

대기 굴절률을 이용한 원형레일 기반 지상 SAR 자료의 대기보정

이재희* · 김광은*[†] · 조성준* · 성낙훈* · 이훈열**

* 한국지질자원연구원 광물자원연구본부, ** 강원대학교 지구물리학과

Atmospheric Correction of Arc-Rail Type GB-SAR 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

Abstract : In this paper, an atmospheric effect of repetitive measurements of X-band (9.65 GHz) arc-rail type GB-SAR (ArcSAR) system was quantitatively analyzed. Four artificial triangular trihedral corner reflectors as stationary targets for getting stable back scattered signal during 43 hours continually. The results of the analysis showed that the phase of those stationary targets had changed maximum of 5 radian (12.4 mm) and total RMS error had was 1.62 radian (4 mm) during 65 repeated measuring time. The refractive index of air which was calculated using the temperature, humidity and pressure of atmosphere showed very close relationship with the phase difference. We could check the atmospheric correction was fulfilled by the correction of an atmospheric effect using refractive index during the selected 16 hours period showed that RMS error was dropped from 1.74 radian (4.3 mm) to 0.10 radian (0.24 mm).

Key Words : Arc-SAR system, atmospheric effect, refractive index of air, correction, displacement

요약 : 이 논문에서는 중심주파수 9.65 GHz의 X-밴드 안테나를 이용한 원형레일 기반의 지상 SAR(Arc-SAR) 시스템의 반복 실험을 통해 대기 효과를 정량적으로 분석하였다. 안정된 신호 획득을 위해 고정된 삼각삼면반사체 4개를 사용하였는데 이에 의한 신호는 약 43시간에 걸쳐 연속적으로 획득되었다. 분석 결과 반사체는 고정된 상태였지만 약 5 radian(12.4 mm)의 최대 오차를, 총 65회의 실험에 대한 RMSE는 1.62 radian(4 mm)을 보였다. 이러한 위상변화 양상은 온도, 습도, 그리고 기압을 통해 산출되는 대기굴절률의 변화 양상과 높은 상관관계를 보였다. 대기굴절률을 이용한 보정을 선택된 16시간에 대해 적용하였고 보정 결과 RMSE는 1.74 radian(4.3 mm)에서 0.10 radian(0.24 mm)으로 감소하여 보정이 효과적으로 이루어졌음을 확인하였다.

접수일(2012년 4월 1일), 수정일(1차 : 2012년 4월 19일), 게재확정일(2012년 4월 23일).

[†] 교신저자: 김광은(kimke@kigam.re.kr)

1. 서론

마이크로파를 이용하는 Synthetic Aperture Radar(SAR) 시스템은 개발 초기 인공위성이나 항공기에 탑재되어 운용되었다. 동일한 지역에 대해 반복적인 측정을 통해 획득한 SAR 영상은 간섭기법을 이용하여 지역 내에서 발생하는 변위를 높은 정밀도로 분석할 수 있다는 장점을 지닌다. 최근에는 이러한 SAR의 원리를 지상에서 적용한 지상 SAR(Ground-Based SAR) 시스템이 한국을 비롯한 일부 국가에서 연구 및 개발되었다. 지상 SAR 시스템은 인공위성 SAR와는 다르게 정지된 상태에서 마이크로파의 송수신이 이루어지기 때문에 인공위성 SAR 시스템에 비해 변위 탐지 정밀도가 향상된다. 이러한 장점을 바탕으로 지상 SAR 시스템은 산사태(Tarchi *et al.*, 2003; Leva *et al.*, 2003), 눈사태(Luzi *et al.*, 2007) 건물의 안정성 평가(Pieraccini *et al.*, 2002) 등에 적용된 바 있다. 인공위성이나 항공기 등의 전통적인 SAR 시스템과 최근 개발된 지상 SAR 시스템을 이용한 변위 탐지 연구는 결과 도출 시 대기의 영향을 배제 혹은 크게 부각시키지 않은 경우가 대부분이다. 하지만 일부 인공위성 SAR 연구에서는 대기의 영향에 대해 보정을 시도한 바 있으며(Zebker *et al.*, 1997), 지상 SAR 시스템을 이용한 연구에서도 Noferini *et al.*(2005)과 Pipia *et al.*(2008)에서는 각각 대기 중 습도와 대기굴절률을 이용한 보정을 실시하여 정밀도 향상을 확인한 바 있다. 본 연구에서와 동일한 RF 장비를 이용해 변위탐지 연구를 수행했던 이재희 외(2010)에서도 대기 중 습도의 영향을 보정하여 정밀도가 향상됨을 확인하였다. 이에 본 연구에서는 새로 개발된 원형레일 기반의 지상 SAR(Arc-SAR)시스템의 연속적인 스팟모드(spot-mode) 실험을 통해 대기 변화가 위상 변화에 끼치는 영향을 정량적으로 분석하고자 하였다. 분석 시에는 Noferini *et al.*(2005)과 이재희 외(2010)와는 다르게 습도보정이나 온도보정과 같은 개별적 대기요소가 아닌 Pipia *et al.*(2008)에서 언급한 대기굴절률을 이용하고자 하였다. Noferini *et al.*(2005)에서는 습도와 위상변화의 상관관계가 0.7이상, 이재희 외(2010)에서는 습도 및 온도가 위상변화와의 상관관계가 0.7 이상의 높은 값을 보여 개별적 요소를 이용한 위상변화 보정이 잘 이루어졌다. 하지만

Pipia *et al.*(2008)에서 이용한 대기굴절률은 대기 중 온도, 습도, 그리고 기압을 모두 포함하여 산출되는 값으로 상관관계와는 무관하게 보다 향상된 보정 결과를 보였기 때문이다. 그러므로 대기굴절률을 이용한 위상 변화 보정을 실시한 후 보정 전·후 결과를 비교함으로써 변위탐지 정밀도 향상을 위한 대기굴절률 보정의 필요성에 대해 확인하고자 하였다.

2. Arc-SAR 시스템 및 실험

1) Arc-SAR 시스템 및 측정모드

본 연구에서 이용된 Arc-SAR 시스템은 선형레일 기반의 지상 SAR(GB-linear SAR) 시스템의 일부 한계점을 극복하고자 차량에 탑재한 원형레일 기반의 지상 SAR 시스템이다. 선형레일 기반의 SAR 시스템의 한계점이란 고정밀 레일 설치에 따른 비용과 시간의 투자, 그리고 제한된 합성 구간을 의미한다. 정밀한 레일 설치를 위해서는 많은 시간을 필요로 하므로 긴급한 측정이 필요한 곳에는 적합하지 않을 수 있다. 하지만 시스템이 차량에 탑재되어 있는 경우, 신속한 이동이 가능하고 즉각적인 측정을 수행할 수 있다. 또한 레일의 길이가 차량의 길이로 제한되고, 안테나가 한 방향만을 지향할 때 azimuth 방향으로의 움직임을 선형이 아닌 원형을 채택함으로써 합성구간을 $\frac{\pi}{2}$ 만큼 확장시킬 수 있다. 이러한 차량 탑재형 원형레일 기반의 지상 SAR 시스템은 Garmatyuk and Narayanan(2002)과 Cho *et al.*(2006)에서 시도가 되었으나, 본 연구에서와 같은 모션과 원리를 채택하지는 않았다.

RF 장비 중 마이크로파의 송신과 수신을 담당하는 VNA는 10 MHz에서 20 GHz까지 사용 가능한 agilent사의 E8362B 모델을 사용하였다. 신호의 증폭을 위해 마이크로파 앰프(6 W)를 사용하였고, 안테나는 중심주파수가 9.65 GHz인 X-밴드 안테나를 주문제작하여 사용하였다. 결과 해석 시 편파에 따른 차이를 확인하기 위해 마이크로파 스위치를 사용하여 동일지점에서 둘 이상의 편파 측정이 가능하게 설정하였다. 스위치와 앰프 사용 시 비가역성에 의해 안테나는 송신용과 수신용을 각각 따로 사용해야 했고 이러한 2개의 안테나는 안



(a)



(b)

Fig. 1. (a) A side photo of overall system and (b) An extendable antenna boom and antenna mount including 2 X-band antennas.

테나 붐의 끝단에 위치한 안테나 지지대에 수직적으로 연결하였다. 안테나 붐의 경우 차량의 길이로 제한된 합성 길이를 연장하기 위해 길이 변경이 가능하도록 설계·사용하였다. 평소 안테나 붐은 2.19 m의 길이를 보이지만, 최대 4.13 m까지 확장이 가능하다. 이러한 실제 시스템의 모습은 Fig. 1에 나타났다.

원형레일을 이용한 원형적 모션을 통해 전통적인 SAR와 같이 range 방향을 한 쪽으로 유지하기 위해서 시스템은 2 개의 모터를 필요로 한다. 시스템 전체를 움직이게 하는 중앙의 모터와 안테나 하부에 위치하는 모터가 그것이다. 중앙의 모터가 일정 방향으로 회전을 하게 되면, 안테나 하부에 장착된 모터가 안테나를 반대 방향으로 같은 회전각만큼 회전시켜 안테나를 지속적으로 한 방향을 지향하게끔 유지한다. 본 시스템에서 이러한 측정 방법을 스팟모드라고 명명하였고, 본 연구에서는 이 방법을 이용하였다(이재희 외, 2012).

2) 실험지역 및 실험변수

실험은 2011년 10월 25일 오후 5시부터 27일 오후 1



Fig. 2. A photo of measurement area from google earth.

Table 1. Parameters of measurements

parameter	value
center frequency	9.65 GHz
bandwidth	0.3 GHz
range sampling	801
power	6 W
maximum of range	200 m
boom length(radius)	3000 mm
spacing	0.54°
total degree	139.86°
polarization	VV, HH

시까지 약 43시간에 걸쳐 한국지질자원연구원 내에서 수행되었다. 시스템을 탑재한 차량은 연구원의 도로에 위치하였고, 지향방향은 연구원의 잔디밭 일대로 Fig. 2에 그 모습을 나타냈다. Fig. 2에서 빨간색 부채꼴로 표현한 영역이 영상화 지역이며 약 30 ~ 50 m 지점에는 언덕과 나무가 위치한다. 약 130 ~ 160 m 지점에 표시된 삼각형은 안정된 신호 획득을 위해 설치한 삼각삼면반사체이다. 노란색은 빗변이 50 cm, 파란색은 10 cm이며 각 반사체는 서로 약 10 m의 간격을 두고 고정·위치시켰으며, 변위분석은 이 반사체들의 위상변화를 통해 계산하게 된다. Table 1에는 본 연구에서의 실험변수들을 나타내었다.

3. Arc-SAR 영상과 위상변화

획득된 데이터는 이훈열(2012)을 통해 개발된 극좌표 기반의 Time-Domain 알고리즘을 이용하여 영상화하였다. 이훈열 외(2007)에서는 선형기반의 Deramp-

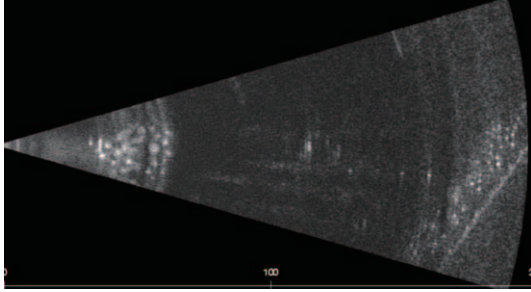


Fig. 3. An Arc-SAR VV polarization image by Time-domain algorithm in polar coordinates.

FFT 알고리즘 개발을, Lee *et al.*(2010)에서는 극좌표 기반의 Deramp-FFT 알고리즘을 개발을 발표한 바 있으나 본 연구에서 사용한 알고리즘과는 차이를 보인다. 획득된 영상 중 실험차수 1의 VV 편파 Amplitude 영상을 Fig. 3에 나타냈다. Fig. 3을 통해 시스템으로부터 30 ~ 50 m 지점에 위치한 언덕과 나무, 130 ~ 160 m 지점에 위치한 4 개의 반사체의 신호를 확인할 수 있다. 4 개의 반사체 중 2 번째 반사체의 신호는 다른 것들에 비해 약하게 표현되었는데 이는 다른 것들에 비해 작은 크기가 원인인 것으로 판단된다. 각각의 반사체에는 시스템으로부터 거리에 따라 r1에서 r4의 이름을 붙였다. Arc-SAR 영상에서 위상은 다음과 같이 표현된다.

$$\phi = -\frac{4\pi}{\lambda}nR \quad (1)$$

식에서 λ 는 진공상태에서의 마이크로파의 파장, R은 시스템과 대상체간의 거리, n은 대기굴절률(refractive index of air)을 의미한다. 식 (1)은 식(2)와 같이 변환할 수 있다.

$$\Delta\phi = -\frac{4\pi}{\lambda}\Delta nR \quad (2)$$

특정 물체가 완전히 고정된 상태라고 가정하고, Arc-SAR 영상에서 위상 변화가 발생한다면 이는 곧 기상변화에 의한 것이라고 판단할 수 있다. 만약 위상변화와 대기굴절률의 관계를 정량적으로 파악하여 보정 상수를 산출할 수 있다면, 미세한 변위 탐지를 필요로 하는 지역에 보다 정밀한 분석에 도움이 될 수 있을 것이다.

Fig. 4(a)는 총 65회에 걸쳐 획득된 VV 편파 영상에서의 4 개의 반사체 위상 변화를 나타낸다. 모든 반사체에서의 변화 양상은 동일하게 약 24시간을 주기로 일정한 증가와 감소를 반복하고 있다. n2의 경우 전체적인 변화 양상은 다른 반사체와 유사하지만, 일부 지점에서의 값은 차이를 보인다. 이는 반사체의 크기 때문에 일정치 않은 수신이 이루어졌기 때문으로 판단하였다. 원활한 해석을 위해서 시스템으로부터 거리가 가장 가까웠던 r1과 가장 멀었던 r4의 위상변화만을 추출하여 Fig. 4(b)에 나타냈다. Fig. 4(b)를 통해 r4의 변화폭은 r1에 비해 약 0.04 radian, 거리로 환산 시 약 0.1 mm 더 크게 나타나고 있음을 확인할 수 있다. 또한 실험차수 1(n1)을 기준으로 가장 작은 위상은 실험 시작 후 약 12시간이 지난 n20에서, 반대로 가장 큰 값은 약 43시간이 지난 n65 지점에서 나타났다. 이러한 양상은 HH편파에서도 동일하게 나타났다. 보정을 위해서 연속된 실험 중 규칙적이고도 가장 급격한 위상 변화를 보인 n7에서 n30의 약 16시간의 데이터를 사용하였는데, 이는 Fig. 4(b)에 표시하였다. 이 구간에서의 최대 위상 차이

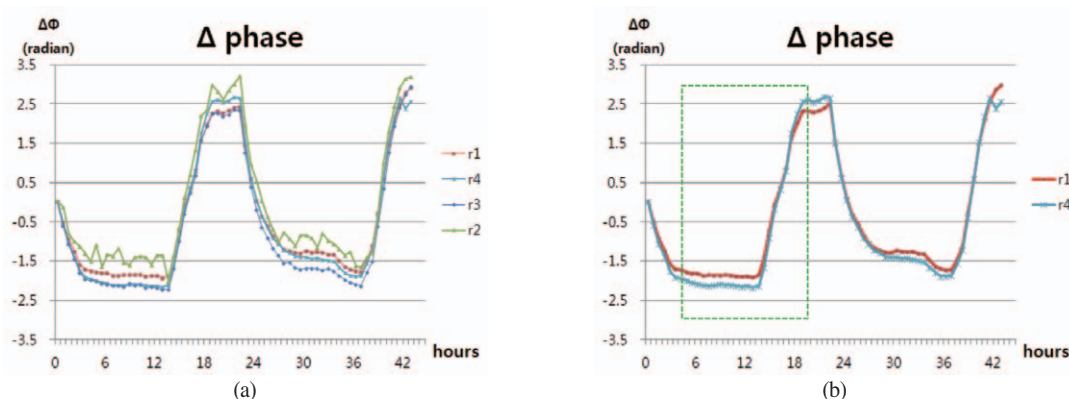


Fig. 4. Phase difference at VV polarization. (a) results of 4-reflectors and (b) results of r1 and r4 especially.

는 4.24 radian, 거리로 환산 시 10.5 mm이며 RMSE는 1.74 radian(4.3 mm)으로 나타났다.

4. 대기굴절률

1) 대기굴절률 산출

고정된 산란체에서 위상변화가 발생하고, 그 주기가 약 24시간이라는 점을 근거로 기상변화가 위상변화의 원인이라고 추정하고 이에 따른 영향을 보정하고자 하였다. 실험시간에 대한 대기 자료는 실험지역과 직선거리로 약 1 km 떨어진 곳에 위치한 대전지방기상청에서 제공하는 분 단위 AWS(Automatic Weather System)를 이용하였다. 1회 측정에 소요되는 시간에 대한 모든 데이터를 평균하여 그 실험차수에 대한 자료라 가정하였고 이를 통해 계산된 온도와 습도를 Fig. 5(a)에, 최소·최대·평균값을 요약하여 Table 2에 나타냈다. 한편, Pipia *et al.*(2008)에서는 대기굴절률을 이용한 지상 SAR 시스템의 위상보정을 실시한 바 있다. 대기굴절률의 산출식으로는 다음의 식(3)을 사용하였다.

$$n = 1 + 10^{-6} \times (776 \frac{P}{T} + 600 \frac{P}{T^2} h \cdot 10^{12.22 - \log_{10}(P) - \frac{2360}{T}}) \quad (3)$$

P는 기압(millibar), T는 온도(kelvin), h는 습도(percent per hundred)이다. Fig. 5(a)에 나타낸 온도, 습도와 기압을 이용한 대기굴절률을 산출하여 Fig. 5(b)에 나타냈다. 산출된 대기굴절률의 범위는 일반적으로 알려진 대기굴절률 값인 1.0003에서 크게 벗어나지 않는다. Fig. 4와 5의 비교를 통해 위상변화 양상은 온도 변화와 비례, 습도와 대기굴절률과는 반비례 관계임을 확인할 수 있다.

2) 보정 결과

선택된 16시간에 대한 대기굴절률과 이 구간에서 VV 편파 r1의 위상변화와의 관계를 Fig. 6(a)에 나타냈다. x축을 대기굴절률, y축을 위상변화로 설정하였으며 1차식의 관계로 가정할 경우 결정계수는 0.99 이상의 높은 값을 나타낸다. 이때의 기울기와 절편은 보정상수로 활용할 수 있다. 산출된 보정상수를 이용하여 각 지점에서의 위상을 보정하였으며, 대표적으로 선택된 구간에서의 VV 편파 r1의 결과를 Fig. 6(b)에 나타냈다. 보정 전 1.74 radian(4.31 mm)이었던 RMSE는 보정 후 0.10 radian(0.24 mm)으로 크게 감소하며, 모든 구간에서 위상변화가 0에 근접하는 모습을 확인할 수 있다. 추가적으로 r3와 r4, 그리고 HH편파의 r1, r3, r4의 결과를 정리하여 Table 3에 나타냈다. 결과적으로 모든 편파 및 반사체에서 보정은 효과적으로 이루어졌음을 알 수 있다.

Table 2. Minimum, maximum and mean value of atmospheric data in measurement time

	temperature(°C)	humidity(%)	air pressure(hPa)
min	0.89	23.17	1020.4
max	17.84	91.13	1020.9
mean	7.50	63.97	1020.6

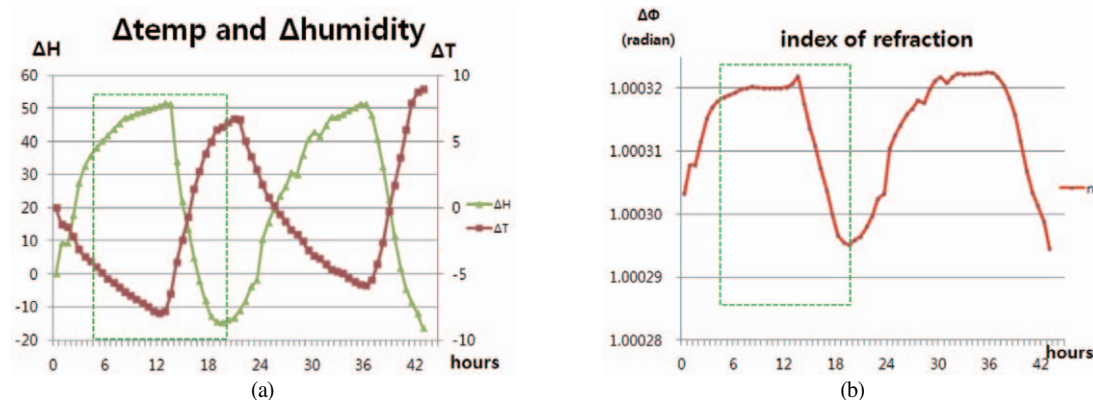


Fig. 5. (a) Change of humidity and temperature in measurement time. (b) Change of calculated refractive index of air using temperature, humidity and air pressure.

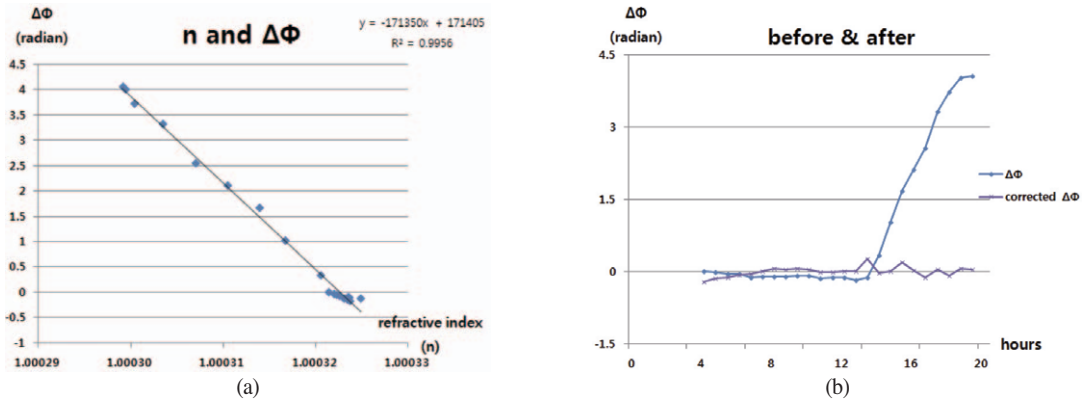


Fig. 6. (a) Calculated a coefficient of determination and a constant between change of phase and refractive index of air. (b) A comparison of phase difference before and after the correction.

Table 3. A comparison of RMSE before and after the correction

	VV(radian/mm)		HH(radian/mm)	
	before	after	before	after
r1	1.74(4.30)	0.10(0.25)	1.71(4.23)	0.13(0.32)
r3	1.83(4.53)	0.09(0.22)	1.81(4.48)	0.15(0.37)
r4	1.94(4.79)	0.11(0.27)	1.95(4.82)	0.12(0.30)

5. 결론

X-밴드 Arc-SAR 시스템의 스왑모드를 통해 VV, HH 편파에서 고정된 4 개의 산란체에 대한 위상변화를 모니터링하였다. 연속 43시간 동안 진행된 실험의 분석 결과, 2 편파에서 서로 동일한 양상의 위상변화 현상이 나타났다. 최대 위상변화는 VV 편파에서 약 5 radian으로, RMSE는 VV와 HH편파에서 각각 1.62, 1.60 radian으로 나타났다. 위상변화와 기상변화 양상을 통해 서로 관계가 있음을 파악하고 기상변화를 이용한 위상변화 보정을 실시하고자 하였다. 보정은 대기 중 온도, 습도, 그리고 기압을 이용해 산출되는 대기굴절률을 이용하여 이루어졌고, 총 43시간의 측정 시간 중 가장 급격한 변화를 보인 연속 16시간에 대해 적용하였다. 보정 결과, 선택된 구간에서의 RMSE는 VV, HH편파에서 각각 0.10, 0.13 radian으로 감소하였으며 2편파, 4 개의 반사체에서 모두 동일하게 감소하였다. 이를 통해 지상 SAR 시스템을 이용한 변위탐지 시 대기굴절률을 이용한 보정이 반드시 필요함을 확인할 수 있었다.

사 사

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

참고문헌

- 이재희, 이훈열, 조성준, 성낙훈, 김정호, 2010. GB-SAR 간섭기법을 이용한 반사체의 인위적 변위 탐지 및 대기습도 보정, 대한원격탐사학회지, 26(2): 123-131.
- 이재희, 김광은, 조성준, 성낙훈, 이훈열, 2012. Arc-SAR 시스템 개발 및 결과영상, 2012 대한원격탐사학회 춘계학술대회 논문집, 무주, Mar. 29-30, 79-83.
- 이훈열, 조성준, 성낙훈, 김정호, 2007. GB-SAR의 개발(Ⅱ): 영상화 기법, 대한원격탐사학회지, 23(4): 247-256.
- 이훈열, 2012. personal 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.
- Lee, H., S.-J. Cho, and K.-E. Kim, 2010. A ground-based arc-scanning synthetic aperture radar (ArcSAR) system and focusing algorithms, *Proc. of 2010 International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Honolulu, Hawaii, July. 25-30, 3490-3493.
- Leva, D., G. Nico, D. Tarchi, J.F. Guasch, and A.J. Sieber, 2003. Temporal analysis of a landslide by means of a Ground-Based SAR interferometer, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(4): 745-752.
- Luzi, G., M. Pieraccini, D. Mecatti, L. Noferini, G. Macaluso, A. Tamburini, and C. Atzeni 2007. Monitoring of an Alpine glacier by means of Ground-Based SAR interferometry, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 4(3): 495-499.
- 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.
- Pieraccini, M., D. Mecatti, L. Noferini, G. Luzi, G. Franchioni, and C. Atzeni, 2002. SAR interferometry for detecting the effects of earthquakes on buildings, *NDT&E International*, 35(2002): 615-625.
- 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.
- Zebker, H.A., P.A. Rosen, and S. Hensley, 1997. Atmospheric effects in interferometric synthetic aperture radar surface deformation and topographic maps, *Journal of Geophysics Research*, 102(B4): 7547-7563.