

# La phase en imagerie cohérente : application au suréchantillonnage d'images RSO (Radar à Synthèse d'Ouverture)

Renaud FALLOURD<sup>2</sup>, Jean Marie NICOLAS<sup>1</sup>, Emmanuel TROUVÉ<sup>2</sup>, Florence TUPIN<sup>1</sup>

<sup>1</sup>Institut TELECOM, TELECOM ParisTech, LTCI CNRS, 46 rue Barrault, 75634 PARIS Cedex 13, France

<sup>2</sup> LISTIC, Université de Savoie, Polytech'Savoie, BP80439, F74944 Annecy-le-vieux Cedex, France

Renaud.Fallourd@univ-savoie.fr, jean-marie.nicolas@telecom-paristech.fr  
emmanuel.trouve@univ-savoie.fr, florence.tupin@telecom-paristech.fr

**Rsum** – Les images obtenues en imagerie cohérente sont décrites par des pixels complexes. Or, si l'on connaît bien le comportement de la phase d'un signal 1-D complexe, il se trouve que la phase d'une image complexe présente des spécificités liées à sa topologie : en particulier on observe des vortex de phases dès lors que l'on suréchantillonne fortement l'image, et ces vortex de phase se traduisent par des amplitudes nulles. Le but de cet article est d'illustrer ces aspects sur des données de Radar à Synthèse d'Ouverture et d'en montrer certaines conséquences en interférométrie

**Abstract** – Coherent imagery provides images described by complex pixels. Yet, if 1-D complex signal phase has a rather well known behaviour, the 2-D complex data phase owns some specific topological properties : more precisely, phase vortices, corresponding to zero amplitude data, can be pointed out on oversampled images. The aim of this article is to illustrate this specific trend on SAR data, more specifically on interferometric data.

## 1 Introduction

Les images obtenues par des systèmes d'imagerie cohérente (échographie médicale, imagerie laser, RSO –Radar à Synthèse d'Ouverture–, ...) ont généralement la caractéristique d'être complexes : chaque pixel est alors représenté par une partie réelle et une partie imaginaire. On peut aussi représenter chaque pixel par une amplitude et une phase : généralement, c'est l'image d'amplitude qui est présentée à l'opérateur car c'est elle qui est directement interprétable.

Un très grand nombre de travaux ont porté sur l'image d'amplitude. En effet, en raison de l'illumination par des ondes cohérentes, à une zone homogène correspondra sur l'image une région fortement perturbée par le chatoisement (*speckle*). Ce chatoisement peut se modéliser moyennant un certain nombre d'hypothèses : en particulier, on parle de "chatoisement pleinement développé" (ou chatoisement de Goodman [3]) lorsque chaque pixel de l'image est décorrélé de ses voisins. On sait alors que les amplitudes vérifient la loi de Nakagami et que les phases ont une distribution uniforme entre 0 et  $2\pi$ .

Cette uniformité de la distribution de la phase et son indépendance interpixel ont conduit naturellement à ignorer la phase en traitement des images complexes (hormis dans le cas de l'interférométrie –où la phase joue un rôle majeur–, ainsi que pour les traitements d'analyse en sous bandes). Or il est intéressant de noter que la spatialisation de la phase (c'est à dire le fait de disposer de la phase dans un plan, voire dans un volume) a des conséquences importantes qui ont été mises en

évidence dans certaines disciplines :

- un parcours dans le plan complexe est à la base de la théorie des fonctions analytiques [1]. Tout parcours fermé dont l'intégrale le long de ce parcours n'est pas nulle reflète l'existence de résidus et dénote le fait que la fonction analytique n'est pas définie en un point de la surface déterminée par ce parcours.
- la phase n'est connue que modulo  $2\pi$ . Si l'on définit un parcours fermé dans l'espace et que l'on cherche à "déplier" la phase, il existe alors des points de l'espace où deux parcours différents peuvent donner deux valeurs différentes (mais égales modulo  $2\pi$ ). On parle alors de vortex de phase car ceci témoigne d'un point de l'espace où la phase est indéfinie : dans ce cas, à la fois la partie réelle et la partie imaginaire s'annulent. Cette notion a été plus spécialement étudiée dans le domaine ondulatoire car ces vortex reflètent des singularités topologiques [2].
- En interférométrie RSO [5], la phase est directement analysable en terme de relief. Un écueil existe cependant dès lors que deux points voisins de l'espace présentent une différence d'altitude supérieure à "l'altitude d'ambiguïté". Dans ce cas, on observe des "résidus" qui compromettent l'obtention du relief.
- Enfin, en cristallographie, un défaut dans un cristal peut se traduire par une "dislocation" [4]. Par exemple, dans le cas d'une dislocation vis, il existe une ligne dans le cristal où la structure cristallographique n'est plus observable.

Il nous a donc semblé intéressant de nous pencher sur la

phase, et plus particulièrement en analysant des données RSO Haute Résolution comme celles acquises par le capteur Terrasar-X et dont nous disposons sur le site du glacier d'Argentière dans le cadre du projet EFIDIR.

## 2 Analyse des vortex de phase

La première analyse consiste dans la recherche de vortex de phase dans une image complexe, donc dans un espace 2-D. Pour cela nous définissons le parcours le plus simple possible qui consiste à partir d'un pixel et à effectuer un parcours carré sur l'image, en ne prenant en compte que les voisins les plus proches. Ce parcours (4-connexité) ne met en jeu que 4 pixels. Partant du pixel initial, on déroule la phase, puisqu'en chaque pixel, celle-ci n'est connue que modulo  $2\pi$  : pour cela, on calcule, étape après étape, les différences de phase (avec  $\varphi_4 = \varphi_0$  puisque l'on a un parcours fermé) :  $\delta\varphi_i = \varphi_i - \varphi_{i-1} \bmod 2\pi$  et on calcule l'indice de vortex  $n$  :

$$n = \frac{1}{2\pi} \sum_{k=1}^4 \delta\varphi_k$$

$n$  peut prendre 3 valeurs : 0, 1 et -1. Si  $n$  n'est pas nul, on dira que l'on est en présence d'un vortex de phase.

Il est à noter que ce genre de parcours est bien connu en interférométrie radar : c'est celui qui permet de définir les "résidus".

Un calcul aisé montre que si la phase vérifie une distribution uniforme entre 0 et  $2\pi$ , 1/3 des pixels de l'image dénotent de l'existence de vortex de phase : on doit alors observer un taux de vortex de 33,3% sur ce type d'image. Ce résultat a été vérifié sur des images simulées pour lesquelles la phase avait effectivement une distribution uniforme et pour lesquelles le tirage en chaque pixel était indépendant de ses voisins.

Regardons maintenant ce qu'il advient sur des images réelles. Une analyse sur les données Terrasar-X montre que le taux de vortex est aux alentours de 10%. Puisque l'on peut aussi observer sur ces images que la phase suit malgré tout une loi uniforme, on peut donc conclure que les phases ne sont pas indépendantes et qu'il existe donc une certaine corrélation interpixelique. Il est possible de vérifier cette hypothèse en analysant le spectre, qui effectivement n'occupe pas la totalité de la première zone de Brillouin. Le taux de vortex est donc une indication facilement utilisable pour vérifier l'indépendance de la phase, et ainsi l'intercorrélation des pixels.

Analysons maintenant le lien entre corrélation interpixelique et taux de vortex de phase. Pour cela, partons d'une image complexe, dont la phase est indépendante en chaque pixel et suit une loi uniforme sur  $[0, 2\pi]$ . Il est aisé de construire des versions suréchantillonnées par bourrage de zéros (*zero padding*). Les pixels de ces versions sont donc fortement corrélés : on doit s'attendre à ce que le taux de vortex diminue. C'est effectivement ce que l'on observe. En partant d'une image pour laquelle on a effectivement une indépendance de la phase, on construit trois images suréchantillonnées, la première d'un facteur 2, la seconde d'un facteur 4, la dernière d'un facteur 8. Le taux de vortex varie alors comme suit :

Suréchantillonnage	X1	X2	X4	X8
Taux de vortex (en %)	33,3	17,9	12,5	8,6

Il est intéressant de noter que, même si, comme on pouvait le penser, le taux de vortex diminue, le nombre absolu de vortex augmente. Il y a donc sur les images suréchantillonnées deux catégories de vortex :

- ceux qui peuvent être associés à des vortex de phase de l'image initiale et qui reflètent une certaine topologie intrinsèque des données initiales. Suréchantillonner l'image permet alors d'en affiner la position exacte.
- ceux qui ont été rajoutés lors du processus de rééchantillonnage. Il est à noter qu'ils se rajoutent par paire.

Ce sont les premiers qui semblent essentiels : en effet, imaginons deux images dont l'amplitude est la même en tout point et dont seule la phase diffère, celle-ci pouvant vérifier les conditions d'indépendance et d'équidistribution sur  $[0, 2\pi]$ . La différence notable entre les deux images est alors le nombre et la position des vortex de phase. Or un vortex de phase indique l'existence d'un point dans l'image continue où l'amplitude est nulle. Positionner différemment les vortex de phase reflète des positions différentes pour les zéros de l'image continue.

## 3 Données suréchantillonnées

L'analyse effectuée dans le précédent paragraphe peut être illustrée en étudiant le processus de rééchantillonnage d'une image complexe. Considérons une mire, constituée de carrés imbriqués les uns dans les autres, dont les amplitudes sont constantes à l'intérieur de chaque carré et variables d'un carré à l'autre.

- Si l'on suréchantillonne l'image d'amplitude et si on observe une partie (figure 1.a), on peut s'attendre à avoir une image fortement marquée par un filtrage passe bas, avec de légères variations d'amplitude liées au phénomène de Gibbs (figure 1.b).
- Si l'on suréchantillonne l'image complexe (figure 1.c), on voit apparaître des zones de faible amplitude (voire d'amplitude nulle ou voisine de zéro). Ces zones d'allure serpenteiforme entourent des maxima locaux dont la valeur est proche de l'amplitude de l'image initiale.
- En comparant le suréchantillonnage de deux images initiales d'amplitudes identiques mais de phases différentes (figures 1.c et 1.d), on peut observer que les deux résultats du suréchantillonnage diffèrent suffisamment pour qu'un contrôle visuel (donc uniquement sur l'amplitude, sans prendre en compte la phase) montre que ces images sont fondamentalement différentes (hormis une valeur moyenne à peu près constante).

## 4 Application à l'interférométrie RSO

L'expérimentation suivante va illustrer le lien entre la phase d'une image complexe et l'aspect de l'image en amplitude suréchantillonnée. Pour cela, prenons un couple d'images RSO

Terrasar-X en configuration interférométrique, acquis sur le glacier d'Argentière (image en *slant range*). Sur la figure 2, nous voyons la zone imagée le 29 septembre 2008 et le 10 octobre 2008. L'image de cohérence et l'image de phase ont été établies par produit hermitien moyenné sur une fenêtre 3x3. On peut noter que la cohérence est forte sur les berges du glacier alors qu'à la surface du glacier, à cause des modifications de l'état de surface sur 11 jours, il y a perte totale de cohérence.

Considérons une imagerie des berges du glacier (zone fortement cohérente). Les images d'amplitude des imageries présentent des similitudes observables par un photointerprète (figure 3, ligne supérieure), tant sur la donnée initiale que sur la donnée suréchantillonnée (en complexe) d'un facteur 8. En revanche, sur le glacier (où il y a perte de cohérence entre les deux dates d'acquisition), les images d'amplitude des imageries présentent toujours une ressemblance globale tandis que les données suréchantillonnées d'un facteur 8 n'ont aucune ressemblance visuelle (figure 3, ligne inférieure).

## 5 Conclusion

On voit ainsi que la notion de vortex de phase permet une nouvelle approche de la phase d'une image complexe. Pour des vortex de phases différents, sera associée alors une image rééchantillonnée différente ce qui conduit à une sorte de lecture de la phase d'une image complexe par le biais de l'affichage de l'amplitude de l'image rééchantillonnée.

Cette première analyse débouche sur plusieurs pistes utilisables en traitement des images, et qui ne sont ici qu'ébauchées :

- Effectuer une image de cohérence (calculée à partir du produit interférométrique par exemple) est toujours difficile à interpréter car les lois de l'amplitude de la cohérence sont toujours redoutables à analyser correctement (ce sont des fonctions hypergéométriques sur lesquelles l'intuition est souvent prise en défaut). Or il semble qu'il existe des relations entre ce calcul du produit interférométrique et la mesure de la corrélation entre les données en amplitude d'images suréchantillonnées.
- Dans le cas d'un capteur à synthèse d'ouverture (RSO, Sonar, ...), on peut penser qu'en absence de "vrai" signal, le bruit thermique – dont la statistique est identique à celle du speckle – puisse être discriminé. En effet, puisqu'à chaque tir, il est fondamentalement différent, dans une telle zone sur l'image, la statistique des vortex devrait changer par rapport à des zones imagées pour lesquelles il existe toujours une corrélation interpixellique.
- Enfin, la position intrapixellique des maxima locaux dépend fortement des caractéristiques de la phase, point qui devrait être approfondi pour l'étude des réflecteurs permanents en interférométrie.

Des travaux sont en cours sur les images Terrasar-X pour illustrer ces différents aspects.

Ce travail a été effectué dans le cadre du projet EFIDIR (ANR/MDCO/2007).

## Références

- [1] H. Cartan *Théorie élémentaire des fonctions analytiques d'une ou plusieurs variables complexes*. Hermann, 1961
- [2] M. Dennis *Topological singularities in wave fields*. Phd, University of Bristol, 2001
- [3] J.W. Goodman *Speckle phenomena in optics : Theory and applications..* Roberts & Company, 2007.
- [4] C. Kittel *Introduction à la physique de l'état solide*. Dunod, 1972
- [5] D. Massonnet & J.C. Souyris *Imaging with Synthetic Aperture Radar* EPFL Press, 2008

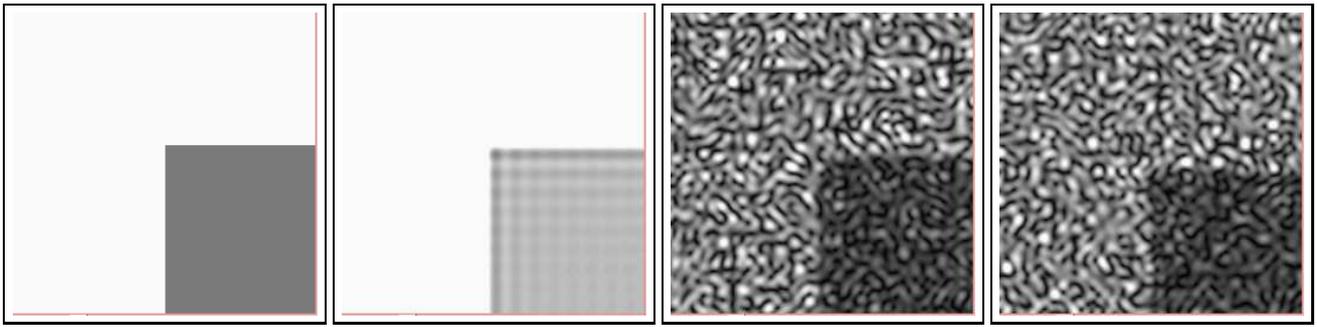


FIG. 1 – Effets de la phase sur le rééchantillonnage d’une mire complexe (phase aléatoire). De gauche à droite : portion de mire initiale (1.a), rééchantillonnage en amplitude (1.b), rééchantillonnage en complexe (1.c), second rééchantillonnage en complexe (autre tirage aléatoire, 1.d). Les images d’amplitude suréchantillonnées (1.c et 1.d) sont visuellement différentes.

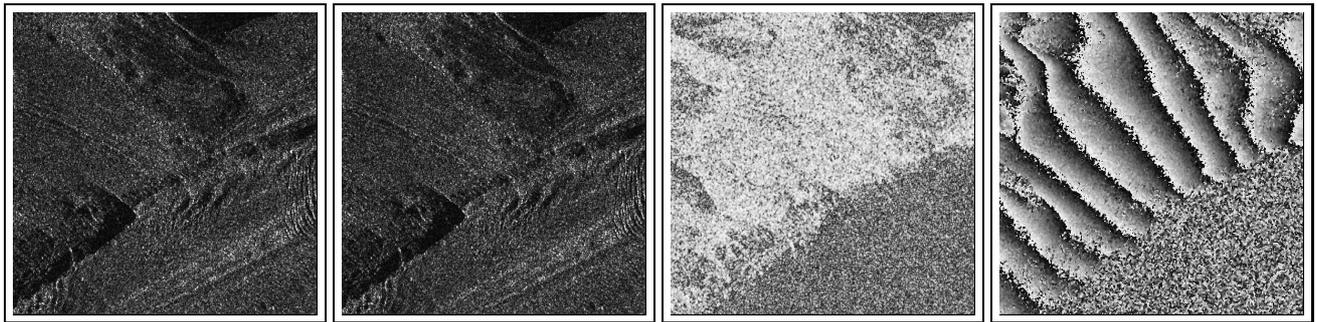


FIG. 2 – De gauche à droite : Images TerraSAR-X acquises le 29 septembre 2008 et le 10 octobre 2008, images de cohérence et de phase interférométriques (fenêtre 3x3). Ces données ont été acquises sur le glacier d’Argentière : les berges sont fortement cohérentes tandis que la surface du glacier est fortement incohérente (modification de l’état de surface entre les deux acquisitions).

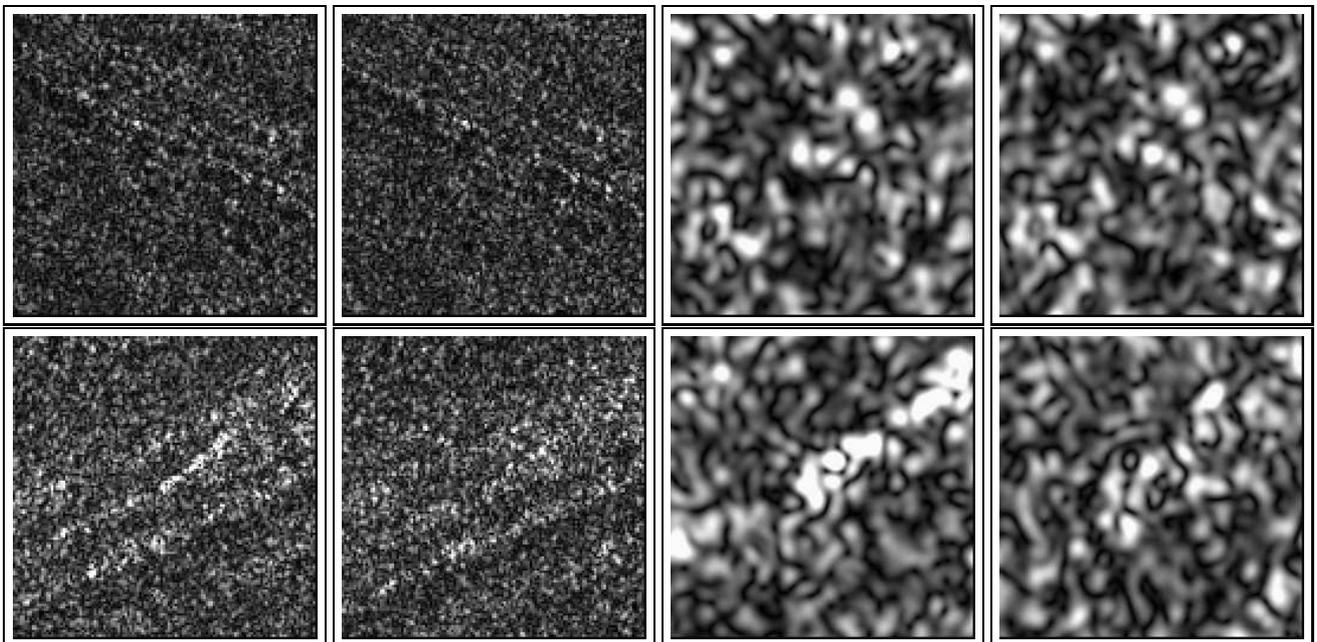


FIG. 3 – Ligne supérieure : imagerie des berges du glacier (zone fortement cohérente). Ligne inférieure : imagerie de la surface du glacier (zone sans cohérence). A gauche, les deux acquisitions du 29/09/08 et du 10/10/09. A droite, suréchantillonnage complexe (facteur 8) correspondant aux deux dates d’acquisition. Les linéaments sombres (propres aux vortex de phase) entourant les maxima locaux ne sont similaires que sur les données cohérentes (rive du glacier)