

UNE NOUVELLE MAPPE DE QUALITE POUR LE DEROULEMENT DE PHASE DE L'INSAR

Tarek Bentahar

Laboratoire LABGET, Université de Larbi Tébessi-Tébessa-Algérie

tarek.bentahar@univ-tebessa.dz

Atef Bentahar

Laboratoire LAMIS, Université de Larbi Tébessi-Tébessa-Algérie

atef.bentahar@univ-tebessa.dz

Riad Saidi

Laboratoire LABGET, Université de Larbi Tébessi-Tébessa-Algérie

riad.saidi@univ-tebessa.dz

Résumé :

Dans cet article, une nouvelle mappe de qualité basée sur une modification de la mappe de la variance de la dérivée de la phase est proposée. Comme cette mappe proposée fournit plus détails sur les variations locales de l'interférogramme notamment pour les franges et les bords, le déroulement de phase pourrait être plus précis et fiable. L'influence de telle mappe de qualité se manifeste substantiellement sur les régions de forte densité des résidus. Pour prouver l'efficacité de notre proposition, le test a été réalisé sur des données satellitaires réelles et la comparaison a été faite selon plusieurs métriques pertinentes.

Mots-clés : Interférogramme InSAR, Déroulement de phase, Mappe de qualité.

1- Introduction

Depuis plusieurs décennies, les chercheurs ont porté; et portent encore, un grand intérêt à la surveillance et à l'acquisition d'informations sur la surface terrestre. Cet axe est considéré comme l'une des applications radar les plus importantes [1]. Par rapport au système d'imagerie optique, l'imagerie radar est un système actif grâce à sa propre source d'illumination qui est l'onde électromagnétique. Cette propriété permet au système de fonctionner le jour comme la nuit et dans toutes les conditions météorologiques. Parmi les systèmes d'imagerie radar, le radar à ouverture synthétique interférométrique (InSAR en Anglais) a la capacité d'exploiter les informations de phase en utilisant la technique d'interférométrie. Son principe de fonctionnement est basé sur une double acquisition du signal rétrodiffusé à l'aide soit de deux antennes séparées par une ligne de base en un seul passage (appelé mode un mono-passe), soit d'une antenne et deux passes (appelé mode multi-passes) [2]. L'image de phase résultante est précisément dite l'image de phase interférométrique ou plus couramment « interférogramme ». En mode multi-passes, la dé-corrélation temporelle générée est

exploitée pour les applications de détection des changements ou des déformations de la surface [3,4]. Alors que la dé-corrélation spatiale est exploitée dans le mode mono-passe, ce qui le rend appropriée pour la cartographie terrestre et la génération des modèles numériques du terrain (DEM en Anglais) [5,6].

La matière brute (Interférogramme) n'est pas directement exploitable le fait que toutes les phases sont déroulées dans l'intervalle $(-\pi, +\pi]$. Pour calculer la phase réelle qui interprète correctement l'élévation du point imagé le processus de déroulement de phase doit être exécuté. Sans résidus, l'interférogramme est facilement déroulé par une accumulation (somme) des gradients roulés. Malheureusement, les interférogrammes sont inévitablement bruités par les résidus. Dans ce cas, l'utilisation du processus de base sans tenir en compte la présence des résidus est inutile parce que le décalage de phase créé par un résidu se propagera le long du parcours choisi. Donc, le déroulement de phase doit tenir en compte le problème des résidus. Durant plus de quatre décennies, plusieurs algorithmes de déroulement de phase ont été proposés [7]. Parmi ces algorithmes nous trouvons la classe de « Guidée par la Qualité » « *Quality-Guided Phase Unwrapping* » (QGPU) [8-15]. Dans cette classe d'algorithmes, le parcours d'intégration optimal est choisi en fonction de la qualité des pixels impliqués pour le calcul de la phase réelle. Pour ce but, une autre information supplémentaire doit être utilisée qui est généralement une mappe dite la mappe de qualité [16]. Parmi ces mappes nous trouvons : la cohérence ou encore les coefficients de corrélation (CC) qui est systématiquement fournie par le système InSAR, le gradient conventionnel, la variance de la dérivée de la phase (PDV) [17], la pseudo-corrélation (PC) [18], la cooccurrence du niveau de gris [19], une mappe basée les régions connectées [20] et le maximum gradient MG [21].

Dans ce travail, nous proposons une nouvelle mappe de qualité déduite d'une nouvelle stratégie de calcul de la variance des dérivées. La modification concerne le sens (direction) et le nombre des dérivées calculées dans une fenêtre 3x3. Le reste de l'article est organisé comme suivant : Section 2 est pour donner une généralité sur le système InSAR et ses images en particulier les intergérogrammes. Dans la section 3, l'entité des résidus et la propagation de leurs erreurs sont expliqués. Dans la section 4, quelques techniques pionnières de déroulement de phase sont présentées ; en particulier, celles de la classe QG. La section 5 est consacrée à expliquer la mappe proposée et à révéler la différence entre elle et la PDV ordinaire. Dans la section 6, nous présentons l'implémentation de la mappe proposée et autres mappes largement répandues et nous discutons les résultats obtenus. Finalement, la section 7 conclue l'article en révélant les principaux points déduits.

2- Généralité sur l'imagerie InSAR.

SAR et InSAR sont deux systèmes d'imagerie radar capables de fournir l'image d'amplitude. La différence entre SAR et InSAR est dans la double acquisition du signal rétrodiffusé sous deux angles différents. Les deux acquisitions sont séparées par une petite distance appelée ligne de base. Alors, deux manières sont possibles : une seule antenne et deux passages ou deux antennes et un passage. Dans la première, la dé-corrélation temporelle est engendrée ce qui rend ce mode pertinent pour les applications de détection de changement. Alors que la seconde engendre la dé-corrélation spatiale et par conséquent les applications de topographie

sont les plus pertinentes. Le fait que le signal est auto-interféré, toutes les phases seront soustraites sauf la différence de la phase du trajet. Cette différence trajectoire de la phase est dite interférométrique et l'image correspondante est dite interférogramme. La figure 1 montre un exemple d'image d'amplitude, l'interférogramme et l'image de cohérence. L'image d'amplitude est une image d'intensité de la rétrodiffusion, elle dépend de la nature et l'orientation du point imagé. La cohérence est une image qui mesure le degré de corrélation entre les deux signaux reçus, elle est considérée comme une mappe de qualité de mesure. L'image d'interférogramme est l'image de différence de phase interférométrique, elle dépend du trajet et donc géométriquement elle peut interpréter l'élévation du point image. Toutes les phases dans un interférogramme sont roulées dans l'intervalle $(-\pi, +\pi]$. L'opération de roulement n'est pas le modulo, le modulo donne des valeurs entre 0 et 2π . Cependant, il y a relation entre ces deux opérateurs comme il est montré par l'équation 1.

$$\phi^w = \text{Wrap}(\phi^r) = \text{Mod}_{2\pi}(\phi^r + \pi) - \pi \quad (1)$$

Avec ϕ^r et ϕ^w sont respectivement la phase réelle et la phase roulée.

En tant donné que les phases sont limitées dans l'intervalle $(-\pi, +\pi]$, la forme des franges caractérise les interférogrammes (voir figure 1). Les pixels noirs et blancs correspondent respectivement à $-\pi$ et $+\pi$, et les autres pixels sont graduellement gris selon la valeur de la phase. Les franges ne sont pas stationnaires et leurs fréquences sont variables. En plus, les régions incohérentes à cause de fort bruit possèdent des franges ambiguës.

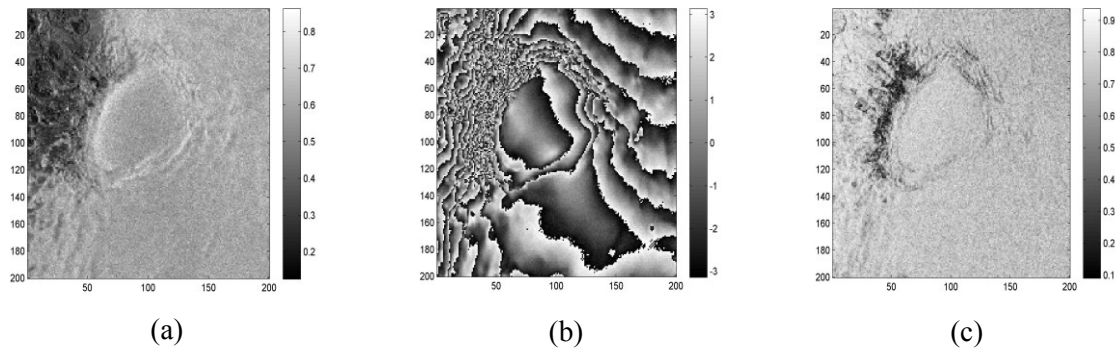


Figure.1. Exemple d'images InSAR: (a) Amplitude, (b) Interférogramme, (c) Cohérence

3- Les résidus d'interférogrammes

Le bruit qui affecte les interférogrammes appelé résidus. Ils sont dû aux sauts de phase engendrés par les régions incohérentes telles que les zones d'ombre, inversion, accumulation ou par les erreurs de système. La figure 2 (a) et (b) montre l'interférogramme précédent et sa mappe des résidus correspondante. Pour détecter un résidu dans un interférogramme, la somme des gradients roulés dans une boucle 2x2 doit être calculée. L'équation 2 montre ce propos.

$$R = \frac{1}{2\pi} \sum \left(\text{Wrap}(\phi_{i+1,j}^w - \phi_{i,j}^w) + \text{Wrap}(\phi_{i+1,j+1}^w - \phi_{i+1,j}^w) + \text{Wrap}(\phi_{i,j+1}^w - \phi_{i+1,j+1}^w) + \text{Wrap}(\phi_{i,j}^w - \phi_{i,j+1}^w) \right) \quad (2)$$

$$\phi_{i,j}^u = \phi_{n(i,j)}^u + \text{Wrap}(\phi_{i,j}^w - \phi_{n(i,j)}^w) \quad (3)$$

Le processus de base de déroulement de phase consiste à cumuler les gradients roulés dans un parcours comme il est montré par l'équation (3). Il est clair qu'à partir de n'importe quel pixel déjà déroulé on peut dérouler un pixel voisin. Mais, si ce processus traverse un résidu, un décalage (erreur) de phase se créera et cette erreur va se propager le long du parcours d'intégration choisi en calculant les pixels suivants. La figure 2(c) montre l'image de phase déroulée de même interférogramme en utilisant le processus de base.

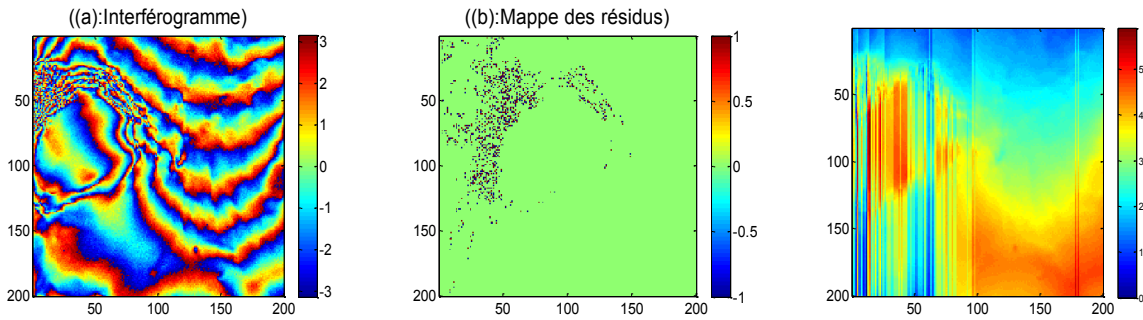


Figure 2, l'effet des résidus : a) Interférogramme, b) Mappe des résidus, c) Image déroulée par le processus de base.

4- Le déroulement de phase et mappes de qualité

Pour que le déroulement soit immunisé aux résidus et le problème de la propagation d'erreur soit évité, le calcul de la phase doit tenir en compte la présence des résidus. Les algorithmes de déroulement adaptés aux résidus se catégorisent en trois grandes catégories I) Suivi du parcours, II) méthodes basées sur l'optimisation et III) dé-bruiter & dérouler [7]. La première catégorie se divise elle-même en deux sous-catégories : coupures en branches et déroulement guidé par la qualité. La deuxième est également divisée en deux sous-catégories : optimisation basée sur les statistiques et norme de minimisation. La figure 3 montre un diagramme de la catégorisation des méthodes de déroulement. La stratégie se diffère d'une catégorie à l'autre. Par exemple, les méthodes BC établissent des barrières appelées coupures des branches pour empêcher l'intégration à traverser les résidus. Ce processus (déroulement en évitant les branches) est dit Remplissage par Inondation ou encore par diffusion (*Flood-Fill*). Tandis que les méthodes QG guident le processus de base seulement dans les pixels de bonne qualité en utilisant une mappe de qualité comme référence. Les pixels de mauvaise qualité sont les derniers à dérouler. Les méthodes d'optimisation suivent une stratégie totalement différente qui est généralement un traitement global. L'objectif des méthodes d'optimisation est de minimiser la différence entre le gradient de la phase roulée et celui de la phase déroulée par le processus de base. Pour ce but, les méthodes statistiques changent la valeur de certaines phases en des fonctions statistiques pour estimer les valeurs convenables. Alors que les méthodes MN essayent de minimiser la différence en basant sur des techniques issues des méthodes numériques. Les méthodes dé-bruiter & dérouler ; comme leur nom indique, essayent de filtrer l'interférogramme définitivement des résidus puis les phases seront facilement déroulées.

Les cartes de qualité ne sont pas seulement utilisées dans les méthodes QG, certains algorithmes les utilisent pour concevoir un masque couvrant les résidus au lieu des branches [22]. Elles sont également utilisées dans certaines méthodes MN pour la pondération telle que [23] et certaines techniques de filtrage [24]. La figure 4 montre les cartes d'interférogramme susmentionné qui sont utilisées dans notre comparaison.

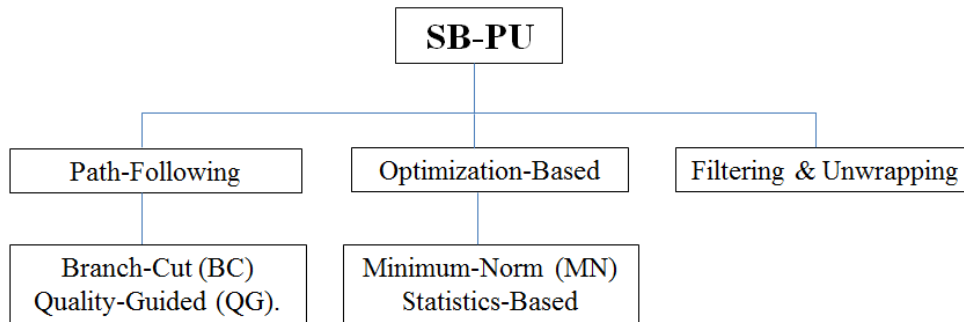


Figure 3 : les catégories de déroulement de phase à ligne de base unique.

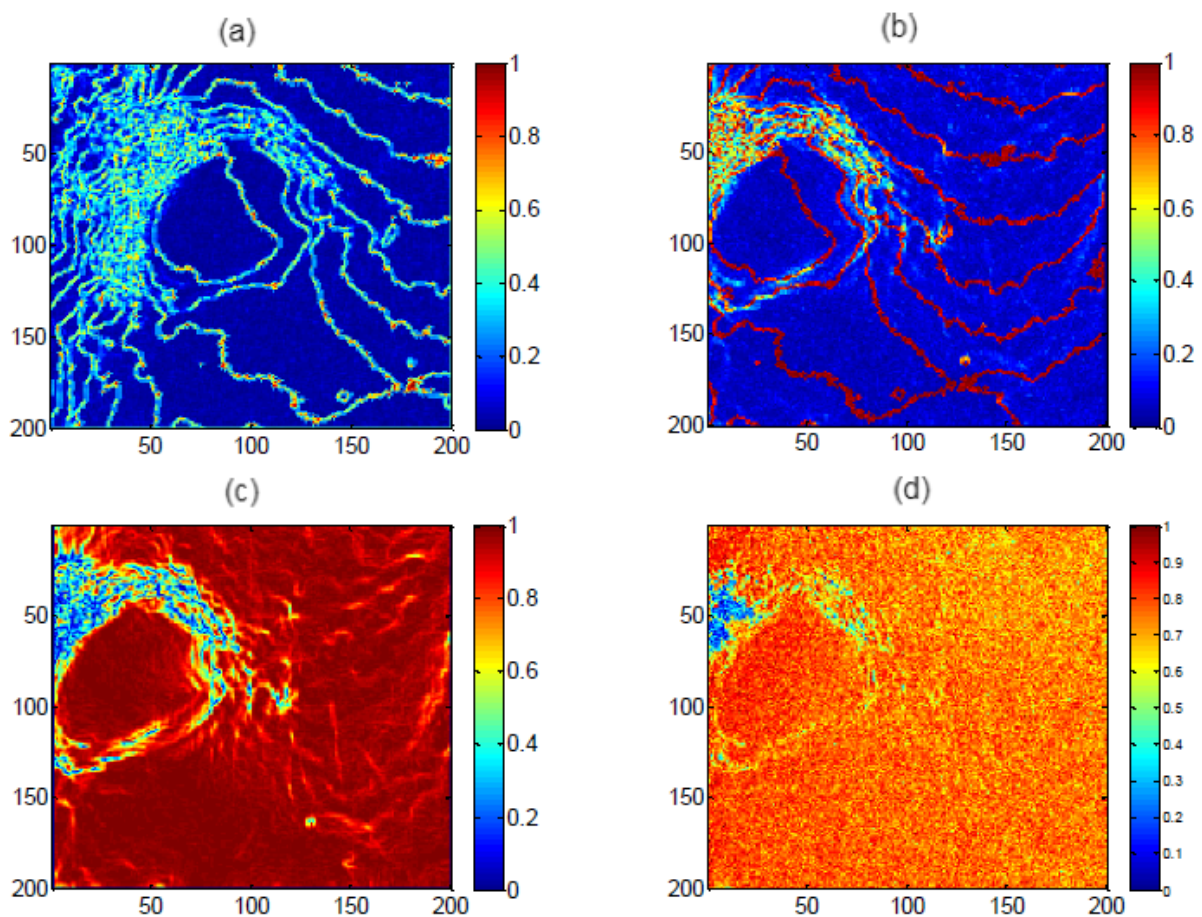


Figure 4, Carte de qualité, a) PDV, b) MG, c) PC, d) CC.

5- La mappe proposée

La mappe PDV conventionnelle est calculée par la variance des dérivées locales (dans une fenêtre) selon deux sens (vertical et horizontal). En plus, les dérivées sont calculées par des différences successives c.-à-d. Le pixel courant moins le pixel précédent (voir équation 4 et figure 5a). Autrement dit, deux sens et quatre dérivées sont considérées dans la PDV conventionnelle. Notre proposition consiste à porter des modifications qui concernent le sens et le nombre des dérivées impliqués dans le calcul. Nous proposons de calculer les dérivées par rapport au pixel central au lieu des différences successives, car c'est le pixel central qui est référentiel et qui indiquera la qualité. Nous proposons de calculer huit dérivées au lieu de quatre, car tous les huit pixels voisins de la fenêtre contribuent à attribuer la qualité au pixel central. Ce propos est montré dans la figure 5b.

Ces modifications peuvent donner plus de détails sur les variations locales critiques telles les franges. Effectivement, les franges dans la mappe proposée sont protubérantes comme il est montré dans la figure 6 par rapport à ce qu'il est dans la figure 4a.

$$PDV_{mn} = \frac{\sqrt{\sum(\Delta_{i,j}^x - \Delta_{m,n}^x)^2} + \sqrt{\sum(\Delta_{i,j}^y - \Delta_{m,n}^y)^2}}{k^2} \quad (4)$$

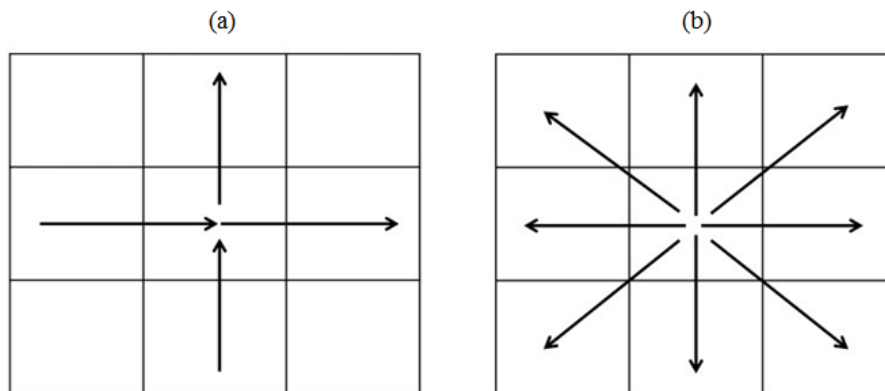


Figure 5 le sens et le nombre des dérivées dans : a) PDV conventionnelle, b) la mappe proposée.

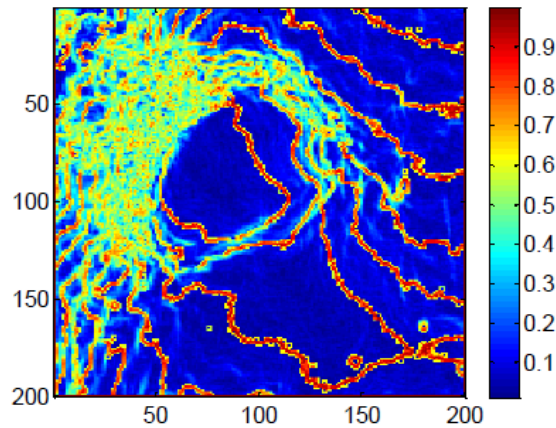


Figure 6, la mappe proposée.

6- Résultats et discussion

Le même interférogramme précédent est utilisé pour le test. Le déroulement de phase de la catégorie QG décrit dans [25] est implémenté avec les quatre mappes de qualité PDV, MG, PC, CC et ainsi que la mappe proposée. Visuellement, les images déroulées avec les cinq mappes ont une qualité visuelle (analyse informelle qualitative) proche. Pour cette raison, nous avons seulement illustré l'image déroulée en utilisant notre mappe proposée (figure 7). Pour une analyse quantitative, les métriques utilisées sont : MSE, SSIM, Points de discontinuité basée sur le gradient (ici noté DP-G)[26], Points de discontinuité basée sur la condition d'Itho (ici noté DP-I) , et ϵ [21]. Les deux premières sont très connues et répandues dans le domaine du traitement d'image en général, et les trois dernières sont typiquement pour le déroulement de phase. Sauf SSIM, plus la valeur de la métrique est petite, plus le déroulement est précis. Le tableau 1 résume les résultats obtenus en termes de ces métriques. Il s'est montré que le déroulement avec la mappe proposé a des valeurs satisfaisantes ; grand SSIM et petits DP-G, DP-I et ϵ .

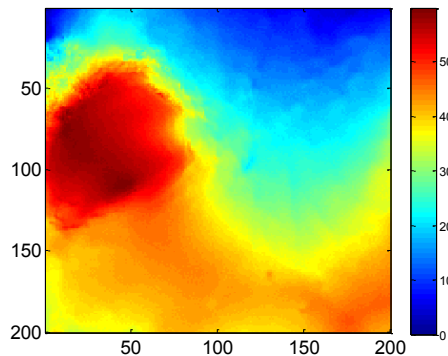


Figure 7, l'image déroulée par QG en utilisant la mappe proposée.

	PC	MG	PDV	CC	Mappe-Proposée
MSE	0.038	0.033	0.033	0.026	0.021
SSIM	0.864	0.897	0.917	0.922	0.927
DP-G (%)	0.743	0.706	0.655	0.392	0.171
DP-I (%)	0.235	0.177	0.097	0.046	0.032
ϵ	2.813	2.576	2.570	1.987	1.546

Tableau 1, les résultats obtenus en termes des métriques quantitatives.

7- Conclusion

Dans cet article, nous avons proposé une nouvelle mappe de qualité pour le déroulement de phase d'interférogramme inSAR. Notre proposition est dérivée de la mappe PDV conventionnelle avec des modifications dans le sens et le nombre des dérivées impliquées. Le test a été réalisé sur un interférogramme réel fourni par ESA ERS-1 et la comparaison a été faite avec quatre autres mappes largement utilisées. Les métriques adoptées sont aussi variés et pertinentes. Notre proposition a donné des résultats satisfaisants selon les cinq métriques utilisées.

8- Références

- [1] Raney, K. (2014). Radar, Altimeters. In *Encyclopedia of Remote Sensing* (pp. 525–532). Springer New York.
- [2] Moreira, A., Prats-Iraola, P., Younis, M., Krieger, G., Hajnsek, I., & Papathanassiou, K. P. (2013). A tutorial on synthetic aperture radar. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 1(1), 6–43.
- [3] Osmanoglu, B., Sunar, F., Wdowinski, S., & Cabral-Cano, E. (2016). Time series analysis of InSAR data: Methods and trends. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 115, 90–102.
- [4] Monserrat, O., Crosetto, M., & Luzi, G. (2014). A review of ground-based SAR interferometry for deformation measurement. *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 93, 40–48.
- [5] Hoja, D., Reinartz, P., & Schroeder, M. (2007). Comparison of DEM generation and combination methods using high resolution optical stereo imagery and interferometric SAR data. *Revue française de photogrammétrie et de télédétection*, 2006(4), 89-94.
- [6] Geymen, A. (2012). Digital elevation model (DEM) generation using the SAR interferometry technique. *Arabian Journal of Geosciences*, 7(2), 827–837.
- [7] Yu, H., Lan, Y., Yuan, Z., Xu, J., & Lee, H. (2019). Phase Unwrapping in InSAR: A Review. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, 7(1), 40–58.
- [8] Wei Xu, & Cumming, I. (1999). A region-growing algorithm for InSAR phase unwrapping. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 37(1), 124–134.
- [9] Herráez, M. A., Burton, D. R., Lalor, M. J., & Gdeisat, M. A. (2002). Fast two-dimensional phase-unwrapping algorithm based on sorting by reliability following a noncontinuous path. *Applied Optics*, 41(35), 7437.
- [10] Abdul-Rahman, H. S., Gdeisat, M. A., Burton, D. R., Lalor, M. J., Lilley, F., & Moore, C. J. (2007). Fast and robust three-dimensional best path phase unwrapping algorithm. *Applied Optics*, 46(26), 6623.
- [11] Zhong, H., Tang, J., Zhang, S., & Chen, M. (2011). An Improved Quality-Guided Phase-Unwrapping Algorithm Based on Priority Queue. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 8(2), 364–368.
- [12] Dai, Z., & Zha, X. (2012). An Accurate Phase Unwrapping Algorithm Based on Reliability Sorting and Residue Mask. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 9(2), 219–223.
- [13] Zhong, H., Tang, J., Zhang, S., & Zhang, X. (2014). A Quality-Guided and Local Minimum Discontinuity Based Phase Unwrapping Algorithm for InSAR/InSAS Interferograms. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11(1), 215–219.
- [14] Jian, G. (2016). Reliability-Map-Guided Phase Unwrapping Method. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 13(5), 716–720.
- [15] Wang, H., Tong, L., Li, Y., & Xiao, F. (2019, July). Phase Unwrapping Algorithm Based on Improved Weighted Quality Graph. *IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*.
- [16] Zhao, M., Huang, L., Zhang, Q., Su, X., Asundi, A., & Kema, Q. (2011). Quality-guided phase unwrapping technique: comparison of quality maps and guiding strategies. *Applied Optics*, 50(33), 6214.
- [17] Wang, Y., Huang, H., & Wu, M. (2014, May). A new phase unwrapping method for interferograms with discontinuities. *2014 IEEE Radar Conference*.

- [18] Xiao Feng, Wu Jicang, Zhang Lei, & Li Xiaoling. (2007). A new method about placement of the branch cut in two-dimensional phase unwrapping. 2007 1st Asian and Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar.
- [19] Liu, G., Wang, R., Deng, Y., Chen, R., Shao, Y., & Yuan, Z. (2014). A New Quality Map for 2-D Phase Unwrapping Based on Gray Level Co-Occurrence Matrix. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 11(2), 444–448.
- [20] Zhang, T., Lv, X., & Hong, J. (2016, July). A novel interferogram quality assessment index based on connected area. 2016 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium (IGARSS).
- [21] Man, Y., Goulin, L., & Huadong, H. (2010, December). Comparison among Quality Maps Applying in Phase Unwrapping for Different Terrain. 2010 International Conference on Computational and Information Sciences.
- [22] Flynn, T. J. (n.d.). Consistent 2-D phase unwrapping guided by a quality map. IGARSS '96. 1996 International Geoscience and Remote Sensing Symposium
- [23] Flynn, T. J. (1997). Two-dimensional phase unwrapping with minimum weighted discontinuity. *Journal of the Optical Society of America A*, 14(10), 2692.
- [24] Bentahar, T., Benatia, D., & Boulila, M. (2016). De-noising interferogram inSAR using variance and absolute deviation functions. *World Journal of Engineering*, 13(2), 169–176.
- [25] Ghiglia D. C. and Pritt M. D., *Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms, and Software*. New York: Wiley, 1998.
- [26] Wang, H., Tong, L., Li, Y., & Xiao, F. (2019, July). Phase Unwrapping Algorithm Based on Improved Weighted Quality Graph. IGARSS 2019 - 2019 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium.