

대기굴절률을 이용한 Arc-SAR 시스템의 위상보정

이재희*, 김광은*, 조성준*, 성낙훈*, 이훈열**

*한국지질자원연구원 광물자원연구본부

**강원대학교 지구물리학과

Phase correction for Arc-SAR system using refractive index of air

Jae-Hee Lee*, Kwang-Eun Kim*, Seong-Jun Cho*, Nak-Hoon Sung*
and Hoonyol Lee**

*Mineral Resources Research Division, Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

**Department of Geophysics, Kangwon National University
(zack, kimke, mac, nhsung@kigam.re.kr, hoonyol@kangwon.ac.kr)

요약 : 지상 SAR 시스템은 미세변위 측정 및 감지에 큰 강점을 갖고 있으나, 최근 발표된 논문들은 대기에 의해 큰 영향을 받는다고 밝히고 있다. 본 연구에서는 지상 SAR 시스템을 이용하여 대기 변화가 위상 변화에 끼치는 영향을 정량적으로 분석하고자 하였다. 이를 위해 원형레일 기반의 지상 X-band SAR 시스템의 스왑모드를 통하여 고정된 삼각삼면반사체의 위상변화를 약 43시간, 총 65회에 걸쳐 모니터링하였다. 분석 결과 반사체는 고정된 상태였지만 최대 약 5 radian, RMSE 1.62 radian의 변화를 보였다. 이중 최대 온도 및 습도 차이를 보이는 약 16시간에 대한 RMSE는 약 1.74 radian으로 증가하게 되는데, 이 구간의 위상을 온도, 습도, 그리고 기압을 이용한 대기굴절률을 이용하여 보정하였다. 보정 후 RMSE는 0.10 radian, 거리로 환산 시 약 0.24 mm로 줄어들었다. 이를 통해 지상 SAR 시스템을 이용한 변위측정 시 대기보정이 반드시 필요함을 확인할 수 있었다.

1. 서론

마이크로파를 source로 하는 Synthetic Aperture Radar(SAR)는 주로 인공위성이거나 항공기에 탑재되어 운용되는데 미세변위 탐지 연구에 많이 활용되어 왔다. 최근에는 국내를 비롯한 일부 국가에서 개발

및 보유한 선형 레일 기반의 지상 SAR(Ground-Based linear SAR)시스템을 이용한 변위탐지 연구 또한 활발히 발표되고 있다. 최근까지 발표된 SAR 시스템을 이용한 변위탐지 결과는 대부분 대

기의 영향을 배제한 채 도출하였다. 하지만 최근 연구에서는 보다 정밀한 분석을 위해서는 대기에 의한 영향을 제거해야 한다고 주장하고 있다. 지상 SAR 시스템을 이용한 연구 중 Noferini *et al.*,(2005)과 Pipia *et al.*,(2008)에서는 각각 대기 중 습도와 대기굴절률을 이용한 보정을 실시하여 향상된 정밀도에 대한 연구를 발표하였다. 본 연구에서와 동일한 RF장비를 이용해 변위탐지 연구를 수행했던 이재희 외(2010)에서도 대기 중 습도의 영향을 보정하여 정밀도 향상을 확인하였다. 이에 본 연구에서는 새로 개발된 원형 레일 기반의 지상 SAR(Arc-SAR) 시스템의 스팟모드 연속 측정을 통하여 대기 변화가 위상 변화에 미치는 영향을 분석하고, 대기굴절률을 이용한 보정 전·후 결과를 비교함으로써 대기굴절률 보정의 필요성에 대해 확인하고자 하였다.

2. Arc-SAR 실험

a. Arc-SAR 시스템 및 측정모드

본 연구에서 이용된 Arc-SAR 시스템은 선형 레일 기반의 지상 SAR 시스템의 일부 한계점을 극복하고자 차량에 탑재한 원형 레일 기반의 지상 SAR 시스템이다. Dmitriy and Ram(2002)과 Cho *et al.*,(2006)에서 SAR 시스템을 차량에 탑재하여 운용한 적은 있으나, 본 연구에서와 같은 형태는 아니었다. RF 장비 중 VNA는 마이크로파의 송신과 수신을 담당하며, 신호의 증폭을 위하여 마이크로파 앰프를 사용하였다. 안테나가 장착된 안테나 붐은 길이 변경이 가능하게 설계되었는데, 본 연구에서는 반경 3 m로 설정하였다. 원형 레일을 이용한 arc 형태의 모션을 통해 전통적인 SAR와 같이 한쪽 방향만을 지향하게 하려면 2 개의 모터를 필요로 한다. 시스템 전체를 움직이게 하

는 중앙의 모터와 안테나 하부에 위치하는 모터가 그것이다. 중앙의 모터가 일정 방향으로 회전을 하게 되면, 안테나 하부에 장착된 모터가 안테나를 반대 방향으로 같은 회전각만큼 회전시켜 지속적으로 한 방향을 지향하게끔 유지한다. 본 시스템에서 이러한 측정방법을 스팟모드(spot-mode)라고 명명하였고, 이 측정방법을 이용하였다.

b. 실험지역 및 실험변수

실험은 2011년 10월 25일 오후 5시부터 27일 오후 2시까지 약 45 시간에 걸쳐 한국지질자원연구원 내에서 수행되었다. 시스템을 탑재한 차량은 연구원의 도로에 위치하였으며, 지향방향은 연구원의 잔디밭일대로 Fig. 1에 그 모습을 나타냈다. Fig. 1에서 빨간색 부채꼴로 표현한 영역이 영상화 지역이며 약 30 ~ 50 m 지점에는 언덕과 나무가 위치한다. 약 130 ~ 160 m 지점에 삼각형으로 표시한 것은 안정된 신호 획득을 위해 설치한 삼각삼면반사체이다. 이 중 노란색은 빗변이 50 cm, 파란색은 10 cm이며, 각 반사체간의 간격은 약 10 m이다. 변위분석은 이 반사체들의 위상변화를 통해 계산된다. Table 1은 본 연구 수행 시 실험변수들을 나타낸다.

Table 1. 실험변수

변수	수치
중심주파수	9.5 GHz (X-band)
밴드폭	0.3 Ghz
레인지 샘플링	801
파워	37 (dBm)
레인지 방향 관측 거리	200 m
붐 길이	3000 mm
측정간격	0.54 °
총 측정각도	139.86 °
측정 편파	VV, HH



Fig. 1. 실험지역의 광학영상(@googleearth)

3. Arc-SAR 영상과 위상변화

획득된 데이터는 이훈열(2012)을 통해 개발된 극좌표 기반의 time-domain 알고리즘을 이용하여 영상화하였으며, 실험차수 1의 VV 편파 amplitude 영상을 Fig. 2에 나타냈다. 이를 통해 근거리의 나무와 언덕, 130 ~ 160 m 지점의 4개의 반사체, 그리고 약 150 m 지점부터 나타나는 나무와 연구소의 경계 등을 확인할 수 있다. 다만 2번째 반사체의 신호가 다른 것들에 비해 약하게 표현되었으며, 이 지점의 위상도 다른 것들에 비해 불규칙한 변화양상을 보였다. 이러한 이유로 변위 분석 시 4개의 반사체 중 가장 가까운 곳의 반사체(r1)와 가장 먼 지점의 반사체(r4)의 위상을 사용하였다.

Fig. 3은 총 65회에 걸쳐 획득된 두 반사체의 VV 편파 위상변화를 나타낸다. 위상 변화 폭은 r4가 r1에 비해 약 0.04 radian, 거리로 환산 시 약 0.1 mm더 크게 나타나고 있지만, 변화 양상은 동일한 모습을 보인다. 실험차수 1(n1)을 기준으로 위상이 가장 작은 값을 보인 지점은 실험 시작 후 약 12시간이 지난 n20이었고, 가장 큰 값은 43시간이 지난 n65 때 나타났다. 미세한 값의 차이를 보이나 이러한 결과는 HH 편파에서도 동일하게 나타났다. 대기보정을 위해서는 연속된 실험

에서 규칙적인 변화를 보임과 동시에 가장 급격한 위상 차이를 나타낸 n7에서 n30의 약 16시간의 데이터를 사용하였는데 이 지점은 Fig. 3에 녹색 박스로 나타냈다. 이 지점에서의 최대 위상 차이는 4.24 radian, 거리로 환산 시 10.5 mm이며, RMSE는 1.74 radian, 4.3 mm로 나타났다.

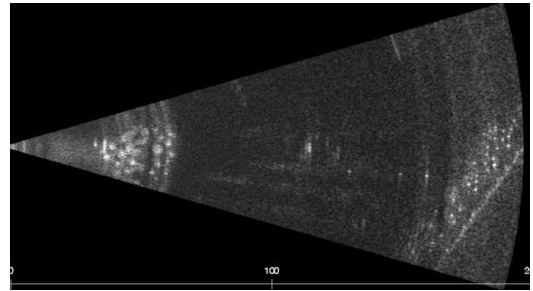


Fig. 2. time-domain 알고리즘을 통해 획득한 VV 편파의 amplitude 영상

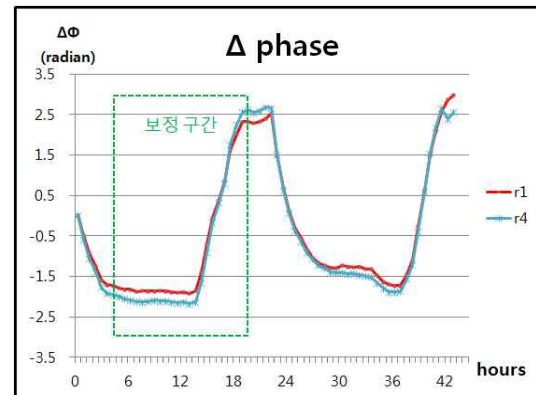


Fig. 3. VV편파의 위상변화

4. 대기굴절률

a. 대기굴절률 산출

위상변화 양상이 약 24시간을 주기로 변화하고, 거리에 따른 차이를 나타낸다는 점을 근거로 기상의 영향을 받는다고 추정하고 이에 따른 영향을 보정하고자 하였다. 실험시간에 대한 대기 자료는 기상청에서 제공하는 분 단위 Automatic Weather System(AWS)을 통해 획득하였

다. 1회 측정에는 약 40분이 소요되므로 40개의 데이터를 평균하여 각 실험차수에 대한 기상 자료로 가정하였고, 이를 통해 계산된 온도와 습도를 Fig. 4(a)에 나타냈다. Pipia *et al.*,(2008)에서는 대기굴절률을 이용한 지상 SAR 시스템의 위상보정을 실시한 바 있다. 대기굴절률의 산출에 대해서는 다음의 식을 사용하고 있다.

$$n = 1 + 10^{-6} \times \left(77.6 \frac{P}{T} + 600 \frac{P}{T^2} h \cdot 10^{\frac{12.22 - \log_{10}(P)}{0}} \right) \quad (1)$$

p는 기압(millibar), T는 온도(kelvin), h는 습도(percent per hundred)이다. Fig. 4(a)의 기상 자료와 기압을 이용하여 굴절률을 구할 수 있었으며 산출된 값은 Fig. 4(b)에 나타냈다. 이를 통해 대기굴절률 변화는 습도 변화와 비례, 온도 및 위상변화와는 반비례 관계임을 알 수 있다.

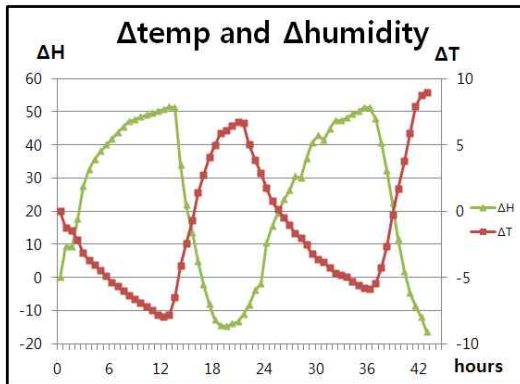


Fig. 4(a). 실험시간에 대한 온/습도의 변화

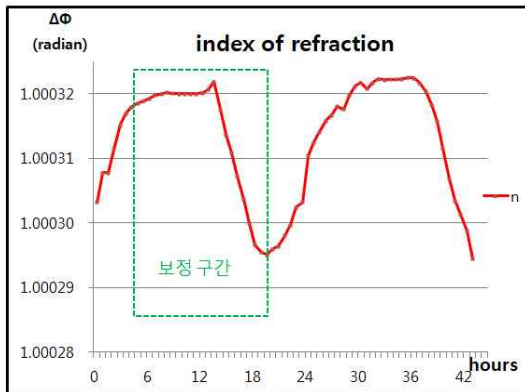


Fig. 4(b). 실험시간에 대기굴절률의 변화

b. 보정 결과

선택된 구간에 대한 대기굴절률과 각각의 지점(VV편파의 r1과 r4, HH편파의 r1과 r4)의 위상변화를 1차식의 관계로 가정하고 관계를 구하였다. 이 중 Fig. 5(a)에는 VV편파 r1의 위상과 대기굴절률의 관계를 나타냈으며, 이를 포함한 모든 경우에서 결정계수는 0.99 이상의 높은 값을 보였다. 산출된 계수를 이용해 각 지점에서의 위상을 보정하였으며, 이 중 VV편파 r1의 결과를 Fig. 5(b)에 나타냈다. 보정 전 1.74 radian(4.31 mm)의 RMSE는 보정 후에는 0.10 radian(0.24 mm)로 줄어들었다. 이를 통해 대기굴절률을 이용한 보정이 효과적으로 작용하였으며, 지상 SAR 시스템을 이용한 변위측정 시 보정이 반드시 필요함을 알 수 있다.

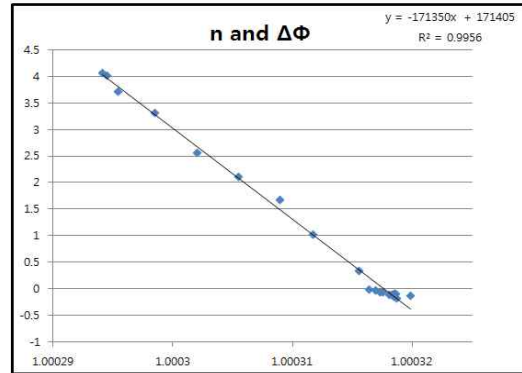


Fig. 5(a). 굴절률과 위상변화와의 관계

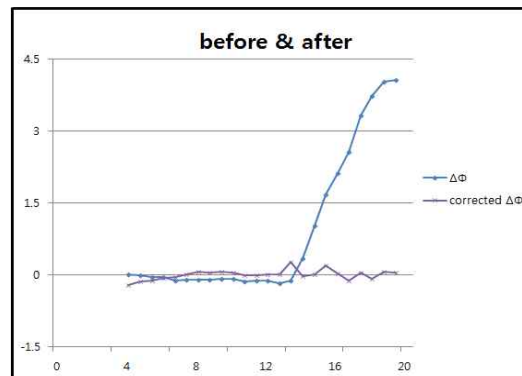


Fig. 5(b). 보정 전·후의 위상변화

5. 결론

Arc-SAR 시스템의 스팟모드를 이용하여 고정된 산란체에 대한 위상변화 현상을 약 43시간 동안 모니터링하였다. 산란체의 위상은 고정된 상태임에도 최대 약 5 radian, RMSE 1.62 radian의 큰 변화를 보였다. 이러한 위상변화의 원인을 기상변화로 추정하였고, 이에 대한 영향을 보정하였다. RMSE 1.74 radian으로 가장 급격한 위상변화를 보인 구간에 대해 보정을 한 결과 RMSE는 약 0.1 radian으로 감소하였다. 이를 통해 지상 SAR 시스템을 이용한 변위측정 시 대기굴절률을 이용한 보정이 반드시 필요함을 확인할 수 있었다.

6. 감사의 글

이 연구는 국토해양부 첨단도시기술개발사업-지능형국토정보기술혁신사업 과제인 연구비지원(07국토정보CO3)에 의해 수행되었습니다.

7. 참고문헌

김광은, 조성준, 성낙훈, 이재희, 강문경, 2011. 원형레이저 기반 지상 SAR 시스템에서의 안테나 위치 정밀 제어 기술 개발, *Korean Journal of Remote Sensing*, 27(1): 25-31

이재희, 이훈열, 조성준, 성낙훈, 김정호, 2010. GB-SAR 간섭기법을 이용한 반사체의 인위적 변위탐지 및 대기습도보정, *Korean Journal of Remote Sensing*, 26(2): 123-131

이훈열, 조성준, 성낙훈, 김정호, 2007. GB-SAR의 개발(II): 영상화 기법, *Korean Journal of Remote Sensing*, 23(4): 247-256

이훈열, 2012, private communication.

Cho, B. -L., Y. -K. Kong, H. -G. Park, and Y. -S. Kim, 2006. Automobile-based SAR/InSAR system for ground experiments. *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 3(3): 401-405.

Garmatyuk, D. S., and R. M. Narayanan, 2002. Ultra-wideband continuous-wave random noise Arc-SAR. *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(12): 2543-2552.

Hoonyol Lee, Seong-Jun Cho, and Kwang-Eun Kim, 2010. A ground-based arc-scanning synthetic aperture radar(ArcSAR) system and focusing algorithms, *in proc. IGARSS*, 3490-3493.

Noferini, L., M. Pieraccini, D. Mecatti, G. Luzi, C. Atzeni, A. Tamburini, and M. Broccolato, 2005. Permanent scatterers analysis for atmospheric correction in ground-based SAR interferometry, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(7): 1459-1471.

Pipia, L., X. Fabregas, A. Aguasca, and C. Lopez-Martinez, 2008. Atmospheric artifact compensation in ground-based DInSAR applications, *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, 5(1): 88-92.

Tarchi, D., N. Casagli, R. Fanti, D. D. Leva, G. Luzi, A. Pasuto, M. Pieraccini, and S. Silvano, 2003. Landslide monitoring by using ground-based SAR interferometry: an

example of application to the Tessina
landslide in Italy, *Engineering
Geology*, 68: 15–30.