

MODELISATION DES SYSTEMES INTERFEROMETRIQUES A OUVERTURES SYNTHETIQUES (INSAR) ET RESOLUTION DE L'ELEVATION TOPOGRAPHIQUE

Reçu le 18/02/2003– Accepté le 28/08/2005

Résumé

Le radar interférométrique à antennes synthétique (InSAR) est une technique de la télédétection utilisée pour l'imagerie. Cette technique composée de deux antennes permet de mesurer l'élévation de la surface topographique à partir de la résolution de phase. Nous proposons dans cet article le traitement du problème de l'influence de la distance transversale, l'orientation de la ligne de base interférométrique, ainsi que la résolution de l'élévation par rapport à la résolution transversale d'un SAR conventionnelle et son ambiguïté afin de choisir les paramètres optimaux de l'interféromètre et par conséquent l'amélioration de la surface topographique.

Mots clés : SAR, InSAR, résolution, l'élévation topographique, phase interférométrique.

Abstract

Synthetic aperture radar interferometry (InSAR) is the synthesis of conventional SAR techniques and interferometry techniques. InSAR is a remote sensing and an imaging technique is composed by two antennas, for measuring topography of a surface, and its changes over time by exploiting the phase resolution. In this work we have studied the influence of the horizontal distance of the images pixel, also the tilt of the interferometric baseline. In order to choose the optimum parameters and so greater accuracy of topographic surface.

Keywords: SAR, interferometric radars (inSAR), resolution, topographic elevation, unwrapping phase.

F. MAAMRI
M. KERMANI
M. BENSLAMA

Laboratoire
d'Electromagnétisme et
Télécommunications. Université
Mentouri Constantine. Algérie.

ملخص

إن تقنية التداخل بالنسبة للهوائيات ذات الفتحة المركبة و المستعملة في التقاط الصور الخاصة بسطح الأرض تسمح بقياس تغيرات الطبقة السطحية وهذا بالمحافظة على تغير في الطور بين الإشارة المستقبلية من طرف كل من الهوائيين أقل من تحليل الطور. لقد قمنا في هذا العمل بدراسة تأثير الإحداثيات الأفقية للعنصر الملتقط و الإتجاه المناسب للمحور الفاصل بين هذين الهوائيين.

الكلمات المفتاحية: الرادار ذو الفتحة التركيبية، تحليل الطور، الإرتفاع الطبوغرافي.

L'imagerie radar nécessite des images de très haute résolution. Le radar à antenne synthétique « SAR » répond en grande partie à cette préoccupation [1] ; l'imagerie radar à antenne synthétique permet d'obtenir des images bidimensionnelles avec une haute résolution au sol quelles que soient les conditions diurnes ou nocturnes [2].

L'utilisation de deux antennes SAR ouvre l'accès à des images à trois dimensions par le développement des systèmes interférométriques [3] : l'interférométrie à ouverture synthétique « InSAR » met en valeur la recherche des applications géophysiques telles que la sismologie, la volcanologie ; et elle joue un rôle croissant en fournissant des données topographiques digitales pour une variété d'utilisateurs.

Le système interférométrique InSAR exige que les données proviennent de deux antennes montées sur le même avion ou sur le même satellite ou bien utilise les données de deux survols de la même plate-forme et ça ne nécessite qu'une seule antenne. Graham fut le précurseur des systèmes InSAR appliqués à des observateurs terrestres [4]. Ces systèmes sont basés sur l'interférométrie, dont le principe est la mesure de la phase relative des signaux reçus en faisant enregistrer les variations d'amplitudes au niveau des deux antennes [5]. Suite aux travaux de Graham, Zebker et Goldstein [6] ont fait la première démonstration d'un tel système et ceci pour une plate forme aéroportée. Goldstein et autres ont amélioré l'étude pour une plate forme spatiale [7]. Les radars interférométriques à ouvertures synthétiques « InSAR » ont prouvé leur capacité de localisation d'un pixel par utilisation de la mesure de la hauteur ou l'élévation d'un pixel en utilisant la mesure de la résolution de phase interférométrique. La différence de phase de deux signaux provenant de deux antennes séparées par une distance appelée ligne de base (B), est proportionnelle à l'élévation (h) de la zone illuminée.

La phase des signaux reçus, déduite de la géométrie de l'observation, est perturbée par les mouvements parasites du porteur pendant la prise d'images ou par les bruits qui diminuent le rapport signal sur bruit et ainsi par le fait de ne pas prendre en compte la géométrie exacte du terrain observé.

La connaissance requise de l'élévation de la surface terrestre fait appel aux radars interférométriques à ouverture synthétique (InSAR) (**Fig.1**).

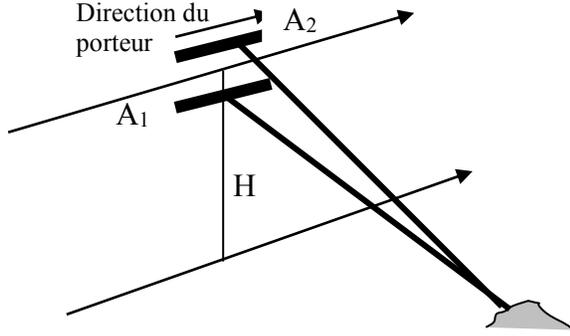


Figure 1: principe d'un radar à antenne.

L'objectif de cet article est de déterminer les paramètres optimums de l'interférométrie tels que la distance de la ligne base interférométrique (B) entre les deux antennes et son orientation par rapport à l'horizontal (α) (Fig.2), ceci nous permet d'améliorer la résolution de l'image ainsi que la distance (X). De cette manière nous pouvons réduire l'effet de la courbure de la terre qui influe elle-même sur la résolution de l'image [9]. L'ambiguïté Doppler reste cependant un souci des chercheurs dans le domaine du SAR, on peut à juste titre citer les derniers travaux de Mengdao qui consacre tout un article à la confirmation du problème [10]. Nous avons repris certains de ses résultats pour proposer une approche du SAR dans le cas des constellations de Microsatellites.

PRINCIPES ET EQUATIONS DE BASE

La géométrie de base d'un diffuseur radar est donnée par la **figure 2** :

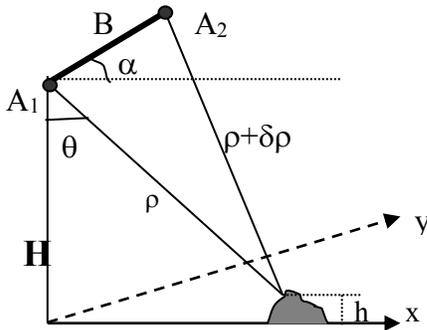


Figure 2: la géométrie de base d'imagerie par interférométrie SAR.

L'élévation est calculée à partir de l'équation suivante :

$$h = H - \rho \cos \theta \quad (1)$$

La valeur de la phase approximative donnée par [4] est telle que :

$$\phi = \frac{4\pi}{\lambda} B \sin(\theta - \alpha) \quad (2)$$

avec:

$$\theta = \arcsin\left(\frac{\lambda \phi}{4\pi B}\right) + \alpha \quad (3)$$

En utilisant la figure (Fig. 2), la valeur inconnue de la topographie $h(x)$ en termes de phase observable et paramètres de système radar, est exprimée par la relation suivante :

$$h(x) = \frac{\left[\left(\frac{\lambda \phi}{2\pi}\right) - B^2\right]}{2B \sin(\alpha - \theta) - \left(\frac{\lambda \phi}{2\pi}\right)} \cos \theta \quad (4)$$

La grandeur mesurée de la différence de phase entre les deux antennes est directement proportionnelle à $(\delta\rho)$, avec la constante de proportionnalité $2\pi/\lambda$:

$$\phi = \frac{2\pi}{\lambda} \delta\rho \quad (5)$$

AMBIGUITE DE L'ELEVATION

Un paramètre utilisé souvent dans l'analyse et la caractérisation des systèmes SAR interférométriques est l'ambiguïté de l'élévation. Le changement total de cette élévation est dû au changement de la phase.

L'ambiguïté de l'élévation (h_a) définie par :

$$h_a = 2\pi \frac{\partial h}{\partial \phi} = \frac{\lambda \rho \sin \theta}{2B \cos(\theta - \alpha)} \quad (6)$$

Pour minimiser la valeur de l'ambiguïté, il faut agir sur les paramètres du système interférométrique tels que la ligne de base interférométrique (B) entre les deux antennes (A_1) et (A_2), l'angle que fait cette ligne avec l'horizontal (α), l'angle de l'élévation (θ), ainsi que la portée de la première antenne (ρ) et la longueur d'onde du signal radar (λ).

Connaissant les valeurs des paramètres du radar interférométrique (B) et (λ), on peut tracer l'allure de l'ambiguïté (h_a) en fonction de l'angle de l'élévation (θ) (Fig.3).

D'après la figure (**Fig.3**), nous remarquons que :

1. pour $\alpha = 1.55$ (rad), l'ambiguïté de la hauteur (h_a) a des valeurs grandes pour les petits angles d'élévations (θ).
2. pour un petit angle d'inclinaison (α), l'ambiguïté de la hauteur (h_a) a de faibles valeurs quelque soit la valeur de l'angle d'élévation (θ).

Nous pouvons donc constater que l'angle d'inclinaison (α) doit avoir approximativement des valeurs comprises entre 0 et $\pi/4$.

la distance à partir du diffuseur à la deuxième antenne est donnée par :

$$(\rho + \delta\rho) = \sqrt{(x - \Delta x)^2 + (y)^2 + (h - H - \Delta z)^2} \quad (7)$$

$$\text{où : } \Delta x = B \cos \alpha ; \quad \Delta z = B \sin \alpha$$

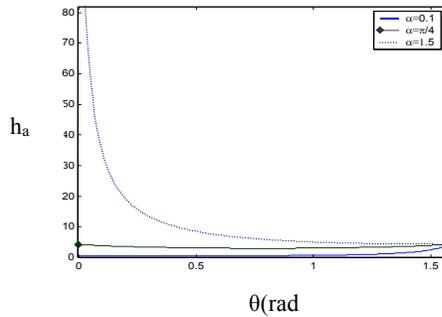


Figure 3: La variation de l'ambiguïté h_a en fonction de l'angle de l'élévation θ .

L'élévation est déterminée par la connaissance de la différence de phase exacte entre les signaux reçus par les deux antennes de l'interféromètre. Le radar à antenne synthétique permet de localiser un élément de résolution en utilisant la valeur de l'élévation. L'erreur dans l'élévation de la surface considérée, engendrera une erreur dite transversale dans la localisation de l'élément de résolution. La largeur de l'élément de résolution (pixel réel) dans le cas d'un SAR dans la direction transversale est déterminée principalement par la résolution en portée [9] :

$$\sigma_x = \frac{\rho}{x} \left(1 - \frac{y^2}{\rho^2} \right) \sigma_\rho \quad (8)$$

où ρ : distance entre la première antenne et le diffuseur

x : distance transversale

y : distance azimutale

σ_ρ : résolution en portée

La largeur du pixel virtuel dans le cas du système InSAR dans le plan de référence $z=0$ [9] est donnée par :

$$\sigma_x \cong \sigma_{\delta\rho} \frac{\rho^3}{H |H\Delta x + x\Delta z|_{y=0, h=0}} \quad (9)$$

Selon les mêmes conditions, on obtient pour le pixel réel :

$$\sigma_x \cong \sigma_\rho \frac{\rho}{x}_{y=0, h=0} \quad (10)$$

Le rapport de la résolution en fonction de la distance transversale normalisée (x/H) et l'angle d'orientation de la ligne de base interférométrique sont donnés par l'expression suivante :

$$x_{\text{rapport}} = \frac{\sigma_\rho B}{\sigma_{\delta\rho} H} \frac{\left| \frac{\cos \alpha}{x/H} + \sin \alpha \right|}{1 + \left(\frac{x}{H} \right)^2} \quad (11)$$

$y=0, h=0$

La résolution transversale pour les antennes InSAR diffère de la résolution obtenue par une seule antenne SAR, la variation de celle-ci est reportée sur la figure intitulée (Fig. 4).

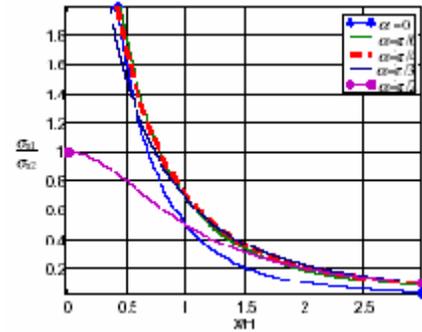


Figure 4: Rapport de la résolution transversale entre le cas « SAR »

et le cas « InSAR » en fonction de (x/H), $\frac{\sigma_\rho B}{\sigma_{\delta\rho} H} = 1$

Celle-ci montre que le rapport de la résolution transversale varie en fonction des paramètres de l'interféromètre [11], telles que : la distance transversale dans la direction d'illumination du radar (x), l'angle d'orientation de la ligne de base interférométrique (α) et sa longueur (b), tout en gardant les mêmes valeurs de la résolution en portée (σ_ρ) et la résolution (σ_ρ) ainsi que l'altitude du porteur du radar H :

1 Si la valeur normalisée (x/H) est supérieure ou égale à 0.786, le rapport (σ_{x1}/σ_{x2}) est inférieur à 1, il s'ensuit que la résolution d'un radar InSAR est plus meilleure que celle d'un radar SAR.

2 Si la valeur normalisée (x/H) est supérieure ou égale à 0.786, le rapport (σ_{x1}/σ_{x2}) est inférieur à 1 pour les grandes valeurs de l'angle d'orientations α ($\alpha > 80^\circ$ pour $x/H=0.5$).

3 L'augmentation de la longueur de la ligne de base interférométrique nous donne une augmentation de la valeur critique (x/H).

LA VARIATION DE LA RESOLUTION DE L'ELEVATION TOPOGRAPHIQUE

Massonet et Rabaute ont trouvé la valeur du changement de l'élévation et l'ont défini comme suit [11]:

$$\delta h = H - \left[H^2 - 2x\delta\rho \frac{\rho}{H \cos \alpha} - \delta\rho^2 \left[\frac{H}{\cos \alpha} + \left(\frac{\rho}{H \cos \alpha} \right)^2 - \frac{\delta\rho^2 \frac{\rho}{H \cos \alpha} - \frac{\delta\rho^4}{4(H \cos \alpha)^2}}{\delta\rho^2} \right] \right] \quad (12)$$

Par la suite, ils ont développé une approximation du premier ordre de la relation entre le changement de la différence de distance ($\delta\rho$) de l'interféromètre et le changement correspondant de l'élévation :

$$\delta h = \delta\rho \left(\frac{x\rho}{HB \cos \alpha + xB \sin \alpha} \right) \quad (13)$$

En utilisant cette équation, nous pouvons donner la relation de la résolution de la hauteur (σ_h).

$$\sigma_h = \frac{\sigma_{\delta\rho}}{B} \left(\frac{x\rho}{H \cos \alpha + x \sin \alpha} \right) \quad (14)$$

où : $\rho = \sqrt{x^2 + y^2 + H^2}$ (15)

La résolution de la hauteur (σ_h) dépend de la variation de la distance transversale (x), la variation est montrée sur la figure (Fig. 5).

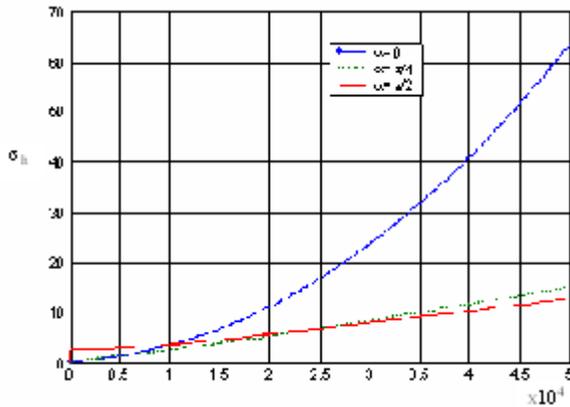


Figure 5: La résolution de la hauteur σ_h en fonction de la distance transversale x, y=0.

A partir de cette figure, nous constatons que :

- 1 Si on travaille sur une large distance transversale (x), la résolution de la hauteur (σ_h) prend une grande valeur lorsque la ligne de base interférométrique fait un angle d'inclinaison $\alpha=0$ avec l'horizontal.
- 2 La figure (Fig. 5), montre que l'angle d'inclinaison (α) nous donne une meilleure résolution de la hauteur pour les valeurs de (α) variant entre $\pi/4$ et $\pi/2$ [11].

La variation de la distance transversale (x) en fonction de la distance azimutale (y) est donnée par cette expression

$$x = \sqrt{\left(\frac{\sigma_{\rho} B}{\sigma_{\delta\rho}} \right)^2 \left(\frac{H \cos \alpha + y \sin \alpha}{y} \right)^2 - (y^2 + H^2)} - y \quad (16)$$

La distance transversale vis-à-vis la variation de la distance azimutale et en gardant la même valeur de la résolution de la hauteur est reportée sur la figure (Fig.6) pour $\alpha=\pi/2$.

Selon la figure (Fig.6), nous constatons que l'influence de la distance azimutale est plus ou moins importante suivant la valeur de la résolution de la hauteur (σ_h) et dépend également de l'angle d'orientation de la ligne de base (α) :

- 1 Pour (σ_h) supérieure ou égale à 6m, l'influence de la distance azimutale est moins importante, donc la variation de phase de l'interféromètre n'est pas sérieusement dégradée par l'effet de la courbure de la terre.

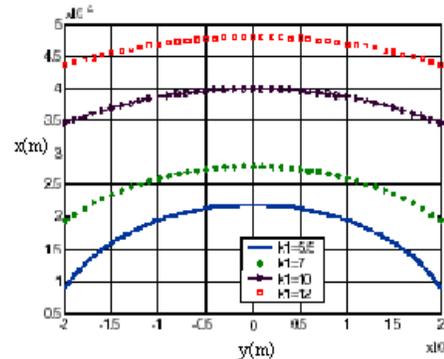


Figure 6: L'allure de la distance transversale (x) en fonction de la distance azimutale (y) pour différents paramètres de $k1 = \sigma_h$, $\alpha = \pi/2$.

RAPPORT DE LA RESOLUTION TRANSVERSALE ET DE LA RESOLUTION DE LA HAUTEUR

Pour un interféromètre dans le plan horizontal, la relation entre la résolution de la hauteur et la résolution transversale est donnée par cette équation :

$$\frac{\sigma_h}{\sigma_x} = \frac{\sigma_\rho B}{\sigma_{\delta\phi} H} \frac{\left| \cos \alpha + \frac{x}{H} \sin \alpha \right|}{\left(\frac{x}{H} \right)^2} \quad (17)$$

$y=0, h=0$

Nous pouvons également voir l'allure du rapport entre la résolution de la hauteur d'un interféromètre et la résolution transversale d'un SAR conventionnel. la dépendance en fonction de (α) est montrée par la figure (Fig.7).

Au niveau de la figure (Fig.7), nous remarquons que lorsque la distance (σ_h) a des petites valeurs pour des grands angles d'orientation de la ligne de base (α) .

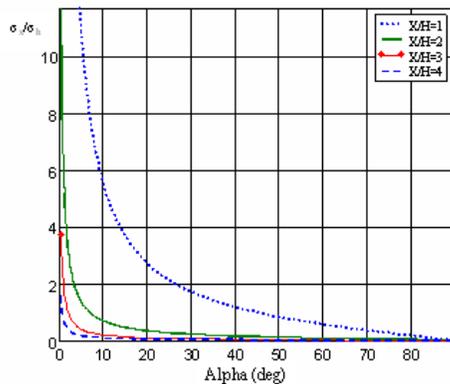


Figure7: Rapport de la résolution transversale et la résolution de la hauteur en fonction de α .

CONCLUSION

Dans cet article, nous avons présenté l'influence des paramètres de l'interféromètre sur l'amélioration de la résolution du radar qui permet effectivement d'améliorer les images topographiques. Nous avons donc constaté que :

1. les antennes InSAR utilisées pour mesurer l'élévation d'un pixel ou un élément de résolution, permettent de donner la localisation de ce dernier.
2. les paramètres de l'interféromètre, tels que la ligne de base interférométriques entre les deux antennes et sa longueur, ainsi que la distance transversale du point illuminé influent sur la résolution. Donc la nécessité d'avoir les paramètres optimums pour donner une meilleure exactitude de la mesure.

En utilisant la différence de phase (Φ) , les systèmes interférométriques permettent de mesurer l'élévation topographique pour donner une image à trois dimensions.

Des limites de fonctionnalité apparaissent dans l'InSAR, en particulier pour celui qui est dédié la télédétection, l'imagerie ainsi qu'en géophysique de subsurface. Pour remédier à cet handicap et optimiser par voie de conséquence le traitement de tels systèmes, il faut améliorer

la résolution.

Le système InSAR est utile pour apprécier la troisième dimension (l'élévation topographique), pour pouvoir obtenir une meilleure précision de l'élévation, on aura cependant besoin de déterminer les paramètres optimums caractérisant le système InSAR.

Parmi ces paramètres nous avons appuyé notre recherche sur :

1. l'influence de l'angle d'inclinaison de la ligne de base qui sépare les deux antennes.
2. l'ambiguïté de la phase interférométrique qui influe elle-même sur l'ambiguïté de l'élévation et donc sur la résolution de l'élévation.

Nous avons constaté d'une part que :

- si on prend une image de la surface terrestre avec un angle d'inclinaison $\alpha=\pi/2$, l'ambiguïté de l'élévation augmente pour les petites valeurs de l'angle d'élévation θ et donc pour les petites valeurs de la distance transversale x .
- d'autre part si on prend une image de la surface terrestre avec un angle d'inclinaison $\alpha=0$, la résolution de la hauteur prend une grande valeur.

Ces deux points influent sur la qualité de l'image topographique prise par un système interférométrique à ouverture synthétique (InSAR), et par conséquent la meilleure inclinaison α améliorant la résolution de l'élévation et diminuant l'ambiguïté de cette dernière par le changement de phase. Elle doit être proche de $\pi/4$ (c'est à dire que la position de la ligne de base interférométrique ne doit être ni horizontale ni verticale).

REFERENCES

- [1]- P.A. Rosen et al « Synthetic aperture radar interferometry », IEEE. INC, Vol. **88**, N°3, pp 333-381, March 2000.
- [2]- H. Maître « Traitement des images de radar à synthèse d'ouverture », Hermes Science Publications, Paris 2001.
- [3]- A.Moccia and G. Rufino « Spaceborne along-track SAR Interferometry: Performance Analysis and Mission Scenarios », IEEE. Transactions on Aerospace and Electronic Systems , Vol. **37**, pp. 199-213, N° 1 January 2001.
- [4]- L. C. Graham « Synthetic interferometric radar interferometry », IEEE. INC, Vol. **62**, pp. 763-768, June 1974.
- [5]- R. M Goldstein et al « Satellite radar interferometry: two dimensional phase unwrapping », Radio Sci. Vol. **23**, N°4, pp 713-720, July 1998.
- [6]- O. Hellwich « SAR interferometry: principles, processing, and perspectives », Chair for photogrammetry and remote sensing, URL: <http://photo.verm.tu-muenchen.de>.

- [7]- F. Li et al « Studies of multibaseline spaceborne interferometric synthetic aperture radars », IEEE Transactions. Aerospace. Geosciences and Remote Sensing. Vol. **28**, pp 88-97, 1990.
- [8]- F. Maamri et M.Benslama « Caractérisation des antennes interférométriques à ouvertures synthétiques », Proceedings of CMGE'01, Constantine, Novembre 2001.
- [9]- N. Levanon « Effectiveness boundaries of interferometric SAR », IEEE Transactions. Aerospace and Electronic System, Vol. **31**, N°2, pp 455-664, 1993.
- [10]- X. Mengdao et al « Doppler ambiguity resolving in Distributed micro satellites radar imaging », IEEE. Aerospace Conference Proceedings, pp 1636-1945, 2004.
- [11]- F. Maamri et M.Benslama « Résolution de l'élévation topographique et limites du SAR interférométrique (InSAR) », Séminaire SNAS'02, Annaba, Octobre 2002.
- [12]- D. Massonnet and T. Rabaut « Radar interferometry: limits and potentiel », IEEE Transactions On Geosciences and Remote Sensing, Vol. **31**, N°2, pp 455-664, 1993.