

Analyse d'images SAR polarimétriques au moyen d'outils temps-fréquence

Paul LEDUCQ, Laurent FERRO-FAMIL, Eric POTTIER

Institut d'Electronique et de Télécommunication de Rennes – Université de Rennes 1
Campus de Beaulieu - Bat 11.D, 263 Avenue Général Leclerc, CS 74205, 35042 Rennes Cedex, France
Equipe SAPHIR - Téléphone : 02 23 23 57 07 – Fax : 02 23 23 69 63
paul.leducq@univ-rennes1.fr, laurent.ferro-famil@univ-rennes1.fr,
eric.pottier@univ-rennes1.fr

Résumé – Cet article illustre l'intérêt des outils temps-fréquences en imagerie SAR au travers de deux applications. Une nouvelle méthode d'analyse des cibles mobiles est présentée. Elle s'appuie sur un algorithme de Matching-Pursuit bidimensionnel et l'utilisation d'un dictionnaire temps-fréquence. Une étude des zones urbaines dans le cadre temps-fréquence est proposée. Le comportement fréquentiel des réflecteurs est mis à profit pour effectuer une classification des zones urbaines à l'aide de deux indicateurs.

Abstract – This article shows the usefulness of time-frequency tools in SAR imagery through two applications. A new method is proposed to analyse moving targets. It uses a two dimensional Matching-Pursuit algorithm, over a time-frequency dictionary. Urban areas analysis is carried on in a time-frequency framework. The behaviour of pixels in the frequency domain is studied and used as an input to two new indicators, allowing a classification of urban areas pixels.

1 Introduction

Les méthodes temps-fréquence sont un outil puissant pour l'analyse de signaux non-stationnaires. Elles sont ici confrontées au problèmes de l'imagerie SAR (Synthetic Aperture Radar). Plus particulièrement, les cas des cibles mobiles et des zones urbaines, dont les comportements sont particulièrement non-stationnaires, sont abordés.

1.1 Principe de formation de l'image

Une image SAR d'une scène utilise une mesure électromagnétique d'une scène sur une large bande de fréquence et pour une large plage d'angles d'observation. L'image SAR est formée en appliquant aux données mesurées la technique de compression d'impulsion. Il s'agit de calculer la corrélation entre les données et une fonction de référence correspondant à la réponse d'un diffuseur ponctuel dont la réflectivité serait indépendante de l'angle d'observation et de la fréquence d'illumination.

1.2 Non-stationnarité en imagerie SAR

L'amélioration de la résolution, s'obtient en élargissant la bande transmise et la plage angulaire d'observation de la scène. L'hypothèse de stationnarité de la scène, c'est à dire d'invariance de la réflectivité des diffuseurs avec l'angle et la fréquence peut alors être mise en défaut. Cet article traite en particulier de deux cas de non stationnarité :

- Les images SAR de cibles ou environnements possédant une réflectivité variable en fonction de l'angle et de la fréquence (structure à réflectivité directive,

phénomène de résonance, ...)

- Le cas de cibles mobiles, dont la position change entre les acquisitions successives de la réponse de la scène par le capteur.

1.3 Intérêt des méthodes temps-fréquence

Suivant l'axe azimut (axe parallèle au déplacement du radar), l'analyse du comportement temps-fréquence d'une cible permet d'observer l'évolution de la réflectivité de celle-ci en fonction de la fréquence Doppler (liée à l'existence d'une vitesse relative entre la cible et le radar). Cette fréquence étant liée à l'angle d'observation et la vitesse de la cible, il est ainsi possible de mesurer le comportement angulaire de la réflectivité de la cible.

De la même façon, l'observation du comportement de la cible en fréquence distance (axe orthogonal à la direction de déplacement du radar) renseigne sur l'évolution de sa réflectivité dans la bande de fréquence émise par le radar.

2 Analyse de cibles mobiles

Le problème des cibles mobiles en imagerie SAR a fait l'objet de nombreuses études [3]. Une nouvelle méthode est proposée ici, permettant non seulement d'identifier les paramètres de mouvement de la cible étudié mais aussi d'analyser le comportement angulaire, fréquentiel et polarimétrique des réflecteurs qui la composent.

2.1 Principe

Cette méthode est basée sur l'algorithme de Matching-Pursuit de Mallat et Zhang [5], qui est étendu au cas de signaux bidimensionnels. Les données analysées (3 images complexes correspondant aux 3 canaux de polarisation) sont alors décomposées sur une famille d'atomes temps-fréquence. Les atomes sont issus de la modélisation de la réponse d'un réflecteur ponctuel de comportement simple (comportement angulaire et fréquentiel gaussien, vitesse constante). Ce modèle conduit à des atomes de la forme d'une gaussienne modulée par une cissoïde dans la direction distance (y) et d'une chirplet gaussienne dans la direction azimut (x), les paramètres des atomes étant reliés aux caractéristiques du réflecteur modélisé.

$$g_\gamma(x, y) = C \exp \left[-\alpha_x \frac{(x - \tau_x)^2}{2} - \alpha_y \frac{(y - t_y)^2}{2} + i \left(\beta_x \frac{(x - \tau_x)^2}{2} + \omega_x(x - \tau_x) + \omega_y(y - t_y) \right) \right] \quad (1)$$

Les atomes sélectionnés peuvent alors être associés à des réflecteurs de l'image dont les caractéristiques se déduisent des paramètres de l'atome.

Afin de s'adapter aux spécificité de l'imagerie SAR, le critère d'arrêt de type énergétique habituellement utilisé est remplacé par un critère polarimétrique d'homogénéité de la zone observée.

2.2 Résultats

La méthode proposée a été validée sur des données simulées et réelles [4]. La figure 1 présente une image SAR polarimétrique d'un ferry mesuré en bande C par le capteur EMISAR sur le site de Storebaelt (Danemark). L'application de la méthode présentée à ces données permet notamment d'estimer la vitesse des réflecteurs de la cible (figure 2). Cette vitesse s'avère être sensiblement identique pour tous les réflecteurs (couleur verte), preuve que ceux ci correspondent à une même cible. D'autres paramètres peuvent être estimés : directivité angulaire (figure 3), comportements fréquentiels et polarimétriques, ...

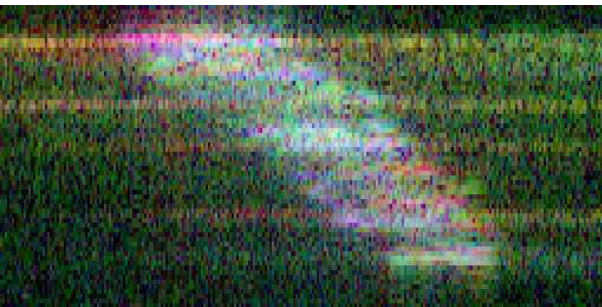


FIG. 1 – Image originale (base de Pauli [1], axe distance vertical, azimut horizontal)

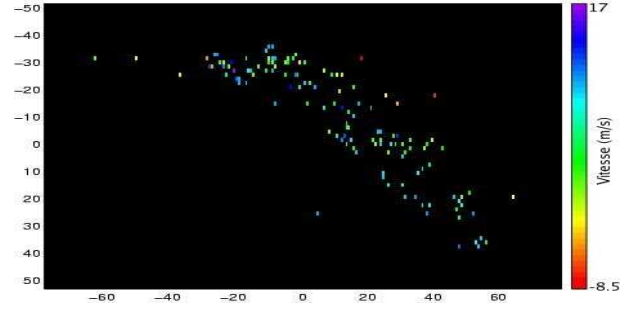


FIG. 2 – Carte des vitesses

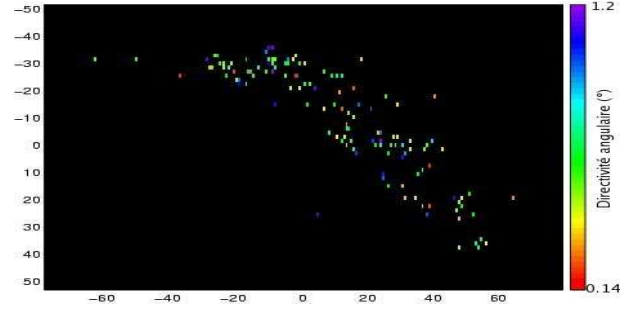


FIG. 3 – Carte des directivités angulaires

3 Etude de zones urbaines

3.1 Principe

Les zones urbaines sont des environnements dont la réponse électromagnétique est complexe, ce qui rend difficile l'analyse des images SAR de ces zones. Sur la figure 4, une image SAR polarimétrique de la ville de Dresde, mesurée en bande L par E-SAR, on peut notamment constater que certains bâtiments (dans le coin inférieur gauche par exemple) ont une réponse différente (beaucoup plus énergétique et de comportement polarimétrique différent) des autres. Cette différence n'est pas liée à la nature des bâtiments mais simplement à une configuration géométrique particulière. Il convient donc de comprendre et de détecter ce type de comportement parasite avant toute analyse.

Il est proposé dans cette partie une méthode, basée sur l'analyse temps-fréquence des images SAR, permettant de caractériser les diffuseurs d'une zone urbaine afin d'en permettre l'analyse. Elle tire partie de la complémentarité entre la stabilité et la stationnarité, matérialisée chacune par un indicateur. Dans les deux cas, l'indicateur est construit à partir d'images de sous-ouverture : il s'agit d'images formées en n'utilisant qu'une portion du spectre total. L'indépendance des images de sous-ouverture est garantie en découpant le spectre en sous-spectres indépendants.

3.2 Sélection des pixels cohérents

Un pixel est supposé cohérent si son comportement est le même dans toutes les images de sous-ouverture. C'est le cas notamment quand une cible de réflectivité élevée domine dans une cellule de résolution. Inversement, un pixel appartenant à une zone naturelle est formé de la somme



FIG. 4 – Image originale (base de Pauli [1], axe distance horizontal, azimuth vertical)

de multiples contributions. Il présentera donc un caractère aléatoire et une cohérence faible. La mesure choisie est basée sur la construction pour chaque pixel de la matrice des cohérences entre sous-ouverture (2).

$$\gamma_{SO} = (\gamma_{ij}) \text{ où } \gamma_{ij} = \frac{\langle X_i X_j^* \rangle}{\sqrt{\langle |X_i|^2 \rangle \langle |X_j|^2 \rangle}} \quad (2)$$

Les valeurs propres $\{\lambda_i\}_{i=1..N}$ de la matrice γ_{SO} sont alors calculées et l'entropie, au sens polarimétrique, est déduite (3).

$$H = - \sum_{i=1}^N p_i \log_N(p_i) \text{ où } p_i = \frac{\lambda_i}{\sum_{i=1}^N \lambda_i} \quad (3)$$

Dans le cas où une cible stable domine, γ_{SO} tend vers une matrice de 1 donc $H \rightarrow 0$. Si le pixel appartient à un milieu aléatoire, les termes non diagonaux sont quasi nuls, γ_{SO} tend vers l'identité donc $H \rightarrow 1$. La normalisation opérée dans (2) permet d'éviter de sélectionner des pixels très anisotropes. En effet en l'absence de normalisation, la présence dans une des images de sous ouverture d'un comportement dominant entraîne une entropie faible, indépendamment de la corrélation entre les sous vues. Après normalisation, les mécanismes cohérents (dont l'amplitude peut varier, mais pour lesquels les sous-ouvertures sont corrélées) sont conservés (entropie faible) tandis que les mécanismes incohérents (sous-ouvertures non corrélées) sont éliminés. L'indicateur présenté en partie 3.3 permettra de différencier parmi les mécanismes cohérents ceux de réflectivité constante de ceux de réflectivité variable.

La figure 5 montre le résultat obtenu en appliquant cette méthode sur les données de la figure 4. La stabilité $\xi = 1 - H$ est calculé pour chacun des canaux de la base de Pauli [1] : en bleu, HH+VV (simple ou triple rebond), en rouge, HH-VV (double rebond), en vert, HV (structure orientée). Cela permet de sélectionner les réflecteurs

stables, mais aussi de les caractériser par leur comportement polarimétrique.

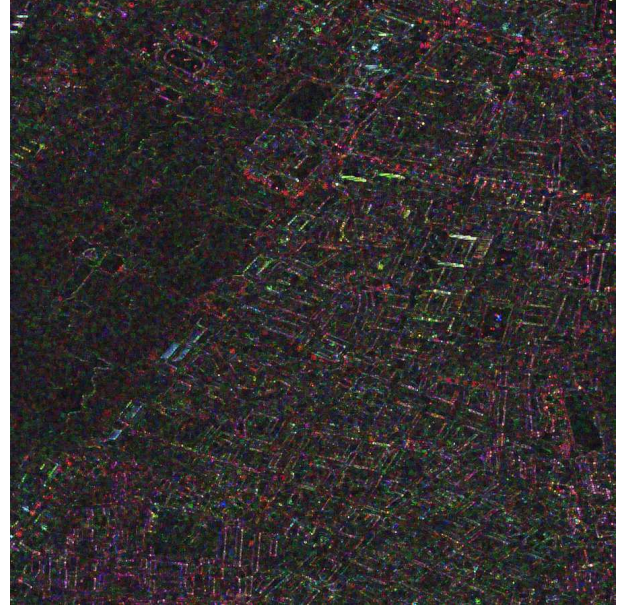


FIG. 5 – Mesure de la stabilité

3.3 Sélection des pixels anisotropes

L'étude des non stationnarités dans la direction azimuth renseigne sur l'anisotropie des réflecteurs. La mesure utilisée pour détecter les pixels anisotropes est fondée sur l'observation pour chaque pixel des matrices de covariance polarimétrique [1] associées aux sous-ouvertures, $\{T_i\}_{i=1..N}$. Les hypothèses $H_0 : \{\text{les matrices } T_i \text{ suivent la même distribution}\}$ et $H_1 = \overline{H_0}$ sont comparées au moyen d'un critère de maximum de vraisemblance. Les matrices de covariance polarimétrique T_i suivent une loi de Whishart, le critère prend donc la forme [2] :

$$\Lambda = \frac{\prod_{i=1}^N |T_i|^{n_i}}{|T_t|^{n_t}} \text{ où } n_t = \sum_{i=1}^N n_i \text{ et } T_t = \sum_{i=1}^N \frac{n_i T_i}{n_t} \quad (4)$$

La figure 6 présente les résultats obtenus sur les données de la figure 4. $\log(\Lambda)$ est affiché, les valeurs les plus faibles sont représentées en blanc, les plus fortes en noire. Cet indicateur met notamment en évidence les bâtiments identifiés sur la figure 4 à la partie 3.1.

3.4 Résultats

Grâce aux deux indicateurs présentés, il est possible de proposer une classification des zones urbaines en quatre classes. Pour cela les indicateurs présentés plus haut sont seuillés. Dans le cas de l'indicateur de stabilité, le même seuil est appliqué aux trois canaux de polarisation. Sont conservées, les points pour lesquels au moins un des canaux dépasse le seuil (il est en effet possible d'observer un mécanisme très cohérent dans un canal et incohérent dans les autres. La figure 7 illustre le résultat de cette classification. Les classes peuvent être interprétées de la façon suivante :



FIG. 6 – Mesure de l’anisotropie

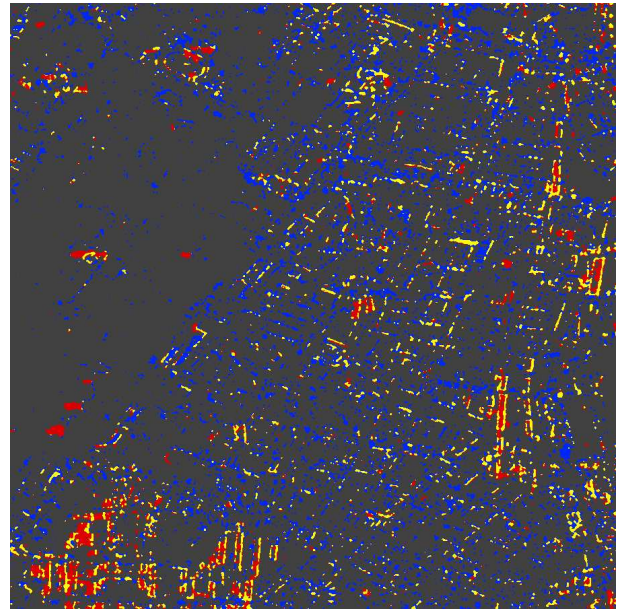


FIG. 7 – Classification des pixels.

- Les zones stationnaires et non cohérentes (gris). Il s’agit en général de zones naturelles ou de zone de faible réflectivité (ombre radar, routes, toits, ...) Dans les zones naturelles, le comportement peut être considéré comme aléatoire. Les valeurs du pixel considéré entre les différentes sous-ouverture ne présente donc ni corrélation, ni d’anisotropie. Les zones de faible réflectivité sont ”parasitées” par les pixels voisins et présentent donc également un comportement aléatoire.
 - Les pixels stables (bleu). Ce sont des pixels cohérents et stationnaires, correspondant à des structures dont le comportement électromagnétique est invariant avec l’angle d’observation (lampadaires, structures en ”coin de cube”, ...)
 - Les pixels anisotropes (rouge). Ils présentent un comportement (notamment polarimétrique) variant avec l’angle d’observation : phénomène de masquage, de résonance.
 - Les pixels cohérents et anisotropes (jaune). Ces pixels correspondent à des cibles dont le mécanisme de rétrodiffusion est le même pendant toute la mesure par le radar, mais dont l’intensité varie. Il s’agit principalement des dièdres formés par l’assemblage mur-sol.
- La figure 7 montre que la méthode proposée permet :
- d’éliminer les zones naturelles (gauche de l’image),
 - de mettre en évidence les contours des bâtiments,
 - de discriminer les bâtiments dont le comportement anisotrope pourrait perturber l’analyse (partie inférieure gauche et droite de l’image).

4 Conclusion

Dans cet article, deux applications des méthodes temps-fréquences à l’imagerie SAR ont été présentées. Une adaptation de l’algorithme de Matching Pursuit a été développée pour analyser les cibles mobiles. Afin d’étudier les zones urbaines, des indicateurs basés sur les propriétés

temps-fréquence des signaux SAR ont été introduits. Ces deux applications illustrent l’intérêt de l’approche temps-fréquence dans le cadre de l’imagerie SAR.

Remerciements

Les travaux présentés font partie d’une étude réalisée pour le CNES.

Références

- [1] S. R. Cloude and E. Pottier, ”A Review of Target Decomposition Theorems in Radar Polarimetry”, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 34, no. 2, pp. 498-518, 1996.
- [2] L. Ferro-Famil, A. Reigber and E. Pottier, ”Scene characterization using subaperture polarimetric SAR data”, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 41, no. 10, pp. 2264-2276, October 2003.
- [3] J. K. Jao, ”Theory of synthetic aperture radar of a moving target”, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 39, no. 9, pp. 1984-1992, September 2001.
- [4] P. Leducq, L. Ferro-Famil and E. Pottier, ”Analysis of moving and non-stationary objects in polarimetric SAR images using Matching-Pursuit”, *Proc. RADAR*, October 2004.
- [5] S. G. Mallat and Z. Zhang, ”Matching pursuit with time-frequency dictionaries”, *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 41, no. 12, pp. 3397-3415, December 1993.
- [6] J.-C. Souyris, C. Henry and F. Adragna, ”On the use of complex SAR image spectral analysis for target detection : assessment of polarimetry”, *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 41, no. 12, pp. 2725-2734, December 2003.