range profiles) has been developed at ONERA within a whole imaging procedure. This procedure calculates images from signals recorded by radars located at the Earth surface. The aim of this paper is to show the possibilities of this method and its originality for satellite imaging applications.

1. INTRODUCTION.

Depuis plus de dix ans, on a ressenti le besoin de s'affranchir des erreurs de mouvement erratique dans les problèmes d'imagerie radar. De nombreux articles, qu'il serait fastidieux de citer, ont abordé les méthodes permettant de résoudre les problèmes de compensation de mouvement. Ces méthodes reposent soit sur l'utilisation des données trajectographiques, soit sur leur estimation par des techniques d'autofocalisation en se plaçant dans l'hypothèse où elles sont inconnues ou entachées d'une erreur liée au système de mesure. Le but de cette communication consiste à présenter un protocole complet d'imagerie ISAR appliqué à l'imagerie de satellites. Ce protocole comporte une étape de compensation de mouvement qui repose sur une corrélation complexe et une étape d'imagerie linéaire classique effectuée par une double transformation de Fourier. Une application sur des signaux réels provenant de deux radars différents vient illustrer la validité de la méthode.

2. RAPPELS SUR L'IMAGERIE RADAR.

L'imagerie radar est une technique permettant de calculer des images représentatives des cartes de réflecteurs élémentaires. Elle repose sur le traitement des signaux de

rétrodiffusion issus de la cible et enregistrés par un système radar cohérent considéré ici monostatique. Les objets observés sont les satellites et les débris évoluant dans une tranche d'altitude comprise entre 200 km et 1000 km.

Si le système radar dispose d'un analyseur à large bande et si de plus, un mouvement de rotation relatif entre le radar et l'objet est observé (ouverture synthétique) l'imagerie peut être réalisée selon le principe de la technique ISAR (radar à synthèse d'ouverture inverse). Le terme inverse indique ici que le mouvement est celui de l'objet, le radar restant fixe. Ces objets sont supposés fixes dans leur repère propre. Les coefficients de rétrodiffusion peuvent être mesurés pour différentes fréquences et positions angulaires.

2.1. Imagerie à une dimension. L'imagerie radar peut être assimilée à un problème inverse. Les modèles de la cible et du système de mesure, rappelés rapidement dans ce paragraphe, peuvent être utilisés dans des problèmes d'imagerie multidimensionnelle. Le modèle de l'objet dans un problème inverse permet d'identifier les propriétés physiques de l'objet contenues dans les mesures. On peut supposer, par exemple, que l'objet est composé de N réflecteurs ponctuels (antennes du satellites, structures du satellites produisant un effet de trièdre). Chaque réflecteur est identifié par son coefficient de réflexion h_n qui dépend de ses propriétés physiques et par ses coordonnées dans



l'espace. A une dimension, ces réflecteurs ponctuels sont répartis sur un axe Ox et ont pour coordonnées $x_1, x_2, \dots, x_n, \dots, x_N$. On peut aussi considérer que l'objet est composé de plusieurs milieux homogènes (panneaux solaires). Pour ce type de modèle, ce sont les frontières entre les différents milieux qui sont localisés. Les coefficients de rétrodiffusion traduisent par exemple les effets de diffraction de bord.

Le modèle du système de mesure suppose que le radar qui éclaire l'objet est situé en $x=0$ et émet un signal $p(t)$ de durée finie τ_0 . Ce signal atteint un réflecteur ponctuel situé en x_n à l'instant $t_n (= x_n/c$, où c désigne la célérité de la lumière dans le vide), se réfléchit et se propage en direction du radar. Pour un ensemble de N réflecteurs observés, le récepteur intercepte :

$$s(t) = \sum h_n p(t - 2t_n) \tag{2.1}$$

où $2 t_n$ représente la durée du trajet aller-retour du n-ième réflecteur au système radar. Le modèle du système peut s'écrire sous la forme d'une convolution temporelle :

$$s(t) = p(t) * h_0(x) \tag{2.2}$$

où $x=ct/2$ est une fonction linéaire du temps et $h_0(x)$ la réflectivité de l'objet. Le problème d'imagerie est résolu si l'on peut retrouver $h_0(x)$ à partir de la mesure de $s(t)$. Dans l'espace des fréquences temporelles $\omega=2\pi\nu$, (2.2) s'exprime sous la forme d'un produit :

$$S(\omega) = P(\omega) \cdot H_0(k_x) \tag{2.3}$$

$k_x=2\omega/c$ est une fonction linéaire de ω .

Dans la pratique, le signal $p(t)$ est passe-bande : ν appartient à l'intervalle $[\nu_0 - B/2; \nu_0 + B/2]$ où ν_0 et B représentent la porteuse et la largeur de la bande émise. On ne peut alors restituer $H_0(k_x)$ par une simple division de $S(\omega)$ par $P(\omega)$. Cependant, on est capable de reconstruire une version filtrée de $H_0(k_x)$ qui peut être obtenue par un filtrage adapté :

$$H(k_x) = S(\omega) \cdot P^*(\omega) \tag{2.4}$$

P^* étant le complexe conjugué de P . La compression d'impulsion est l'opération de filtrage adapté pour une impulsion à modulation linéaire de fréquences ('chirp') :

$$p(t) = \exp[j(2\pi\nu_0 t + \alpha t^2)] \tag{2.5}$$

$\alpha (= \pi B / \tau_0)$ est la pente du chirp. La résolution en distance radiale, Δx , s'exprime comme suit :

$$\Delta x = c / (\alpha \tau_0 + 2 / \tau_0) \approx c / 2B \tag{2.6}$$

L'imagerie à une dimension ainsi décrite permet de localiser les réflecteurs selon l'axe de visée du radar avec une résolution d'autant plus fine que la bande B émise est grande (analyse à large bande). Elle permet d'estimer la répartition des réflecteurs selon la dimension radiale $h(x)$, appelé profil en distance radiale.

2.2. Imagerie ISAR. L'imagerie à une dimension selon l'axe transverse constitue le deuxième volet du problème à deux dimensions. La figure 1 représente la géométrie de l'observation d'un satellite à partir d'un radar situé à la

surface de la terre. Dans cette géométrie à deux dimensions on utilise une direction de référence $u(0)$ qui désigne la ligne de visée à $T=0$. Cette direction permet de définir l'axe des distances radiales Ox et la direction perpendiculaire définit l'axe des distances transverses Oy . Supposons que le mouvement du satellite est rectiligne et uniforme pendant la durée d'observation ΔT . La décomposition du mouvement sur les deux axes permet une description de deux phénomènes Doppler ([1]).

Le phénomène **Doppler temporel** qui correspond à la composante radiale de la vitesse v_R est caractérisé par sa fréquence ω_D :

$$\omega_D = v_R \sin \phi_0 \omega / c. \tag{2.7}$$

ϕ_0 est l'angle de visée du satellite par rapport au zénith. Ce phénomène n'intervient pas dans l'imagerie ISAR de satellites car on peut considérer que tous les points réflecteurs sont animés de la même vitesse v_R et ont donc le même Doppler temporel. Plus important est le terme de phase résiduelle qui est liée à la forme d'onde choisie. Il est à l'origine de la dégradation de la focalisation de l'image d'où un étalement des points brillants. Lorsque la vitesse radiale est importante (7800 m/s pour un satellite observé à l'horizon : $\phi_0 = \pi/2$) et lorsque le produit de la bande instantanée par la durée de l'impulsion est grand (pour le TIRA du FGAN $BT=200000$), la pente du chirp a varié de manière significative à l'issue de la réflexion. La correction consiste à multiplier les données enregistrées par le facteur de phase correctif $\exp[-j4\alpha v_R t^2 / c]$.

Le phénomène **Doppler spatial** correspond à l'autre composante de la vitesse v_{OR} . Contrairement à v_R qui traduit un éloignement ou un rapprochement, v_{OR} caractérise le mouvement relatif utile pour l'imagerie transverse. Le signal reçu converti en bande de base s'écrit :

$$s(w,t) \exp(-j\omega t) = \exp[-jk(x_0^2 + (y_0 - w)^2)^{1/2}] \tag{2.8}$$

et son spectre G associé est :

$$G(k_w) = \exp[j(k^2 - k_w^2)^{1/2} x_0 + k_w y_0]. \tag{2.9}$$

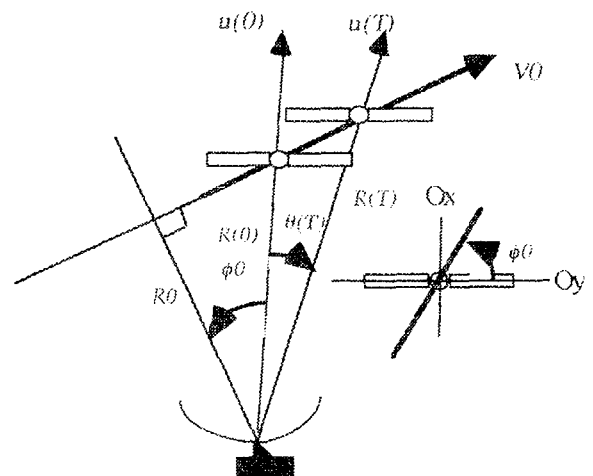


Fig- 1 -. Géométrie en imagerie ISAR.

w désigne la position de l'objet sur la trajectoire, x_0 et y_0 sont les coordonnées du satellite et k_w est la fréquence spatiale, variable duale de w. La transformée de Fourier spatiale du profil en distance transverse de l'objet est définie par :

$$H(k_w) = G(k_w) \exp[-j(k^2 - k_w^2)^{1/2} x_0] = \exp[-jk_w y_0] \quad (2.10)$$

pour $k \sin \theta_1 < k_w < k \sin \theta_2$.

θ_1 et θ_2 sont les positions angulaires de l'objet en début et fin de la durée d'observation. La transformation de Fourier spatiale de $H(k_w)$ conduit au profil en distance transverse:

$$h(w) = 2K_b \text{sinc}(K_b(w+y_0)) \exp[jK_0(w+y_0)] \quad (2.11)$$

où 'sinc' désigne la fonction sinus cardinal ; $h(w)$ est un signal passe-bande de largeur $K_b = k(\sin \theta_2 - \sin \theta_1)/2$ et de porteuse $K_0 = k(\sin \theta_1 + \sin \theta_2)/2$. La résolution en distance transverse Δy est déduite de (2.11) :

$$\Delta y = v_0/2\Delta\theta_{\max} \text{ (en toute rigueur } v_0/2K_b). \quad (2.12)$$

L'imagerie à une dimension ainsi décrite permet de localiser les réflecteurs selon l'axe transverse avec une résolution d'autant plus fine que l'excursion angulaire ($\Delta\theta_{\max} = \theta_2 - \theta_1$) est grande, ou encore que le temps d'intégration ΔT est grand.

Remarque. Des considérations géométriques simples nous donnent l'évolution temporelle de l'attitude angulaire $\theta(T)$:

$$\sin\theta(T) = V_0 T R_0 / R(0) R(T) \quad (2.13)$$

où $R(T)$ est la distance entre le radar et le satellite à l'instant T, R_0 est la distance minimum entre la trajectoire du satellite et le radar (CPA : point d'apparition le plus proche) et V_0 la vitesse du satellite. Pour des observations à grande distance, on peut considérer que la vitesse angulaire est uniforme durant le temps d'intégration :

$$\theta(T) = \Omega(T) T \approx \Omega_0 T \quad (2.14)$$

2.3. Imagerie à deux dimensions. L'association de l'analyse à bande large et de la synthèse d'ouverture inverse permet ainsi d'obtenir des images à deux dimensions à haute résolution. Pour l'imagerie à deux dimensions, on se restreint néanmoins aux conditions réunies de faible excursion angulaire ($\Delta\theta_{\max} < 10^\circ$) et de bande instantanée émise relative étroite ($B/v_0 < 10\%$) pour lesquelles les deux analyses sont découplées. Le radar enregistre cette fois-ci un ensemble de coefficients de rétrodiffusion notés $H(\theta, \nu)$ qui dépendent de la fréquence et de la position angulaire. Dans des conditions idéales (pas de compensation de mouvement à réaliser), la formation de l'image est immédiate : soit par holographie classique, soit par une analyse distance-Doppler ([2]). Cette dernière option conduit au calcul de l'image $I(x, y)$ suivant :

$$I(x, y) = |h(x, y)| \\ = \left| \iint H(\theta, \nu) \exp[4\pi j \nu (x \cos \theta + y \sin \theta)] \nu d\nu d\theta \right| \quad (2.15)$$

L'attitude de l'objet n'est pas fidèlement déterminée au cours du temps d'analyse ΔT . On préfère travailler avec la variable temporelle T plutôt qu'avec la variable θ . D'après (2.14) et en se limitant au premier ordre en T, (2.16) traduit une double transformation de Fourier (TF-2D) :

$$I(x, y) = |TF-2D(\nu H(T, \nu))| \quad (2.16)$$

2.4. Compensation de mouvement. Le but de la compensation de mouvement consiste à corriger les écarts à la trajectoire rectiligne qui sont soit dus à une erreur de désignation d'objet au cours de l'enregistrement (ce type de problème peut être éliminé si le radar d'imagerie est couplé à un radar de poursuite), soit à la case de résolution limitée du radar de poursuite (*a priori* plus grande que la résolution du radar d'imagerie Δx), soit à un phénomène de 'jitter'. Le but de la compensation de mouvement consiste à corriger ces erreurs et à rendre cohérente une succession de coefficients de rétrodiffusion. Dans ce contexte, les données enregistrées représentent les coefficients de rétrodiffusion à un terme de phase dépendant du temps et de la fréquence :

$$S(T, \nu) = H(T, \nu) \exp[-j(\phi(T) + \Delta R(T)k)] \quad (2.17)$$

$\Delta R(T) = R(T) - R_e(T)$ représente l'erreur en distance entre les distances mesurées et réelles. A chaque instant T, le facteur de phase induit une translation et un terme de déphasage constant sur la réflectivité réelle. Il s'agit en fait d'attribuer le centre de référence des phases à la distance $R_e(T)$ au lieu de l'attribuer à un point qui suit la trajectoire du satellite comme par exemple le centre de rotation apparent.

A chaque instant T, la transformée de Fourier inverse des données brutes nous donne un profil en distance complexe ayant un terme de phase constant, $\phi(T)$, et translaté dans la direction Ox de $\Delta R(T)$:

$$TF^{-1}[S(T, \nu)] = h(T, x + \Delta R(T)) \exp[-j\phi(T)] \quad (2.18).$$

Cette translation est plus grande que la résolution souhaitée Δx et a des effets de dégradation dans l'image reconstruite. Parmi les méthodes d'autofocalisation existantes, la méthode proposée effectue simultanément le recalage en distance et la correction en phase. La rotation apparente de l'objet d'une impulsion à l'autre a une variation négligeable. Ainsi la variation de phase due au changement d'attitude est négligeable comparée à la variation de $\phi(T)$. Deux profils complexes adjacents sont alors similaires à un décalage en distance et à un facteur de phase près :

$$h(T+T_r, x) \approx h(T, x + \Delta\rho(T)) \exp[j\Delta\phi(T)] \\ \text{avec } \Delta\rho(T) = \Delta R(T+T_r) - \Delta R(T)$$

$$\text{et } \Delta\phi(T) = \phi(T+T_r) - \phi(T) \quad (2.19)$$

L'estimation de ces deux facteurs correctifs s'effectue par le calcul de la corrélation complexe de ces deux profils ([3]):

$$c(T, x) = [h(T, x + \Delta R(T)) \exp[-j\phi(T)] \odot \\ [h(T+T_r, x + \Delta R(T+T_r)) \exp[-j\phi(T+T_r)]]^* \quad (2.20)$$



© est l'opérateur de convolution. Le maximum de la corrélation donne un estimateur du décalage en distance $\Delta\rho(T) = \max_x |c(x, T)|$ et le terme de phase correspondant à ce maximum nous fournit un facteur correctif de phase $\exp[-j\phi(T)] = c(\Delta\rho(T), T) / |c(\Delta\rho(T), T)|$. Dans la pratique on opère dans l'espace dual où la corrélation se transforme en un produit complexe. Par transformée de Fourier du résultat précédent, on obtient à moindre coût la corrélation des deux profils considérés.

3. APPLICATIONS

3.1. Les systèmes radar. Les signaux radar bruts ont été enregistrés par deux systèmes radar différents :

-le système terrestre TIRA (Tracking and Imaging RADar) du FGAN-FHP situé à Wachtberg-Werthhoven (Allemagne) opère en bande Ku ($\nu_0 = 16.7\text{GHz}$; $B = 800\text{MHz}$; $\tau_0 = 256\mu\text{s}$ et $T_r = 18\text{ms}$) et travaille en polarisation circulaire.

-le système ARMOR embarqué sur le BEM Monge (batiment d'essai et de mesure de la Marine Nationale) travaille dans la bande C avec une bande instantanée environ 4 fois inférieure à celle du TIRA et à une période de répétition, voisine ; il propose deux voies de polarisation linéaires en simultané.

3.2. La chaîne de traitement. Les deux chaînes radar proposent un enchaînement classique pour le traitement de signal. A l'émission, une génération en bande de base est suivie d'une conversion en mode de propagation. A la réception, un deramping électronique précède la conversion en bande de base et la démodulation quadratique. Les données brutes enregistrées sont constituées de 1024 couples (voie I, voie Q) pour les signaux TIRA et d'environ 4 fois plus pour les signaux ARMOR. Ces données sont alors traitées par le traitement ONERA. D'abord, une étape de compensation de mouvement recohère les signaux (§2.4). Puis, les corrections du chirp

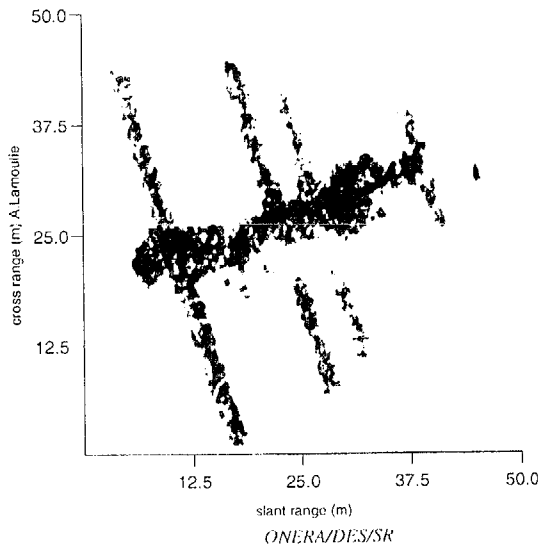


Fig. 2-. Station MIR. Bande Ku. $\Delta x = \Delta y = 25\text{ cm}$.

résiduel (§2.2) sont réalisées pour les signaux du TIRA. Enfin, on effectue la formation de l'image par analyse linéaire classique (§2.3).

3.3. Résultats. Les figures 2 et 3 illustrent la validité de la procédure d'imagerie de l'ONERA par des images représentant la station orbitale MIR. La première correspond à des enregistrements TIRA du 23 juillet 1992, la deuxième à des enregistrements ARMOR du 7 janvier 1995. Les conditions de prise de vue sont proches du CPA. Les niveaux de réflectivité sont exprimés en dB relatif (aucune calibration n'a été réalisée).

4. CONCLUSIONS

Cette chaîne de traitement comporte un protocole complet et simple d'imagerie ISAR. Elle a été validée sur des signaux réels. Les travaux futurs porteront sur une comparaison des méthodes de compensation de mouvement, par exemple entre une méthode paramétrique ([4]) et une méthode d'autofocalisation ([5]). L'utilisation d'outils permettant d'estimer la qualité d'images radars devrait être une préoccupation complémentaire.

Remerciements. Ce travail s'inscrit dans le cadre d'études financées par la DME/ST3S et par la DGA/ETCA. Les auteurs tiennent aussi à remercier MM. HAUTIER et LESUR pour l'intérêt qu'ils portent à ces travaux. Ils remercient MM. J. APPEL et R. GUERN pour leurs conseils.

Références bibliographiques.

- [1] C.C. CHEN & H.C. ANDREWS "Target motion induced radar imaging", IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. Vol. AES-16, 1980, pp 2-14.
- [2] J.L. WALKER "Range Doppler Imaging of rotating Objects", IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst. Vol. AES-16, 1980, pp 23-52.
- [3] D. MEHRHOLZ "Space object observation with radar", Advances in Space Research, Vol. 13, n°8, pp (8)33-(8)42, 1993. Printed in Great Britain. COSPAR 1993.
- [4] J.D.C. MUNSON & R.L. VISENTIN "A Signal Processing View of Strip-Mapping Synthetic Aperture Radar", IEEE Transactions on Acoustics and Signal Processing, Vol. 37, n°12, december 1989.
- [5] A. LAMOULIE & A. VIGNAUD "IMAGERIE ISAR de satellites : traitement des signaux FGAN par autofocalisation", RT n° 11/5169 SY, ONERA, 18 octobre 94.

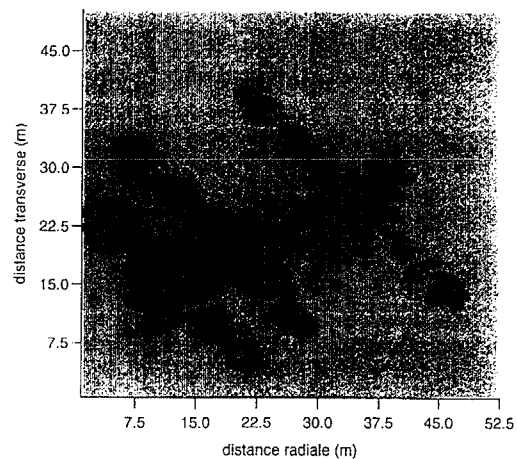


Fig. 3-. Station MIR. Bande C. $\Delta x \approx 1.5\text{ m}$; $\Delta y \approx 35\text{ cm}$.