

다중시기 SAR 간섭 위상 품질 향상을 위한 비국소 가중 순차적 최적화 기법

Non-local Weighted Sequential Estimator for Multi-temporal SAR Interferometric Phase Optimization

임태석¹, 김상완^{2*}

Taeseok Lim¹, Sang-Wan Kim^{2*}

¹ 세종대학교 에너지자원공학과

^{2*} 세종대학교 지구자원시스템공학과 (e-mail: swkim@sejong.edu)

요약: PSInSAR (Persistent Scatterer InSAR)는 안정적인 산란체의 시계열 위상 정보를 활용하여 여러 오차를 효과적으로 보정하고, 수 mm 이하 수준의 변위 측정 정확도를 가진다. 그러나 시계열적으로 안정적인 산란체에 활용이 국한되는 한계가 있다. 따라서 정밀한 오차 보정과 시계열 분석을 위해 분산 산란체(Distributed Scatterer) 활용이 요구된다. 이를 위해 최근 mini-stack 기반의 순차적 위상 최적화와 비국소 가중 위상 최적화가 제안되었으나, 각각 통계 검정 신뢰도와 연산 효율성 측면에서 한계가 존재한다. 본 연구에서는 이러한 한계를 상호 보완적으로 개선하고자 하였다. 그 결과, 위상 최적화 품질의 정량적 평가 지표로 사용되는 사후 coherence에서, 기존 기법 대비 coherence 값이 0.5 이상인 화소 비율이 증가하였다. 또한, decorrelation에 의한 노이즈가 완화되어 전체 영상에서 공간적 coherence 개선을 확인하였다.

1. 서론

SAR 간섭기법(Interferometric SAR, InSAR)은 영상 간 위상 차이를 이용해 지표의 미세한 변위를 관측하는 기법이다. 대표적으로 PSInSAR(Persistent Scatterer InSAR) 기법은 시계열적으로 안정적인 고정 산란체를 활용하여 수 mm 이하의 정밀도로 지표 변위를 측정할 수 있으며, 가장 널리 활용되는 방법이다(Jung et al., 2007). 하지만 안정적인 산란 특성을 보이는 구조물이 희소한 지역에서 적용에 한계가 있다(Colesanti et al., 2007).

이를 보완하기 위해 분산 산란체가 활용되며, 이는 decorrelation으로 산란 특성이 불안정하지만, 주변에 통계적으로 동질한

화소(Statistically Homogeneous Pixel, SHP)가 충분할 경우 위상 최적화를 통해 일부 안정적인 산란체로 보정될 수 있다(Ferretti et al., 2011). 기존의 시계열 영상 전체를 이용한 위상 최적화는 계산 부하가 크고 장기 시계열 decorrelation 문제가 발생하는 한계가 있다(Ansari et al., 2017). 이를 완화하기 위해 제안된 mini-stack 기반 순차적 위상 최적화(Ansari et al., 2017)는 계산 부하를 줄이고 장기 decorrelation 문제를 완화할 수 있으나, stack 단위 처리로 인한 샘플 수 감소로 SHP 통계 검정의 신뢰도가 저하된다. 반면, 최근 제안된 비국소 가중 위상 최적화(Zhang et al., 2024)는 비국소

평균 가중치를 적용해 이러한 한계를 개선할 수 있으나, 복잡한 연산으로 연산 효율성 측면에서 개선이 요구된다.

따라서 본 연구에서는 이러한 상충되는 문제점을 개선할 수 있는 위상 최적화 방법을 제안하고자 한다.

2. 연구지역 및 자료

본 연구는 2019년 5월 4일부터 2024년 12월 27일까지 획득된 Sentinel-1 SLC(Single Look Complex) 영상 88장을 활용하여 수행하였다. 연구 지역은 명확한 위상 최적화 전 후 비교를 위해, 그림 1과 같이 분산 산란체의 분포가 예상되는 강원도 산간 지역 일대로 선정하였다.

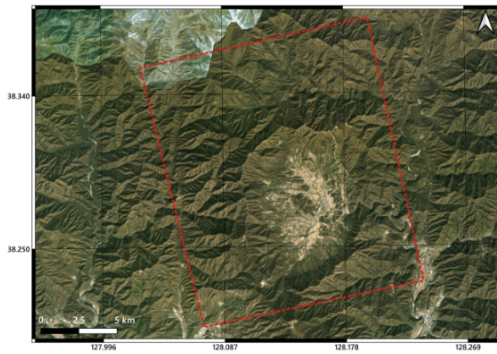


그림 1. Study area outlined in red

3. 연구 방법

3.1 통계적 동질 화소

위상 최적화는 시계열 진폭 변화에 대한 통계 검정을 통해 추출된 SHP를 기반으로 샘플 공분산 행렬을 분석하는 방식으로 수행된다. 따라서 SHP 추출 과정이 선행되어야 하며, 위상 최적화의 성능은 추출된 SHP의 품질에 크게 의존한다. 본 연구에서는 SHP 추출을 위해 비모수 통계 방법인 Kolmogorov - Smirnov(KS) 검정을 적용하였다. KS 검정은 두 표본의 누적 분포 함수 유사성을 검정하는 방법

으로, SHP 탐색 윈도우를 설정해 각 화소를 기준으로 주변 화소와의 유사성을 평가한다(Parizzi & Brcic, 2011).

3.2 순차적 위상 최적화

기존 위상 최적화 방식은 분석 영상이 증가 할수록 연산 부담이 증가하며, 시계열 decorrelation의 영향을 받는 한계가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 순차적 위상 최적화가 제안되었으며, 이는 전체 데이터를 stack 단위로 분할하여 처리함으로써 연산 부담과 시계열 decorrelation을 완화한다(Ansari et al., 2017). 또한 stack 단위의 SHP 추출로 시계열 진폭 변화 특성을 반영할 수 있다. 그림 2는 15×11 크기의 SHP 탐색 윈도우를 적용하여 연구 지역 내 특정 화소(a)를 추출된 SHP 예시로, 처음 stack(b)과 마지막 stack(c)에서 추출된 SHP의 수와 위치가 달라짐을 확인할 수 있다.

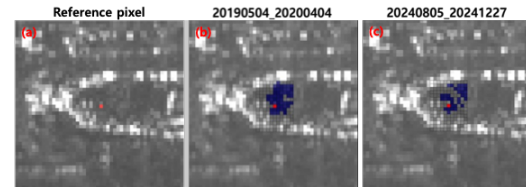


그림 2. SHP extraction results

3.3 비국소 위상 최적화

위상 최적화는 SHP 품질에 크게 의존하지만, 통계 검정만으로는 이질적인 화소를 완전히 제거하기 어렵고, 샘플 수에 따라 결과가 달라질 수 있다는 한계가 있다(Zhang et al., 2024). 이를 보완하기 위해 최근 제안된 비국소 가중 위상 최적화 기법은 전체 영상에서 SHP로 추출된 화소에 가중치를 부여한다. 각 화소를 중심으로 설정된 SHP 탐색 윈도우에서 추출된 화소는 통계적으로 완전히 동질하지 않을

수 있으므로, 중심 화소와 주변 화소의 탐색 윈도우 간 유사도를 각각의 공분산 행렬을 통해 평가하며, 더 유사한 화소일수록 높은 가중치를 부여한다.

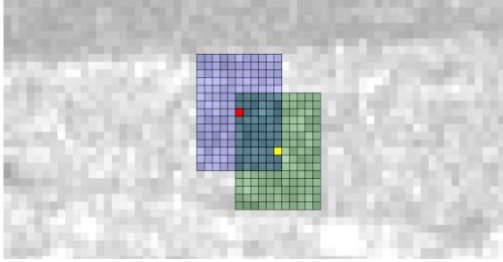


그림 3. Stack configuration schematic

그림 3은 특정 화소(빨간점)를 기준으로 설정된 SHP 탐색 윈도우(파란색)와, 그 윈도우에서 SHP로 추출된 주변 화소(노란점)의 SHP 탐색 윈도우(초록색)를 시각화한 것이다. 본 연구에서 중심 화소와 주변 화소 간 분포 유사도를 Kullback - Leibler Divergence(KLD)를 통해 평가 하였으며, KLD 값이 작을수록 높은 유사성을 가지므로 더 큰 가중치를 할당 하였다.

3.4 순차적 비국소 위상 최적화

순차적 위상 최적화는 stack 단위의 통계 검정으로 인해 샘플 수 감소에 따른 신뢰도 저하가 발생한다. 이는 비국소 위상 최적화의 가중치 활용으로 개선될 수 있다. 본 연구에서는 각 stack에서 통계 검정을 통해 유사 화소를 추출하고, 이로부터 산출된 샘플 공분산 행렬 간 유사도를 병렬 연산으로 계산하여 가중치로 변환하였다. 이후 비국소 가중 공분산 행렬을 구성하고, 이를 기반으로 각 stack 단위에서 최적화를 수행함으로써 가중치 연산 부담과 SHP 검정 신뢰도를 동시에 개선하였다.

4. 연구 결과 분석

본 연구에서 제안된 방법의 성능을 평가하기 위해 순차적 위상 최적화 결과와 비교를 수행하였다. 먼저 두 방법으로 개선된 위상의 품질 평가를 사후 coherence를 활용하였다. 이는 최적화가 수행되지 않은 기존 위상과의 비교를 통해 산출되며, 위상 최적화 결과의 품질을 정량적으로 평가하는 지표(goodness of fit)로 사용된다(Zhang et al., 2024).

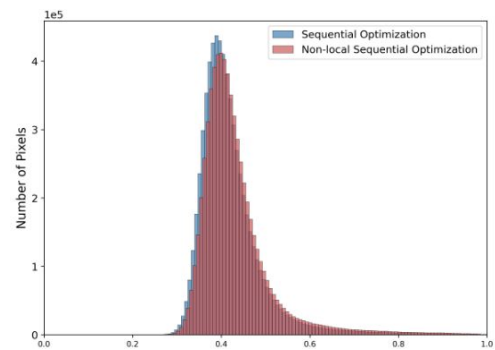


그림 4. posterior coherence histogram

그림 4의 결과를 통해 사후 coherence가 0.5 이하인 비율은 감소하고 0.5 이상의 구간의 비율이 상승함을 확인 하였으며, 이는 개선된 위상의 품질이 기존 방법 대비 상승 하였음을 나타낸다.

또한, 개선된 위상을 활용하여, 전체 영상의 획득 시기와 수직 기선거리를 고려해 선정한 기준 영상(2022.01.24)과, 마지막 영상(2024.12.27) 간의 차분 간섭도와 coherence map을 생성하여 그림 5에 제시하였다. A·B·C 세 지역을 확대 비교한 결과, 제안된 방법의 차분 간섭도에서 기존 방법 대비 위상 스무딩 성능이 향상됨을 확인 하였다. 또한 coherence map에서도 decorrelation을 효과적으로 완화하여 전반적으로 높은 coherence 값을 보였다.

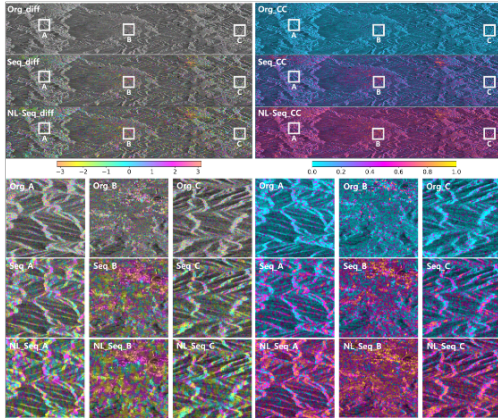


그림 5. Phase Optimization Results

또한 모든 영상 쌍에서 랜덤하게 추출된 분산 산란체의 평균 coherence 비교 결과(그림 6), 제안된 방법에서 가장 높은 평균 coherence 값을 보였으며, 이는 전체 시계열에서도 분산 산란체의 decorrelation을 효과적으로 완화했음을 보여준다.

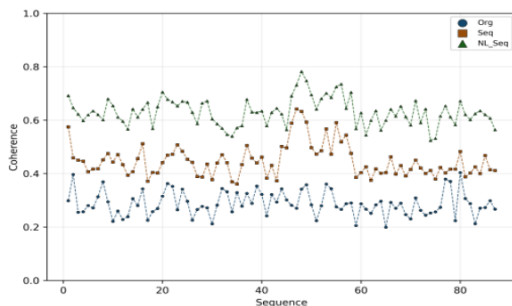


그림 6. Coherence comparison results

4. 결론 및 추후 연구

본 연구는 위상 추정 성능 개선과 평가에 맞춰져 있어 실제 변위 분석이 수행되지 않았다. 향후 연구에서는 제안된 방법으로 최적화된 위상을 활용하여 지구물리학적 신호 해석의 정확성을 검증할 필요가 있을 것으로 판단된다.

5. 사사

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보

통신기획평가원의 디지털분야글로벌연구지원(RS-2024-0042522320682075910002)을 받았으며, 이에 감사드립니다.

6. 참고문헌

- Ansari, H., De Zan, F., & Bamler, R. 2017. Sequential Estimator: Toward Efficient InSAR Time Series Analysis. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 55(10), 5637 - 5652.
- Colesanti, C., Mouelic, S. L., Bennani, M., Raucoules, D., Carnec, C., & Ferretti, A. 2007. Detection of mining related ground instabilities using the Permanent Scatterers technique—a case study in the east of France. *International Journal of Remote Sensing*, 26(1), 201 - 207.
- Ferretti, A., Fumagalli, A., Novali, F., Prati, C., Rocca, F., & Rucci, A. 2011. A New Algorithm for Processing Interferometric Data-Stacks: SqueeSAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 49(9), 3460 - 3470.
- Jung, H. C., Kim, S.-W., Jung, H.-S., Min, K. D., & Won, J.-S. 2007. Satellite observation of coal mining subsidence by persistent scatterer analysis. *Engineering Geology*, 92(1-2), 1 - 13.
- Parizzi, A., & Brcic, R. 2011. Adaptive InSAR Stack Multilooking Exploiting Amplitude Statistics: A Comparison Between Different Techniques and Practical Results. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 8(3), 441 - 445.
- Zhang, Z., Yan, S., Zhang, H., & Zhao, F. 2024. Nonlocal Phase Linking for Distributed Scatterer Interferometry. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 62, 1 - 13.