

GB-SAR의 개발 (I) : 시스템 구성과 간섭기법

이훈열* · 조성준**† · 성낙훈** · 김정호**

*강원대학교 지구물리학과, **한국지질자원연구원 지반안전연구부

Development a GB-SAR (I) : System Configuration and Interferometry

Hoonyol Lee*, Seong-Jun Cho**†, Nak-Hoon Sung**, and Jung-Ho Kim**

*Department of Geophysics, Kangwon National University, **Korea Institute of Geoscience and Mineral Resources

Abstract : GB-SAR (Ground-Based Synthetic Aperture Radar) system is an imaging radar that obtains high resolution 2-D image through a synthetic aperture effect from the accurate linear-motion control of antenna on the ground. The highly versatile system configurations and accurate repeatability of GB-SAR operation allow one to accurately monitor the stability of surface scatterers with millimeter accuracy by SAR interferometry. In this paper we introduce the development of a GB-SAR system and show the possibilities of SAR polarimetry and interferometry such as DInSAR, Cross-Track InSAR, Delta-f InSAR, and PSInSAR.

Key Words : GB-SAR, imaging radar, polarimetry, interferometry.

요약 : GB-SAR (Ground-Based Synthetic Aperture Radar) 시스템은 지상에서 안테나의 정밀한 일축 제어를 통해 합성 구경(synthetic aperture) 효과를 얻어 높은 해상도의 2차원적 영상을 얻는 영상레이더(imaging radar)이다. GB-SAR 시스템의 높은 유연성과 안정된 반복 측정으로 SAR 간섭기법을 통하여 산란체의 시간에 따른 변위를 mm 정밀도로 모니터링 할 수 있다. 이 논문에서는 GB-SAR 시스템의 개발을 소개하고 여러 가지 영상 획득 모드를 통하여 얻어진 다편파 SAR 영상을 비롯하여 DInSAR, Cross-Track InSAR, Delta-f InSAR, PSInSAR 등 GB-SAR 시스템을 이용한 다양한 간섭기법의 응용 가능성을 보였다.

1. 서론

GB-SAR (Ground-Based Synthetic Aperture Radar)는 지상에서 안테나의 위치를 제어하여 합성 구경을 이루어 높은 해상도의 2차원적 영상을 얻는 영상레이더(imaging radar)로서, SAR의 원리를 이용하는 일종의 레이더 스캐너(radar scanner)라 할 수 있다.

레일과 같이 지상에 고착된 플랫폼에서 일축 운동을 통하여 안테나의 움직임을 정밀하게 제어할 수 있기 때문에, 항공기 및 인공위성에 탑재되어 운용되는 일반적인 SAR 시스템과는 달리 반복 정확성이 매우 뛰어난 것이 특징이다. 또한 안테나와 산란체의 기하학적 위치 관계를 정확하게 찾아낼 수 있기 때문에 최적의 SAR 영상화(focusing)를 구현할 수 있으며, 안테나를 동일한 위치

에서 반복 측정하여 SAR 간섭 기법에서의 기선의 길이를 영(zero-baseline)으로 유지할 수 있다.

GB-SAR는 유지 및 보수가 쉽고 다양한 마이크로파 파장, 편파, 입사각 등을 구현할 수 있어, 항공기 및 인공위성 SAR의 지상 검보정 및 개념 설계용으로 사용될 수 있을 뿐만 아니라 독자적으로도 새로운 응용성을 찾을 수 있는 유망한 기술이다. 다양한 파장과 편파의 마이크로파에 반응하는 산란체의 특성 및 변화를 고해상도로 모니터링하거나, 위상의 변화를 장기간 관측하여 지반 침하량 계측, 사면 안정성 평가, 눈사태 감지와 같은 인공 및 자연 구조물의 안정성을 판단하는 목적으로도 사용될 수 있다.

그 동안 실내에서 안테나의 움직임을 통해 SAR 영상을 구현한 노력은 Fortuny and Sieber(1994) 및 Nesti et al.(1996)에서 찾을 수 있다. 실외에서의 GB-SAR의 개발과 공학적 응용은 특히 이탈리아를 중심으로 최근 활발하게 발전해 오고 있는데, 빌딩의 안정성(Tarchi et al., 2000), 산사태(Leva et al., 2003; Tarchi et al., 2003), 지형고도 매핑(Nico et al., 2004; Nico et al., 2005)에 적용한 바 있다. 영국에서도 실내 및 실외에서 농작물의 산란 특성을 연구한 결과가 있으며(Brown et al., 2003; Gomez-Dans et al., 2006), 일본에서도 GB-SAR를 이용하여 식생을 관찰한 바 있다(Zhou et al., 2004). 국내에서는 지상에서 운행되는 자동차용 SAR 시스템이 구현된 바 있으나(Cho et al., 2006), 지상에 고정된 레일을 이용한 정밀한 반복 측정을 통하여 SAR 간섭기법을 구현하기 위한 GB-SAR 시스템이 제작된 것은 이번이 처음이다.

이 논문에서는 강원대와 한국지질자원연구원의 협력으로 설계 제작된 GB-SAR 시스템을 소개하고, 다양한 모드의 영상 획득을 통하여 SAR의 편파기법(polarimetry) 및 간섭기법(interferometry)을 시험적으로 구현한 내용을 소개하고자 한다.

2. GB-SAR 시스템 구성

GB-SAR 시스템은 크게 마이크로파 산란 측정을 위한 'RF 부분'과 시스템의 움직임을 구현하기 위한 '모션 부분'으로 나뉘어져 있다. RF 부분은 GPIB-인터페이스를

이스를 이용해 모션 부분이 장착된 PXI (조성준 외, 2005)에 연결되며, PXI는 다시 전용 인터페이스를 통해 노트북 컴퓨터로 연결된다. 컴퓨터에서 자체 제작된 LabVIEW 프로그램으로 모든 시스템이 자동으로 제어되며, 자료 획득 후 GB-SAR 영상화 및 간섭기법 프로그램으로 후처리된다(Fig. 1).

RF 부분은 벡터 네트워크 분석기(Vector Network Analyzer, VNA), 파워 앰프(power amplifier), 마이크로파 스위치, 송·수신 안테나 등으로 이루어져 있다. VNA는 30KHz~6GHz 대역까지 사용이 가능한 Agilent 8753ES 기종을 이용하였다. 이 기종의 최대 파워는 10 dBm로 제한되어 있기 때문에 마이크로파 앰프를 사용하여 최대 출력을 33 dBm (2W)까지 높여주었다. 앰프의 비가역적 특성 때문에 송신과 수신을 각각 담당하는 두 개의 안테나를 적당한 간격을 두고 설치하였다. 안테나는 Ortho-Mode Transducer를 이용한 dual-polarization square horn antenna를 사용하였다. 주파수 대역은 5~5.6GHz, 중심 주파수는 5.3GHz로서 ERS-1/2, Envisat, Radarsat-1과 같은 인공위성 SAR 영상과 동일한 C-band를 사용하도록 설계되었다(Table 1). 송신과 수신 포트는 마이크로파 스위치를 이용하여 자동으로 제어되어 다중 편파(VV, VH, HV, HH) 자료를 동시에 획득한다.

모션 부분은 레일, 모션 컨트롤러, 스텝 모터 등으로 구성되어 있다. 각 2m 길이의 레일 세 개를 연결하여 총 6 m의 레일을 만들었다. 모션 컨트롤러 및 스텝 모터를 이용하여 안테나의 수평적 혹은 수직적 이동이 가능하도록 하여, 수평적 이동은 SAR 영상화에, 수직적 이동은 SAR 간섭기법을 구현하기 위한 수직기선

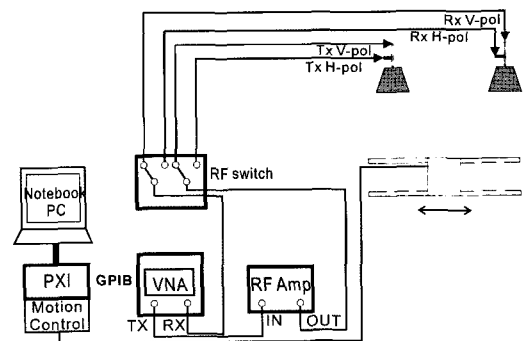


Fig. 1. Configuration of a GB-SAR system.

Table 1. Characteristics of a C-band dual-polarimetric square horn antenna (MTG Inc.).

Item	Characteriscis		Nominal Values	Test Results
Dual-Polarimetric Square Horn Antenna	Frequency (GHz)		5.0~5.6	5.0~5.6
	Beam Width	E-Plane(deg)	15	12.1~13
		H-Plane (deg)	15	15.5~17.5
	Gain (dBi)		20	20.5~21.8
	VSWR		1.5 max.	1.4 max.
	Isolation		35dB	50dB
	Weight (kg)		4 max.	3.1 max.
	Input Impedance (Ω)		50	50

(vertical baseline)을 만들 수 있도록 설계하였다. 레일 위에 GB-SAR 시스템을 모두 탑재할 수 있도록 플랫폼을 만들었는데, 이는 스캔 도중 RF 케이블의 움직임을 없애고 시스템의 중량을 무겁게 하여 물리적으로 안정시키기 위함이다.

GB-SAR는 SAR 영상화(focusing) 과정에서 반드시 필요한 도플러 변수를 매우 정확하게 알아낼 수 있어서 최적의 영상화를 구현할 수 있다. 안테나가 레일을 따라 스텝 모터의 구동으로 측정 위치로 이동 후 정지해 있는 상태에서 마이크로파 송수신이 이루어지기 때문에, 정지한 산란체에 대하여 안테나 빔의 중심 도플러(Doppler centroid)가 영(zero-Doppler)이 된다. 또한 안테나와 산란체의 위치 관계를 정확히 계산할 수 있기 때문에 도플러의 변화(Doppler rate)값을 기하학적으로 정확히 알아낼 수 있다.

GB-SAR 시스템은 합성 구경의 길이가 제한되어 있다는 점에서 항공기 및 인공위성 SAR와는 크게 다르다. 항공기 및 위성 SAR에서는 합성 구경의 길이가 안테나의 빔 폭과 같기 때문에 full-focusing이라 할 수 있으며, 해상도는 거리에 상관없이 실제 안테나 구경의 절반이 된다. 그러나 GB-SAR는 레일에 근접한 거리를 제외한 대부분의 이미지 영역에서 합성구경이 레일의 길이로 제한되기 때문에 partial-focusing이라 할 수 있으며, 해상도 역시 거리의 함수로 주어진다. GB-SAR 영상화는 처리시간과 메모리를 고려하여, 근거리용으로는 일반적인 인공위성 SAR 프로세싱에 많이 사용되는 Range-Doppler (RD) 알고리즘을 사용하였고(이훈열, 2005), 원거리용으로는 Deramp-FFT (DF) 알고리즘을 사용하였다.

3. GB-SAR 영상 및 간섭 기법

Fig. 2와 같이 한국지질자원연구원의 동쪽 건물 옥상에 GB-SAR를 설치하여 가시거리를 확보하였다. Fig. 3은 Ikonos 위성으로 촬영된 연구 지역으로서, GB-SAR로 영상화된 영역을 아크 모양으로 표시하였다. 연구원 앞 잔디밭에서 GB-SAR 시스템까지의 높이는 약 21 m 이다.

지상 산란체에 대한 GB-SAR 영상은 편파에 따라서 서로 다른 특성을 나타내기 때문에 다양한 편파의 자료를 획득함으로써 산란체의 특징을 보다 잘 알 수 있으며, 이를 이용하여 SAR polarimetry를 구현할 수 있다. 또한 영상이 얻어지는 시간, 안테나의 공간적 위치, 혹은 중심 주파수를 달리하여 영상을 얻고, 각 영상의

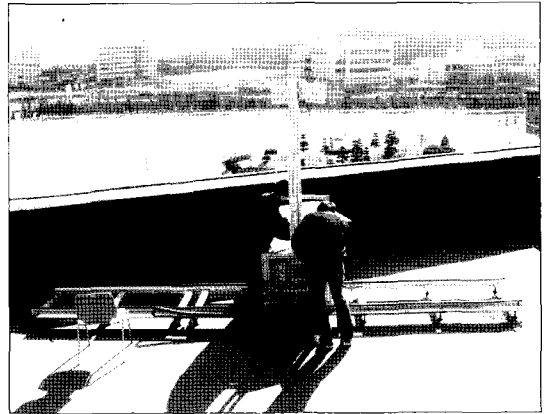


Fig. 2. The GB-SAR system and field view of the test site.

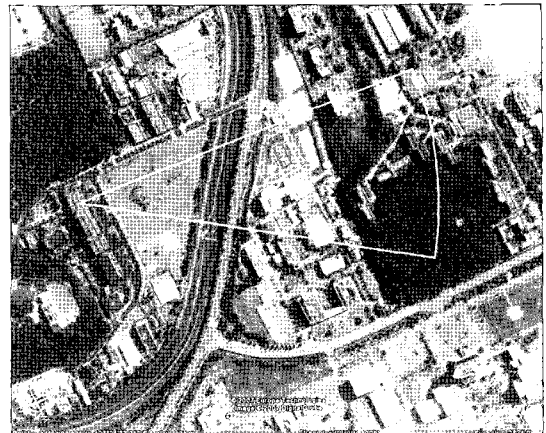


Fig. 3. Test site seen from space with a 600m-radius arc image area (Background image: © Google Earth).

Table 2. Configurations for GB-SAR experiments.

Test ID	Date yyyy.mm.dd hh:mm	Purpose	System Configuration
T1	2007.02.16 17:11~17:38	Original	Range: Frequency sweep = 5.2-5.4 GHz, Power = 33 dBm, Sampling number=1601, IFBW=1 kHz, Full-Polarization. Azimuth: scan length=5 m, step=5 cm.
T2	2007.02.16 17:40~18:06	DInSAR with T1	Same as T1 with temporal baseline of 30 minutes
T3	2007.02.16 18:16~18:41	Cross-Track InSAR with T2	Same as T2 with vertical baseline of -30 cm (30cm down)
T4	2007.02.16 19:26~19:52	Delta-f InSAR with T3	Same as T3 with center frequency shift to 5.29 GHz (frequency baseline of -10MHz)
P1-P9	2007.01.17 15:12~16:48	PSInSAR	Continuous acquisitions with Frequency sweep = 5.15-5.45 GHz, VV only

위상차를 이용하여 산란체의 움직임이나 지형을 알아내는 기술인 SAR 간섭기법(Interferometry)을 이용할 수 있다.

이 실험에서는 모든 편파의 SAR 영상을 얻어 SAR Polarimetry 기법을 실험하였고, DInSAR, Cross-Track InSAR, Delta-f InSAR, 및 PSInSAR와 같은 다양한 GB-SAR 간섭기법의 가능성을 살펴보았다. 이를 위하여 Table 2에서와 같은 시스템 구성으로 측정을 실시하였고 결과 영상을 다음과 같이 분석하였다.

1) SAR 영상 및 편광 기법

Fig. 4(a-c)는 T1 실험에서 영상화된 VV, VH, HH 영상으로서, 거리 해상도는 0.75 m이다. Azimuth 해상도는 거리의 함수로서, 100 m에서는 0.5 m이고 최대 거리인 600 m에서는 3.4 m이다. GB-SAR 시스템으로부터 약 100 m 떨어진 정원수들의 모습이 선명하게 나타나고 있으며, 140 m에 있는 지자기 관측함(흰색 구조물)도 뚜렷이 보인다. 직선으로 뻗어 있는 하천 제방(220-270 m)과 도로(275-295 m), 생명공학연구소 건물(315-400 m)과 주변 건물들의 모습이 영상화되었다.

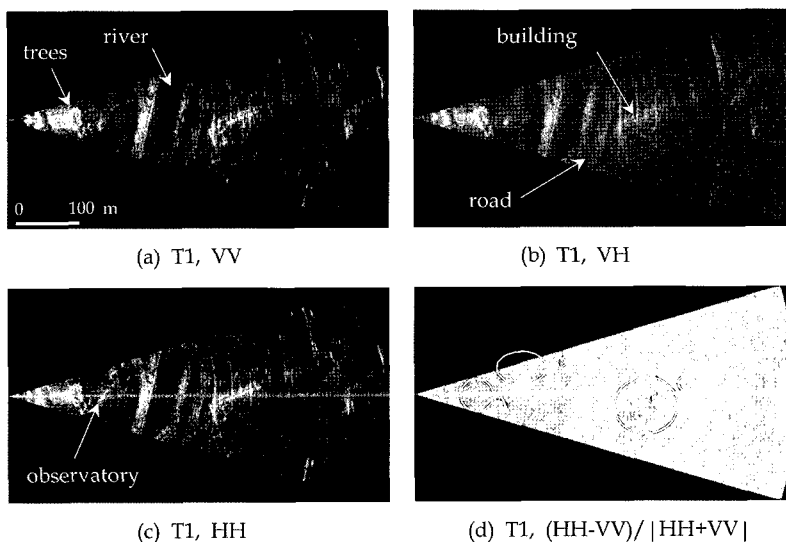


Fig. 4. Examples of GB-SAR Polarimetry. (a)-(c) shows the VV, VH, and HH amplitude images of the T1 scene. The normalized difference of polarimetric images (d) shows similar backscattering of HH and VV from the trees (circle A) due to volumetric scattering, higher signal of HH than VV for wet grass (circle B), and lower signal of HH than VV for a building (circle C). The maximum range is 600m.

Fig. 4(c)의 HH 영상에서는 송수신 안테나의 수평적 배열로 인한 잡음이 영상에서 가로선으로 나타났다. Fig. 4(d)는 HH와 VV의 정규화된 편파비(normalized polarimetric ratio)로서, 체적 산란이 많이 일어나는 정원수(A 지역)에서는 HH, VV가 별 차이가 없는 반면, 물기가 많은 잔디(B 지역)에서는 HH가 VV 편파보다 높은 값을 보였고, 건물(C 지역)에서는 HH가 VV보다 더 낮은 값을 보이는 등, SAR 편파 기법 응용의 가능성을 보여주고 있다.

2) 변위탐지를 위한 DInSAR

GB-SAR는 레일을 따라 정확한 위치에서 반복적으로 영상 측정이 가능하기 때문에 기선거리가 영(zero-baseline)인 차분 간섭 기법(Differential InSAR, DInSAR)을 구현하여 산란체의 미세한 변위를 계속할 수 있다. 시간적 기선(temporal baseline)을 두고 얻어진 두 GB-SAR 영상에서 거리 $R = R_1$ 에 있는 산란체가 레이더 방향으로 r 만큼 이동했을 때, 각각의 위상(phase)인 ϕ_1 과 ϕ_2 , 위상차(phase difference) ϕ , 및 산란체의 변위에 따른 위상차의 변화율(변위변화율)은 다음과 같다.

$$\text{위상: } \phi_1 = -\frac{4\pi}{\lambda}R_1, \quad \phi_2 = -\frac{4\pi}{\lambda}(R_1 + r) \quad (1)$$

$$\text{위상차: } \phi = \phi_2 - \phi_1 = \frac{4\pi}{\lambda}r \text{ (radian)} \quad (2)$$

$$\text{변위변화율: } \frac{\partial\phi}{\partial r} = -\frac{4\pi}{\lambda} \text{ (radian/m)} \quad (3)$$

여기서 위상의 단위는 라디안(radian)이다. 이 시스템과 같이 중심주파수가 C-band인 경우 변위변화율은 -12729 degree/m로서, 산란체에 레이더 방향으로 1 mm 증가함에 따라 -12.7° 의 위상 변화를 유발한다. 따라서 보통 인공위성 및 GB-SAR 시스템의 위상 측정 오차가 10° 미만일 경우, DInSAR의 산란체 변위에 대한 정밀도는 1 mm 이내라 할 수 있다.

Fig. 5(a)는 T2-T1의 위상차로서 약 30분 동안의 시간차를 두고 얻어진 DInSAR의 일례를 보여주고 있다. 두 영상이 얻어진 약 1시간 동안 겨울철 잔디, 제방, 건물과 같은 안정된 산란체에서는 위상의 변화가 거의 없으나, 숲, 그림자 지역, 도로의 차량과 같이 불안정한 산란체나 안테나의 방사 패턴으로 인하여 신호가 낮은 외곽 영역에서는 위상이 심하게 변동하고 있는 것을 보여

주고 있다.

3) DEM 제작을 위한 Cross-Track InSAR

Fig. 6과 같이 두 영상 간 시스템의 위치에 수직기선(vertical baseline) B_v 가 존재할 때, 위상, 위상차, 거리에 따른 위상차의 변화율(거리변화율), 그리고 산란체의 고도에 대한 위상차의 변화율(고도변화율)은 다음과 같다.

$$\text{위상: } \phi_1 = -\frac{4\pi}{\lambda}R_1, \quad \phi_2 = -\frac{4\pi}{\lambda}R_2 \quad (4)$$

$$\text{위상차: } \phi \approx -\frac{4\pi}{\lambda}B_v \cos\theta = -\frac{4\pi}{\lambda}B_v \frac{H-h}{R} \quad (B_v \ll R) \quad (5)$$

$$\text{거리변화율: } \frac{\partial\phi}{\partial R} \approx \frac{4\pi B_v (H-h)}{\lambda R^2} \quad (6)$$

$$\text{고도변화율: } \frac{\partial\phi}{\partial h} \approx \frac{4\pi B_v}{\lambda R} \quad \left(\frac{dR}{dh} = 0\right) \quad (7)$$

Fig. 5(b)는 T3-T2의 위상차로서 $B_v = -0.3$ m이며 $H = 21$ m이다. 거리변화율은 수직기선 B_v 에 비례하고 R^2 에 반비례한다. 예를 들어, $R = 100$ m에서 $h = 0$ m(연구원 잔디밭)일 때 거리변화율은 -8.0 degree/meter이다. 즉, 위상차가 360° 변화하는 간섭띠가 나타날 때 필요한 거리는 약 45 m이며, 거리에 따라 위상차가 감소한다. 이러한 간섭띠의 폭이 R^2 에 비례하여 커짐을 그림에서 확인할 수 있다. 고도변화율은 수직기선 B_v 에 비례하고 거리 R 에 반비례한다. 이 실험에서 $R = 100$ m일 때의 고도변화율은 -38.2 degree/meter이다. 즉, 고도가 1 m 증가함에 따라 위상차는 38.2° 감소하며, 약 9.5 m의 고도 차이가 있을 경우 하나의 간섭띠를 이룬다. 이 영상에서는 Cross-Track InSAR의 이론적 간섭띠를 실험을 통해 확인할 수 있었으며, 향후 GB-SAR 시스템의 편리한 운용성을 이용하여 산란체의 위치와 형태에 따라 수직기선, 거리, 시스템의 고도 등을 조절하여 DEM 형성의 최적 조건을 설계할 수 있을 것이다.

4) Delta-f InSAR

첫 번째 영상에 비하여 두 번째 영상의 중심 주파수를 $f_2 = f_1 + \Delta f$ 로 변화시킨 경우를 생각하자. 이 때 주파수(frequency)의 변화는 파수(wavenumber)의 변화를 일으키며, $\Delta k = c\Delta f/(2\pi)$ 의 관계가 있다. 따라서 Sarabandi (1997)의 Delta-k InSAR와 여기서의 Delta-f InSAR는 동일한 의미를 가진다. 이 경우 두 영상의 위상, 위상

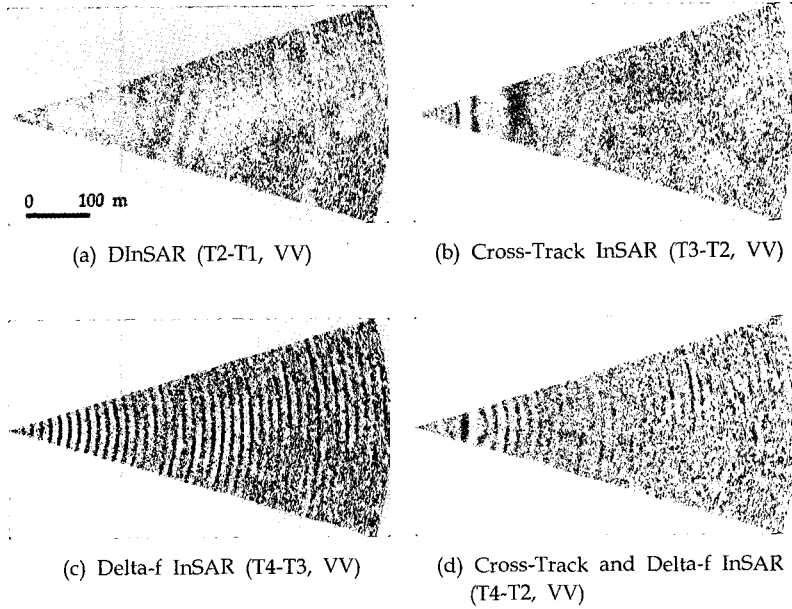


Fig. 5. Examples of GB-SAR Interferometry. (a) DInSAR with 30-minute temporal baseline. (b) Cross-Track InSAR with -30 cm spatial (vertical) baseline. (c) Delta-f InSAR with -10 MHz frequency baseline. (d) Combination of Cross-Track and Delta-f InSAR. One color cycle (blue to red) indicates the phase change of 360° .

차, 위상차의 거리변화율은 다음과 같다.

$$\text{위상: } \phi_1 = -\frac{4\pi R}{c} f_1, \quad \phi_2 = -\frac{4\pi R}{c} f_2 \quad (8)$$

$$\text{위상차: } \phi = -\frac{4\pi R}{c} \Delta f \quad (9)$$

$$\text{거리변화율: } \frac{\partial \phi}{\partial R} = -\frac{4\pi}{c} \Delta f \quad (10)$$

여기서 c 는 빛의 속도이다. Fig. 5(c)는 T4-T3 위상차로서 Delta-f InSAR의 예이다. 중심주파수의 차이는 $\Delta f = -10$ MHz로 하였다. 위상차의 거리변화율은 중심주파수의 변화에 따른 함수이며, 이 실험의 경우 24.0 degree/meter로서, 거리에 상관없이 거리가 15.0 m 증가할 때마다 하나의 간섭띠가 나타난다.

5) Cross-Track and Delta-f Interferometry for DEM

수직기선(vertical baseline) B_v 와 중심주파수의 차이(frequency baseline) Δf 가 동시에 존재할 때 위상과 위상차, 그리고 위상차의 거리변화율과 고도변화율 다음과 같다.

$$\text{위상: } \phi_1 = -\frac{4\pi}{c} f_1 R_1, \quad \phi_2 = -\frac{4\pi}{c} f_2 R_2 \quad (11)$$

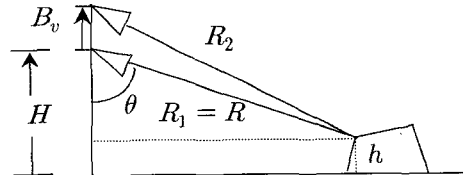


Fig. 6. Cross-Track InSAR configuration.

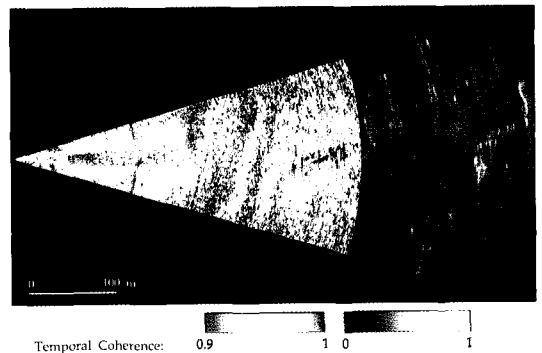


Fig. 7. Temporal coherence of nine acquisitions (P1-P9) for two hours. Coherence value from 0.9 to 1.0 is displayed in color from blue to red, while others in gray scale. Note the stable reflectors such as the withered grass, river banks and buildings maintain the coherence values higher than 0.99 (red). Range greater than 400 m is the SAR amplitude image for comparison.

$$\begin{aligned} \text{위상차: } \phi &\approx -\frac{4\pi}{\lambda} \Delta R - \frac{4\pi R}{c} \Delta f \quad (\Delta R \ll R, \Delta f \ll f) \\ &\approx -\frac{4\pi B_v}{\lambda} \frac{H-h}{R} - \frac{4\pi R}{c} \Delta f \quad (B_v \ll R) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\text{거리변화율: } \frac{\partial \phi}{\partial R} \approx \frac{4\pi B_v (H-h)}{\lambda R^2} - \frac{4\pi}{c} \Delta f \quad (13)$$

$$\text{고도변화율: } \frac{\partial \phi}{\partial z} \approx \frac{4\pi B_v}{\lambda R} \quad (14)$$

Fig. 5(d)는 T4-T2의 위상차로서 Cross-Track InSAR와 Delta-f InSAR의 원리가 한꺼번에 포함된 것이며, 수직기선은 $B_v = 0.3$ m, 주파수 기선은 $\Delta f = -10$ MHz이다. 이 실험에서 $R = 100$ m일 때의 위상차의 거리 변화율은 Cross-Track InSAR의 -8.0 과 Delta-f InSAR의 24.0 을 합한 16.0 degree/meter이며, 거리가 증가함에 따라 Cross-Track InSAR의 거리변화율은 R^2 에 따라 점점 줄어들어 Delta-f InSAR의 거리변화율인 24.0 degree/meter으로 수렴한다. 위상차의 고도변화율은 Cross-Track InSAR와 동일한 -38.2 degree/meter이다. 이 실험을 통하여 위상차간섭법의 이론적 계산 값과 모두 일치하는 위상 패턴이 관측되었다.

유럽우주국(ESA)의 Envisat 위성에 탑재된 ASAR의 중심주파수는 5.331 GHz 로서, 5.3 GHz인 ERS-1/2와 31 MHz의 차이가 난다. 이를 Cross-Track InSAR 개념의 공간적 기선(spatial baseline)을 조절하여 거리변화율은 감소시키고 높은 고도변화율을 얻어 지형고도 매핑의 정밀도를 높이는 효과를 보기도 하는데, 이를 Cross-Interferometry라 하여 시도된 바 있다 (Adam, 2003).

6) PSInSAR for Stable Reflectors

GB-SAR를 이용한 PSInSAR (Permanent Scatterer InSAR)는 안정된 산란체로부터 나오는 위상 신호를 지속적으로 측정하여 산란체의 변위를 모니터링 한다는 점에서 인공위성 자료를 이용한 PSInSAR(Ferretti *et al.*, 2001)와 비슷한 개념이지만 이에 비해 여러 가지 장점이 있다. 첫째, GB-SAR에서는 간섭 영상간의 기선(baseline)이 정확하게 조절되기 때문에 기선을 측정하거나 추측하는 알고리즘이 필요가 없으며, 둘째, zero-baseline을 구현할 수 있어서 지형 고도에 의한 간섭위상이 전혀 발생되지 않아 외부 DEM 자료가 필요 없다.

셋째, 마이크로파의 전파 경로가 인공위성에 비해 매우 짧기 때문에 대기 효과를 거의 무시할 수 있다. 넷째, 영상 간 시간적 기선(temporal baseline)이 수십 분으로 매우 짧아서 변위량이 비교적 큰 산란체인 경우에도 phase unwrapping 과정 없이 모니터링이 가능하다. 한편, Noferini *et al.*(2005)은 실내의 GB-SAR 실험을 통하여 대기의 수분 함량에 따라 위상의 변화가 발생하는 것을 보고하였으며, 이를 기상관측소(weather station) 자료를 통해 보정한 바 있다. 이러한 정밀한 대기 보정 또한 인공위성이나 항공기 SAR에 비교하여 고정된 위치에서 안정적인 SAR 자료의 연속 획득이 용이한 GB-SAR에서만 실용적으로 사용될 수 있다.

동일한 조건으로 시간적으로 연속해서 얻어진 GB-SAR 영상의 복소 신호를 z_i 라 하고, N 개의 측정이 이루어졌을 때 시간적 긴밀도(Temporal Coherence)를 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\gamma = \frac{\left| \sum_{i=1}^N z_i \right|}{\sum_{i=1}^N |z_i|} \quad (16)$$

시간적 긴밀도 값은 $0 < \gamma < 1$ 의 범위를 가지며, 산란체의 시간에 따른 안정성의 지표가 된다. PSInSAR는 시간적 긴밀도가 높은 산란체만을 선택하여 위상의 변화를 모니터링 하는 것으로, 변위 정밀도는 DInSAR의 경우와 동일하다.

Fig. 7은 약 2시간 동안 9회 측정된 자료(P1~P9)의 시간적 긴밀도이다. 그림에서 긴밀도를 검정색(0)에서 흰색(0.9)로 표시하였으며, 긴밀도가 0.9 이상인 경우에는 파란색(0.9)에서 빨간색(1.0)으로 표시하였다. 시간적 긴밀도가 0.9 이상인 산란체들의 위상 변화는 10° 이하였으며, 특히 시간적 긴밀도가 0.99 이상(빨간색 부분)인 산란체의 위상 변화는 1° 이하로 유지되었다. 따라서 향후 PSInSAR를 이용한 산란체의 장시간 변위 측정에 있어서 정확도가 1 mm 이하로 확보될 것으로 판단되나, 시스템의 정밀도에 대해서는 앞으로 실험을 통해 보다 구체적으로 입증할 필요가 있다.

4. 결론

벡터 네트워크 분석기를 기반으로 dual-polarization square horn antenna, 마이크로파 앰프, 마이크로파 스위치, 스텝 모터 등을 이용하는 모션 시스템으로 구성된 GB-SAR 시스템을 개발하였다. GB-SAR는 지상 시스템의 안정성과 운영의 유연성 덕분에 다양한 영상 획득 모드를 구현할 수 있음을 실험으로 확인하였으며, 다양한 파장대의 다편파 SAR 영상을 비롯하여 DInSAR, Coherence, Cross-Track InSAR, Delta-f InSAR, PSInSAR와 같은 SAR 기술의 거의 모든 분야에 있어서 응용의 가능성을 보여주었다. 이 시스템은 향후 자연 및 인공 구조물의 안정성 계측, DEM 제작, 산란체의 물성 조사와 같은 실용적 측면에 근접해 있으며, 새로운 SAR 시스템의 개념 설계에도 유용할 것으로 전망된다. 향후 시스템의 안정성, 정밀도, 및 현장 적용성에 대한 평가가 이루어질 계획이다.

사 사

이 연구는 한국지질자원연구원의 전문연구사업인 '지하정밀 영상화 융합기술 개발'의 지원을 받았다.

참고문헌

이훈열, 2005. 교육용 합성구경레이더 프로세서(eSAR Processor)의 개발과 공개, 대한원격탐사학회지, 21(2): 163-171.

조성준, 김정호, 성낙훈, 정지민, 2005. PXI를 이용한 다목적 물리탐사 측정 시스템, 물리탐사, 8(3): 224-231.

Adam, N., 2003. First cross interferogram using the radar sensors ENVISAT/ASAR and ERS-2, available online at: http://www.dlr.de/caf/aktuelles/archiv/bilderarchiv/envisat/cross_interferogramm/_cross_interferogramm/cross_interferogramm_en.htm

Brown, S. C. M., S. Quegan, K. Morrison, J. C.

Bennett, and G. Cookmartin, 2003. High-resolution measurements of scattering in wheat canopies-implications for crop parameter retrieval, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 41(7): 1602-1610.

Cho, B. L., Y. K Kong, H. G. Park, and Young-Soo Kim, 2006. Automobile-based SAR/InSAR System for Ground Experiments, *IEEE Geoscience And Remote Sensing Letters*, 3(3): 401-405.

Ferretti, A., C. Prati, and F. Rocca, 2001. Permanent scatterers in SAR interferometry, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39(1): 8-20.

Fortuny, J. and A. J. Sieber, 1994. Fast algorithm for a near-field synthetic aperture radar processor, *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, 42(10): 1458-1460.

Gomez-Dans, J. L., S. Quegan, and J. C. Bennett, 2006. Indoor C-band polarimetric interferometry observations of a mature wheat canopy, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(4): 768-777.

Leva, D., G. Nico, D. Tarchi, J. Fortuny-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): 745-757.

Nesti, G., J. Fortuny, and A. J. Sieber, 1996. Comparison of backscattered signal statistics as derived from indoor scatterometric and SAR experiments, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 34(5): 1074-1083.

Nico, G., D. Leva, G. Antonello, and D. Tarchi, 2004. Ground-based SAR interferometry for terrain mapping: Theory and sensitivity analysis, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(6): 1344-1350.

- Nico, G., D. Leva, J. Fortuny-Guasch, G. Antonello, and D. Tarchi, 2005. Generation of digital terrain models with a Ground-Based SAR system, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 43(1): 45-49.
- 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.
- Sarabandi, K., 1997. Δk -radar equivalent of interferometric SAR's : A theoretical study for determination of vegetation height, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 35(5): 1267-1276.
- 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.
- Tarchi, D., H. Rudolf, M. Pieraccini, and C. Atzeni, 2000. Remote monitoring of buildings using a ground-based SAR: application to cultural heritage survey, *International Journal of Remote Sensing*, 21(18): 3545-3551.
- Zhou, Z. -S., W. -M. Boerner, and M. Sato, 2004. Development of a ground-based polarimetric broadband SAR system for noninvasive ground-truth validation in vegetation monitoring, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 42(9): 1803-1810.