

# Suivi de texture par le Maximum de Vraisemblance dans les images RSO Polarimétriques Haute Résolution

Olivier HARANT<sup>1,2</sup>, Lionel BOMBRUN<sup>3</sup>, Michel GAY<sup>1</sup>, Laurent FERRO-FAMIL<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Grenoble Image Parole Signal Automatique  
961 Rue de la Houille Blanche, 384002 Saint Martin d'Hères, France

<sup>2</sup>Institut d'Électronique et Télécommunication de Rennes  
Rennes, France

<sup>3</sup>Laboratoire de l'Intégration du Matériau au Système, Bordeaux, France

olivier.harant@gipsa-lab.grenoble-inp.fr, lionel.bombrun@ims-bordeaux.fr  
michel.gay@gipsa-lab.grenoble-inp.fr, laurent.ferro-famil@univ-rennes1.fr

**Résumé** – La haute résolution spatiale (HR) des images Radar à Synthèse d'Ouverture (RSO) ouvre de nouvelles perspectives relatives aux méthodes de mesures de déplacement. Nous présentons et généralisons une nouvelle méthode d'estimation de déplacement basée sur le suivi de texture dans les images HR RSO polarimétriques. Après avoir souligné la pertinence de la loi de Fisher pour la modélisation de ces données, un critère de similarité est utilisé pour montrer des résultats sur le déplacement de la surface du glacier d'Argentière dans le massif du Mont Blanc.

**Abstract** – The spatial high resolution of new SAR sensors open new perspectives in displacement measurement. This paper introduces and generalises a displacement estimation method based on the texture tracking in HR PolSAR images. After having highlighted the benefit of the Fisher pdf for texture modeling, a similarity criterion is used for deriving some results about the surface displacement of the Argentière glacier located in the Mont Blanc range.

## 1 Introduction

L'avènement des capteurs RSO HR produit des images terrestres de haute qualité. Les cellules de résolution étant plus petites, le nombre de rétrodiffuseurs au sein de chacune d'elle diminue et l'approximation d'un modèle de fouillis homogène (basé sur le théorème centrale limite) peut être amélioré. Dans ce contexte, un modèle de fouillis hétérogène basé sur les vecteurs aléatoires sphériquement invariant (SIRV) a été développé [1]. Le vecteur de rétrodiffusion polarimétrique  $\mathbf{k} = [S_{HH} \ S_{HV} \ S_{VV}]^T$  peut être décomposé comme le produit d'un terme scalaire positif  $\sqrt{\tau}$  (où  $\tau$  représente la texture) avec un vecteur gaussien complexe  $\mathbf{z}$  (représentant le speckle) de moyenne nulle et de matrice de covariance  $[M] = E\{\mathbf{z}\mathbf{z}^H\} : \mathbf{k} = \sqrt{\tau} \mathbf{z}$ .

Une nouvelle méthode de suivi de texture par maximum de vraisemblance basée sur la modélisation de la texture par des lois de Fisher est proposée. Cette approche généralise la méthode classique basée sur les lois Gamma introduite par Erten *et al.* in [2]. Nous présentons la méthodologie générale du suivi de texture par le maximum de vraisemblance avec en premier lieu l'étape d'extraction de la texture à partir de données RSO HR basée sur le modèle SIRV. La modélisation de la texture est ensuite justifiée et les cas de texture décorrélée et corrélée entre les images sont traités avec une texture

modélisée par une loi de Fisher. La partie 3 détaille quelques améliorations apportées au schéma classique de suivi de texture. Enfin, la partie 4 illustre la méthode avec une application au suivi de la surface des glaciers.

## 2 Méthodologie générale

La méthodologie générale du suivi de texture dans les images RSO polarimétriques, schématisée sur la figure 1, peut être décomposée en trois étapes. Tout d'abord, la texture est extraite du jeu de données RSO polarimétrique. Cette texture est ensuite modélisée pour permettre, dans un troisième temps, de définir un critère de similarité basé sur les statistiques de l'image. Dans cette étude, ce critère est défini comme une vraisemblance.

### 2.1 Estimation de la texture $\tau$

Dans le cadre applicatif de cette étude — en particulier sur l'estimation de déplacement de la surface des glaciers — il est important de souligner le caractère non stationnaire du problème du à la grande variabilité temporelle de la neige et de la glace. Pour s'affranchir de ce problème, bien que la texture sur chaque canal polarimétrique aurait pu être utilisé, il est

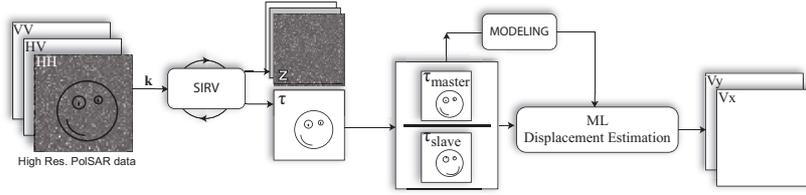


FIGURE 1 – Principe général du suivi de texture dans les images RSO polarimétriques

plus judicieux d'utiliser la texture issue de la décomposition SIRV dans le sens où la puissance est alors normalisée. Le vecteur de rétrodiffusion  $\mathbf{k}$  est donc décomposé en utilisant l'estimateur du point fixe [1]. Cet estimateur permet d'estimer la texture  $\tau$  et la matrice de covariance  $[M]$  du noyau gaussien  $\mathbf{z}$  de manière itérative et quelque soit l'initialisation de  $[M]$ .

Pour une matrice de covariance donnée  $[M]$ , l'estimateur de la texture  $\tau$  au sens du maximum de vraisemblance s'écrit :

$$\hat{\tau}_i = \frac{\mathbf{k}_i^H [M]^{-1} \mathbf{k}_i}{p}, \quad (1)$$

où  $p$  représente la dimension du vecteur de rétrodiffusion  $\mathbf{k}$  ( $p = 3$  dans le cas polarimétrique avec réciprocité).

L'estimateur au sens du maximum de vraisemblance de la matrice de covariance normalisée  $[M]$  existe dans les cas d'une texture déterministe et non déterministe [3].

Pascal *et al.* ont établi l'existence et l'unicité (à un facteur scalaire près) de cet estimé. Dans le cadre de nos applications, l'approximation d'une texture déterministe est satisfaisante. Il est important de souligner la généralité des SIRVs dans le sens où aucune loi n'est spécifiée. Ils décrivent donc tout un ensemble de processus stochastiques dont les lois conventionnelles font partie (Normale,  $\mathcal{K}$ ,  $\mathcal{G}^0$ , KummerU).

## 2.2 Modélisation de la texture $\tau$

Les images RSO en intensité sont couramment modélisées par les lois Gamma mais dans le contexte de la haute résolution spatiale, on peut montrer que les lois de Fisher modélisent mieux ces images et notamment la texture [3]. La loi de Fisher est une loi à trois paramètres définie par :

$$p_\tau(\tau) = \mathcal{F}[m, \mathcal{L}, \mathcal{M}] = \frac{\Gamma(\mathcal{L} + \mathcal{M})}{\Gamma(\mathcal{L})\Gamma(\mathcal{M})} \frac{\mathcal{L}}{\mathcal{M}m} \frac{\left(\frac{\mathcal{L}\tau}{\mathcal{M}m}\right)^{\mathcal{L}-1}}{\left(1 + \frac{\mathcal{L}\tau}{\mathcal{M}m}\right)^{\mathcal{L}+\mathcal{M}}} \quad (2)$$

où  $m$  est un paramètre d'échelle,  $\mathcal{L}$  et  $\mathcal{M}$  sont deux paramètres de forme.

Pour mettre en évidence la pertinence d'une telle modélisation, il est intéressant de réaliser une classification sur le type de modélisation de texture. Une telle classification est illustrée sur

la figure 2. Elle se base sur l'estimation des log-cumulants d'ordre 2 et 3 et de leur classification dans le plan  $\kappa_2/\kappa_3$ . L'image de texture utilisée ici est extraite d'une acquisition TerraSAR-X (TSX) sur le glacier d'Argentière dans le massif du Mont Blanc.

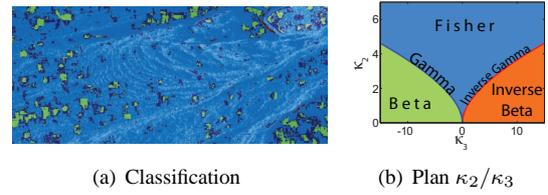


FIGURE 2 – Modélisation de la texture : exemple de classification

## 2.3 Critères de similarité

A partir d'un couple d'images acquises à deux dates différentes, recalées, la vitesse en un point de l'image maîtresse est obtenue par le principe d'estimation suivant :

1. Une fenêtre  $\tau_x$  est extraite dans l'image maîtresse autour de ce point courant. Pour chaque position  $i$  dans un voisinage prédéfini, un critère de similarité est calculé entre  $\tau_x$  et une fenêtre glissante  $\tau_y^i$  extraite de l'image esclave centrée en  $i$ .
2. Les coordonnées du maximum de ce critère relativement au centre du voisinage correspondent au vecteur vitesse.

Afin de prendre en compte les spécificités des images RSO, le critère de similarité est défini comme la vraisemblance du rapport des textures aux deux dates :

$$\vec{v}_{ML} = \underset{i}{\text{Argmax}} L\left(\frac{\tau_x}{\tau_y^i} \mid \theta, \vec{v}_i\right), \quad (3)$$

où  $\theta$  représente les paramètres de la loi  $p_{\frac{\tau_x}{\tau_y^i}}\left(\frac{\tau_x}{\tau_y^i}; \theta\right)$ .

On distingue deux cas : le cas de texture décorrélée entre les images i.e. les deux textures peuvent être modélisées par une même loi de Fisher et le cas de texture corrélée entre les images i.e. les deux textures sont modélisées par deux lois de Fisher différentes. Sous l'hypothèse d'une modélisation par les lois de Fisher, le vecteur de paramètres  $\theta$  représente respectivement dans chacun des deux cas : les paramètres de la loi de Fisher univariée  $[m, \mathcal{L}, \mathcal{M}]$  ou les paramètres de la loi de

Fisher bivariée  $[m_1, \mathcal{L}_1, \mathcal{M}_1, m_2, \mathcal{L}_2, \mathcal{M}_2]$ .

Après avoir défini la densité de probabilité  $p_{\frac{\tau_x}{\tau_y}}$ , les expressions

des vraisemblances  $L\left(\frac{\tau_x}{\tau_y} \mid \theta, \vec{v}_i\right)$  ont été calculées et peuvent être trouvées dans l'article [4].

### 3 Méthode avancée

La méthode classique de suivi de texture présentée précédemment utilise des fenêtres glissantes rectangulaires. Afin de mieux prendre en compte la nature statistique du critère de similarité, il est judicieux d'utiliser une fenêtre glissante adaptative. En outre, le domaine d'application de cette méthode (glaciers) conduit à renforcer la définition du critère de similarité par un modèle d'écoulement. Cette contrainte est introduite avec un formalisme bayésien.

#### 3.1 Fenêtre glissante adaptative

L'utilisation habituelle de fenêtres rectangulaires suppose l'homogénéité statistique de la population. Il est toutefois peu probable que des objets géophysiques tels que les glaciers présentent une telle homogénéité spatiale. L'amélioration proposée consiste en une étape de segmentation préalable de l'image en zones statistiquement homogènes. Étant donné le contexte HR de cette étude, la segmentation hiérarchique basée sur la distribution multivariée de KummerU est appropriée [3]. Une telle segmentation est obtenue à partir d'une segmentation initiale de l'image en blocs de  $10 \times 10$  pixels afin d'avoir une estimation correcte des paramètres des lois tout en conservant une bonne finesse des détails. La figure 4(a) du haut montre un exemple de segmentation d'une zone crevassée du glacier d'Argentière. La vitesse est considérée homogène sur chaque segment. Le choix de l'arrêt de la segmentation est ici arbitraire mais peut être fixé par un seuil [3]. Ce choix est un compromis entre précision et bruit du champ de vitesse. L'exemple présenté ici contient 100 segments.

#### 3.2 Contrainte d'écoulement

Dans le contexte de l'estimation de déplacement d'objets géophysiques tels que les glaciers, nous avons contraint la méthode de suivi de texture par un modèle d'écoulement *a priori*. Soient  $\rho_i$  et  $\theta_i$  les coordonnées polaires du vecteur déplacement  $\vec{v}_i$ , en utilisant le théorème de Bayes, la formulation du problème s'écrit :

$$p\left(\frac{\tau_x}{\tau_y}, \vec{v}_i \mid \tau_x\right) = \frac{p\left(\tau_x \mid \tau_y^i, \vec{v}_i\right) p\left(\tau_y^i \mid \vec{v}_i\right) p\left(\vec{v}_i\right)}{p\left(\tau_x\right)} \quad (4)$$

où le terme *a priori*  $p\left(\vec{v}_i\right)$  peut être réécrit comme :

$$p\left(\vec{v}_i\right) = p_\rho\left(\rho_i\right) p_\theta\left(\theta_i\right) \quad (5)$$

Ces coordonnées polaires sont reliées aux coordonnées cartésiennes (en distance  $v_i^d$  et azimut  $v_i^{az}$ ) par  $\rho_i = \sqrt{v_i^{d2} + v_i^{az2}}$  et  $\theta_i = \text{atan}(v_i^{az}/v_i^d)$ .

Un exemple simple de modèle d'écoulement est celui de la ligne de plus grande pente : aucune contrainte n'est ajoutée sur le module de la vitesse  $\rho_i$  et l'orientation  $\theta_i$  est supposée distribuée normalement avec des valeurs cycliques entre  $-\pi$  et  $\pi$ . La distribution de von Mises (aussi connue sous le nom de distribution normale circulaire) est bien adaptée pour une telle modélisation :

$$p_\theta\left(\theta_i\right) = \frac{1}{2\pi I_0\left(\frac{1}{\sigma_i^0}\right)} \exp\left(\frac{1}{\sigma_i^0} \cos\left(\theta_i - \theta_i^0\right)\right) \quad (6)$$

avec  $\theta_i^0$  la moyenne et  $\sigma_i^0$  la variance,  $I_0$  est la fonction de Bessel modifiée d'ordre 0.  $\theta_i^0$  est la direction de la ligne de plus grande pente calculée à partir d'un Modèle Numérique de Terrain (MNT).

## 4 Résultats

### 4.1 Données simulées

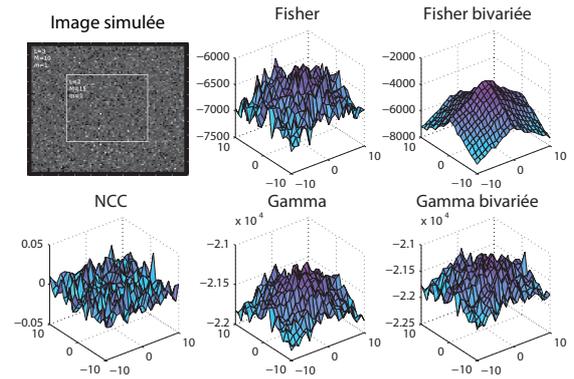


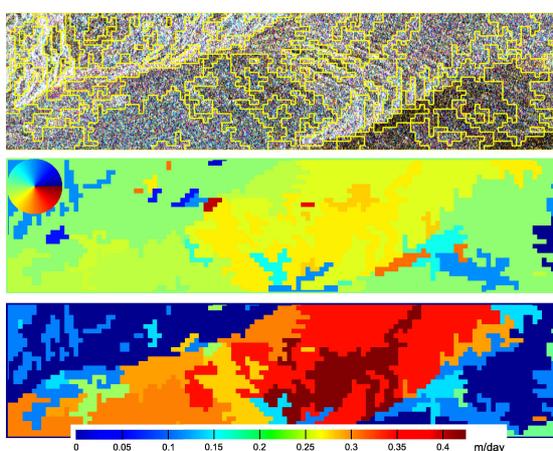
FIGURE 3 – Résultats sur un jeu de données simulées. Surfaces de détection pour différentes modélisations de texture.

Afin de comprendre le comportement des critères de similarité et donc de l'algorithme de suivi de texture, un jeu de données simulées a été généré. Ce jeu est composé de deux zones chacune générée à partir d'une loi de Fisher. L'image a enfin été dégradée par un bruit multiplicatif de type gamma (Figure 3 en haut à gauche). La fenêtre glissante utilisée est de la taille de la zone centrale (rectangle blanc). L'absence de mouvement entre les deux images laisse supposer une surface de détection pyramidale. La figure 3 met en évidence que dans le cas d'une texture corrélée, seul le critère de similarité basé sur une loi de Fisher bivariée est suffisamment robuste. Tous les autres critères sont instables et l'absence d'information de puissance rend le critère de corrélation très bruité et inexploitable. Il convient de souligner le fait que le critère basé sur les lois de Fisher bivariées (cas de textures corrélées) possède un terme

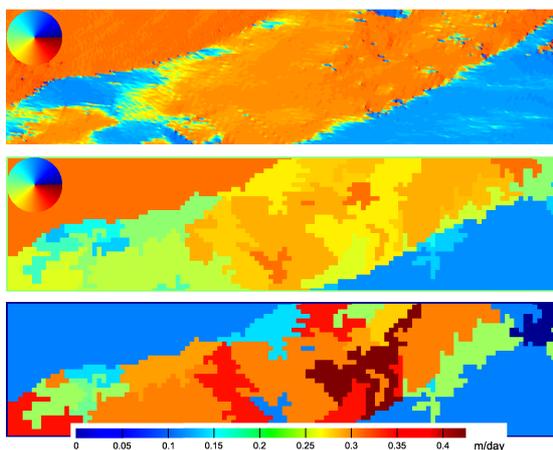
dépendant de l'agencement spatial des pixels. La définition de la fonction de vraisemblance ne prenant pas en compte l'ordre de l'échantillon, ce terme de corrélation renforce le critère.

## 4.2 Données réelles

La méthode de suivi de texture proposée a été testée sur des images TSX dual-pol (HH/HV) acquises sur le glacier d'Argentière dans le massif du Mont Blanc les 06/01/2009 et 08/02/2009. Une région d'intérêt a été choisie dans la zone basse du glacier (Figure 4(a) haut) et offre différentes configurations : une zone de crevasses assez raide ainsi qu'une partie plate et des bords de glacier. Le glacier s'écoule du coin supérieur droit au coin inférieur gauche de l'image. Les rives se situent dans les deux autres coins et sont bien entendu immobiles.



(a) (milieu) Carte d'orientation estimée et (bas) champ de vitesse dans la ligne de visée du satellite.



(b) (haut) Carte d'orientation vraie (MNT), (milieu) carte d'orientation estimée et (bas) champ de vitesse dans la ligne de visée du satellite.

FIGURE 4 – Données TSX dual-pol, 06/01/2009 - 08/02/2009. Estimation des vitesses de la surface du glacier d'Argentière avec segmentation hiérarchique. (a) Sans contrainte d'écoulement et (b) avec contrainte d'écoulement.

L'algorithme de suivi de texture a été appliqué sur les images de texture segmentées en 100 segments. Les résultats de ce suivi de texture adaptatif sont présentés sur la figure 4. La complexité de la distribution du rapport de deux textures et à plus forte raison de sa vraisemblance entrave la définition d'une mesure de qualité de la détection et rend la validation des résultats délicate. Toutefois ces résultats sont cohérents avec la réalité dans le sens où les bords du glacier ont une vitesse nulle alors que la zone crevassée présente une vitesse plus importante. La vitesse décroît ensuite sur la zone plate en aval. Les résultats de la figure 4(a) n'utilise pas la contrainte d'écoulement contrairement à la figure 4(b). L'apport de cette contrainte est bien mis en évidence sur la carte d'orientation (milieu) qui est beaucoup plus proche de la réalité dans le cas contraint. Le champ de déplacement (bas) en est peu modifié. Le modèle d'écoulement utilisé ici est très simple et peu évidemment être amélioré.

## 5 Conclusion

La méthode de suivi de texture par maximum de vraisemblance a été élargie ici au cas d'images RSO HR polarimétriques. Le schéma de la méthode a été complété par l'ajout en amont d'une étape de segmentation afin d'offrir une adaptabilité aux caractéristiques statistiques locales de l'image. D'autre part une contrainte d'écoulement a été implémentée au cœur du critère de similarité avec un formalisme bayésien. L'application sur la mesure de déplacement de la surface du glacier d'Argentière a permis de valider la modélisation de la texture et de mettre en évidence les améliorations apportées par la prise en compte de l'hétérogénéité statistique des images. La contrainte d'écoulement utilisée ici est élémentaire mais peut être facilement remplacée par un modèle plus avancé.

## Références

- [1] F. Pascal, P. Forster, J. P. Ovarlez, and P. Larzabal, "Performance Analysis of Covariance Matrix Estimates in Impulsive Noise," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 56, no. 6, pp. 2206–2216, 2008.
- [2] E. Erten, A. Reigber, O. Hellwich, and P. Prats, "Glacier Velocity Monitoring by Maximum Likelihood Texture Tracking," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 47, no. 2, pp. 394–405, 2009.
- [3] L. Bombrun, G. Vasile, M. Gay, and F. Totir, "Hierarchical Segmentation of Polarimetric SAR Images Using Heterogeneous Clutter Models," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 2010.
- [4] O. Harant, L. Bombrun, G. Vasile, L. Ferro-Famil, and M. Gay, "Displacement estimation by maximum likelihood texture tracking," *Journal of Selected Topics in Signal Processing, JSTSP '11, to appear*, 2011.