레이더 간섭위상의 정밀고도변환 알고리즘 개선

김 상 완[†]

세종대학교 지구정보공학과

Development of Unwrapped InSAR Phase to Height Conversion Algorithm

Sang-Wan Kim[†]

Department of Geoinformation Engineering, Sejong University

Abstract : The InSAR (Interferometric SAR) processing steps for DEM generation consist of the coregistration of two SAR data, interferogram generation, phase filtering, phase unwrapping, phase to height conversion, and geocoding, etc. In this study, we developed the precise algorithm for phase to height conversion, including the ambiguity method taking into account Earth ellipsoid, Schwabisch method, and the refined ambiguity method suitable for the interferometric pair with non-parallel orbit. From the testing with JERS-1 orbit we found that the height error by traditional ambiguity method reaches to about 40 m during phase to height conversion. The proposed methods are very useful in generating precise InSAR DEM, especially in the case of using non-parallel InSAR pair due to unstable orbit control such as JERS-1 or intentional orbit control such as Cross-InSAR pair between ERS2 and ENVISAT satellite.

Key Words : SAR, InSAR DEM, Height, Phase

요약 : InSAR (Interferometric SAR) 기법을 이용한 DEM 추출은 두 SAR 영상의 정합, 간섭도 생성, 위상 필터링, 위상 unwrapping, 고도변환, 좌표계 변환 등 매우 복잡한 단계를 필요로 한다. 본 연구에서는 unwrapped 위상을 고도값으로 변환하는 과정에 대한 정밀도 향상을 위한 알고리즘을 개발하였다. 개발된 알고리즘은 지구타원체를 고려하여 수정된 ambiguity 방법, Schwabisch 방법과 더불어 두 SAR 자료의 궤도가 평행하지 않을 때 발생하는 오차를 현저히 줄일 수 있는 개선된 ambiguity 방법이다. JERS-1 궤도를 이용한 알고리즘 성능 분석을 통해 기존 ambiguity 알고리즘은 두 개의 SAR 영상 궤도가 평행하지 않은 경우, 간섭위상의 고도변환 과정 중에 약 40 m 이상의 오차가 발생할 수 있음을 확인하였다. 개발된 알고리즘은 JERS-1과 같은 위성궤도의 불안정 또는 ERS2-ENVISAT Cross-InSAR를 위한 궤도 제어 등 다양한 원인에 의해 발생할 수 있는 평행하지 않는 두 위성 궤도 자료의 간섭쌍을 이용한 정밀 InSAR DEM 생성에 매우 효과적으로 활용될 수 있다.

접수일(2011년 10월 26일), 수정일(1차 : 2012년 1월 19일, 2차 : 2월 26일), 게재확정일(2012년 3월 3일).

[†] 교신저자: 김상완(swkim@sejong.ac.kr)

1. 서론

동일한 지점에서 획득된 두 개의 SAR 영상 위상정보를 이용하여 정밀 지형고도 및 지표면의 변위를 측정하는 간섭기법(InSAR)은 지난 1990년대 이후 급속하게 발전한 마이크로파 원격탐사 핵심 기술 중의 하나이다(Rodriguez and Martin, 1992; Massonnet and Feigl, 1998). 이는 산란체로부터 반사된 레이더 영역의 파를 수신하여 얻어지는 두 개 이상의 복소수 영상으로부터 위상차를 계산하여 지표의 3차원 정보를 얻는 기술로써, DEM 제작 외에 다수의 레이더영상과 수치고도모델(Digital Elevation Model, DEM)을 이용하여 지표의 변위를 정밀 측정하는데 널리 사용되고 있다(Graham, 1974; Rufino *et al.*, 1998).

InSAR 기법을 이용한 DEM 추출은 두 SAR 영상의 정합, 간섭도 생성, 위상 필터링, 위상 unwrapping, 고도변환, 좌표계 변환 등 매우 복잡한 단계를 필요로 한다(Geudtner and Schwäbisch, 1996; 김상완, 2004). 각 단계별 자료 처리 정확도는 최종적으로 생성된 DEM의 정밀도에 영향을 미치게 된다. 최근 Sansosti *et al.*(2006)는 두 SAR 영상의 정밀 정합을 위해 기존의 고차다항식 모델링을 벗어나 각 화소의 고도를 고려한 기하학적 영상정합이 필요함을 보였다. 이러한 기하학적 모델링은 특히 TerrSAR-X SAR와 같은 수 m급의 고해상도 SAR 영상을 사용하는 경우 매우 중요하다. 또한 간섭도 위상을 unwrapping하는 과정에서 발생하는 DEM 생성 오차를 줄이기 위해 저해상도 DEM의 2-pass 차분간섭기법(Differential InSAR, DInSAR)을 이용한 방법이 제안되기도 하였다(Seymour, 1999; 윤근원 외, 2001; 김창오 외, 2005).

두 개의 SAR 간섭도로로부터 DEM을 만들기 위해서 unwrapped 위상을 레이더 좌표계(azimuth, range)에서의 지형 고도값으로 변환하는 과정이 필요하다. 기존에 개발되어 사용되었던 ambiguity 방법은 고도변환과 동시에 geocoding까지 수행될 수 있다는 장점이 있음에도 불구하고 수식 전개 과정에서의 근사식 도입으로 인해 정밀도의 한계가 있다. 특히 간섭도 제작에 사용된 두 SAR 영상 궤도가 평행하지 않을 때 이러한 오차는 수십 m 이상으로 일반적인 허용 한계보다 커지게 된다. 본 연구에서는 간섭위상의 고도값 변환 정확도를 향상

시키기 위하여 InSAR 자료 처리에서 가장 널리 이용되고 있는 기존의 ambiguity 방법을 개선한 알고리즘을 개발하였다. 개발된 알고리즘의 성능 분석을 위해 궤도가 평행하지 않는 JERS-1 테스트 간섭쌍을 이용하여 기존의 두 알고리즘(ambiguity 방법, Schwäbisch 방법(Schwäbisch, 1995)과 새로 제안된 알고리즘 적용 결과를 제시하였다.

2. Unwrapped 간섭위상의 고도변환 알고리즘

본 연구에서 제시된 Ambiguity 방법 및 Schwäbisch 방법은 네덜란드의 Delft 공대에서 개발한 DORIS(Delft Object-oriented Radar Interferometric Software) 알고리즘(Kampes and Usai, 1999)을 바탕으로 수정 개발되었다.

1) Ambiguity 방법

간섭도의 위상으로부터 지구타원체에 의한 위상을 제거해 주면 지형에 의한 영향으로 등고선과 유사한 형태의 fringe가 생기는데, 이를 topographic fringe라고 한다. 간섭도에 포함되어 있는 topographic fringe의 양을 표현하기 위해, 한 개의 fringe(2π)를 변화시키는데 필요한 고도의 변화량을 ambiguity height라 한다(Massonnet and Feigl, 1998).

각 SAR 자료에서 관측 위상 ϕ_i 는

$$\phi_i = -\frac{4\pi}{\lambda} r_i + \phi_{obj} \quad (1)$$

이다. 여기서 r_i 는 위성으로부터 산란체까지의 거리이며, ϕ_{obj} 는 산란체 특성에 의한 위상 변화값이다. 두 개의 SAR 자료를 이용하여 생성된 간섭도의 unwrapped 위상 ϕ 는 다음과 같다.

$$\phi = \phi_1 - \phi_2 - \phi_R = -\frac{4\pi}{\lambda} B_{\parallel} - \phi_R \quad (2)$$

ϕ_1 과 ϕ_2 는 식(1)에 의한 주영상과 부영상에서의 위상이며, ϕ_R 은 Fig. 1의 기준면(지구타원체)에서의 위상값이다. Fig. 1의 InSAR 기하학에 의해 $B_{\parallel}$ 와 $B_{\perp}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$B_{\parallel} = r_1 - r_2 = \rho - (\rho + \delta\rho) = \delta\rho$$

M: Master antenna, S: Slave antenna, z: Topographic height of target, h: Satellite height, r_h : Radius of earth at nadir, r_z : Radius of earth at target, P_0 : Position on the reference surface with same slant range as target P
 B: Baseline $B_{\parallel}$: Parallel baseline $B_{\perp}$: Perpendicular baseline B_V : Vertical baseline B_H : Horizontal baseline P: Target Position,

Fig. 1. SAR interferometry imaging geometry.

$$\begin{aligned}
 B_{\parallel} &\approx B \sin(\theta - \alpha) \\
 B_{\perp} &= B \cos(\theta - \alpha)
 \end{aligned} \quad (3)$$

r_1 과 r_2 는 주영상 촬영시 위성의 위치(Fig. 1에서 M)와 부영상 촬영시 위성의 위치(Fig. 1에서 S)로부터 지상의 산란체 P까지의 거리로 각각 ρ 와 $\rho + \delta\rho$ 이며, B는 기선 거리이다(θ 와 α 는 Fig. 1 참조). 관측각과 지구타원체 그리고 지형사이의 관계는 코사인 제 2법칙으로부터

$$\cos \theta = \frac{\rho^2 + (r_h + h)^2 - (r_z + z)^2}{2\rho(r_h + h)} \quad (4)$$

이다. h 는 위성의 고도, z 는 지상 산란체의 고도, r_h 와 r_z 는 위성위치와 지상산란체 위치에서의 지구반경이다. 식(2)를 θ 에 관해 미분하면,

$$\frac{dz}{d\theta} = \frac{4\pi}{\lambda} \frac{dB_{\parallel}}{d\theta} = -\frac{4\pi}{\lambda} B_{\perp} \quad (5)$$

이다. 또한 식(4)로부터 θ 에 대한 고도(z)의 변화율을 구하면 다음과 같다.

$$\frac{dz}{d\theta} = \frac{\rho \sin(\theta - \alpha)}{r_z + z} \quad (6)$$

연쇄 법칙에 의해 위상변화에 대한 고도변화율은

Fig. 2. Non-parallel orbits InSAR geometry (Crosetto, 2002).

$$\frac{dz}{d\phi} = \frac{dz}{d\theta} \frac{d\theta}{d\phi} = -\frac{\lambda}{4\pi} \frac{\rho \sin \theta}{B_{\perp}} \frac{d\theta}{d\phi} = -\frac{\lambda}{4\pi} \frac{\rho \sin \theta}{B_{\perp}} \frac{|\vec{M}|}{|\vec{P}|} \quad (7)$$

여기서 $\vec{M}$ 과 $\vec{P}$ 는 위성과 지표대상물의 위치벡터이다. 식(1)–식(3)과 식(5)는 DORIS(Kampes, 1999)에 제시된 식과 동일하며, 식(4), 식(6), 식(7)는 DORIS에서 제시된 것과 달리 지구타원체를 고려하여 본 연구에서 유도된 식으로, 최종 고도변화율 식(7)은 DORIS에 제시된

고도변화율 식($\frac{dz}{d\theta} = -\frac{\lambda}{4\pi} \frac{\rho \sin \theta}{B_{\perp}}$)과 차이가 있다.

식(7)의 위상에 대한 고도변화율은 DORIS의 고도변화율에 $\frac{|\vec{M}|}{|\vec{P}|}$ (~1.12, ERS 위성인 경우)를 곱한 것으로 DORIS 사용자 매뉴얼(Kampes, 1999)에서 해결되지 않는 문제로 언급되어 있는 ambiguity 방법과 Schwäbisch 방법과의 차이를 명확히 설명한다. 즉 DORIS 알고리즘에서 ambiguity 방법과 Schwäbisch 방법 사이에 존재하는 스케일링 인자는 식(7)과 같이 지구타원체에 의한 고도변화율을 도입함으로써 해결될 수 있음을 증명하였다.

Fig. 2에서와 같이 일반적으로 궤도가 평행하지 않은 경우 수직 기선거리 $B_{\perp}$ 의 계산은 다음과 같이 계산한다. 기선거리 벡터 B의 sch 축에서의 성분을 (B_s , B_h , B_v)라 할 때 $B_{\perp}$ 은 다음과 같다.

$$B_{\perp} = B_h \cos \theta + B_v \sin \theta \quad (8)$$

sch 축은 위성의 궤도벡터 $\vec{M}$ 과 ρ 가 이루는 평면에 수직인 단위벡터($\hat{s}$)와 $\vec{M}$ 과 $\hat{s}$ 가 이루는 평면에 수직인 단위벡터($\hat{c}$), 그리고 벡터의 단위벡터($\hat{h}$)로 구성되어 있는 직교좌표계이다. 궤도가 평행하지 않은 경우 기선거리 벡터 B는 주영상의 각 화소마다 다르기 때문에 매 점마다 다음 식을 적용하여 위상을 고도로 변환하게 된다.

$$\frac{dz}{d\theta} = -\frac{\lambda}{4\pi} \frac{\rho \sin \theta |\vec{M}|}{B_{\perp} |\vec{P}|} = -\frac{\lambda}{4\pi} \frac{\rho \sin \theta}{B_h \cos \theta + B_v \sin \theta} \frac{|\vec{M}|}{|\vec{P}|} \quad (9)$$

와 같다. 여기서 $\vec{M}$ 과 $\vec{P}$ 는 위성과 지표대상물의 위치벡터이다. 식(7)과 식(9)로부터 ambiguity height를 정의하면 다음과 같다.

$$h_a = \frac{\lambda}{2} \frac{\rho \sin \theta |\vec{M}|}{B_{\perp} |\vec{P}|} \phi \quad (10)$$

$$h = -\frac{\lambda}{4\pi} \frac{r_1 \sin \theta}{B_h \cos \theta + B_v \sin \theta} \phi \quad (11)$$

기존 ambiguity 방법을 이용하여 unwrapped 위상으로부터 고도 변환을 위한 알고리즘의 흐름도는 Fig. 3과 같다.

Ambiguity 방법 구현을 위해 필요한 좌표계 변환(지리좌표계→레이더좌표계, 레이더좌표계→지리좌표계)은 위성의 궤도정보와 다음과 세 가지 방정식을 사용한 알고리즘을 이용하여 구현하였다(Kampes, 1999).

1. Doppler 방정식: zero doppler processing에 의해 지표면 위의 P 점은 궤도에 수직으로 놓여있다.
 $E_1: \dot{x}_s \cdot (\vec{M} - \vec{P}) = 0$, $\dot{x}_s = \vec{M}$ 에서 주영상의 속도 벡터

2. Range 방정식: 지표 위의 점 P에서 기하학적인 거리는 range time에 전자기파의 속도를 곱한 것과 같다.
 $E_2: |\vec{M} - \vec{P}|^2 - (v_{\text{light}} t_{\text{range}})^2 = 0$

3. Ellipsoid 방정식: 점 P(x,y,z)는 타원체 위에 있어야 한다.

$$E_3: \frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{a^2} + \frac{z^2}{b^2} - 1 = 0$$

지리좌표계 상에서의 점 P(x, y, z)를 레이더 좌표계로 변환하기 위해서는 도플러방정식만을 사용하며, 레이더좌표계(line, pixel)에 대응하는 지리좌표계 P를 구하기 위해서는 도플러 방정식, 거리 방정식, 타원체 방정식 세 가지 모듈을 이용한다.

2) 개선된 ambiguity 방법

Ambiguity 방법으로 구한 해의 오차 정도를 개선하기 위해 새로운 알고리즘을 개발하였다. 기존의 ambiguity 방법은 초기 고도를 0으로 하고 위성의 관측각 θ 를 구한 다음, 이로부터 위상을 고도로 변환하기 위한 h_a 값을 구해 새로 갱신도 고도가 일정 값 이하일 때까지 반복하는 것이다. 그러나 이러한 방법으로는 궤도정보와 관측 기하학을 바탕으로 구한 h_a 값의 오차에 의한 최종 고도가 정확한 간섭도의 위상을 반영하지 않게 된다. 따라서 본 연구에서는 초기 추정된 고도값을 이용하여 역으로 간섭도에서 나타나는 위상을 구한 다음 실제 간섭 위상과의 차를 이용하여 고도를 갱신하고, 이러한 갱신이 일정 값 이하일 때까지 반복한다. 이러한 방법은 간섭도의 위상이 전부 소멸될 때까지 고도값을 갱신함으로써 간섭도의 위상을 정확한 고도값으로 변환이 가능하게 한다. 전체적인 수행 단계를 요약하면 아래와 같으며, 알고리즘의 흐름도는 Fig. 4와 같다.

1. 라인당 또는 화소당 궤도정보와 관측 기하학을 이용하여 B_h 와 B_v 를 구한다.
2. 초기 고도를 0로 할당 (또는 저해상도 DEM을 이용한 갱신이라면 입력 DEM의 고도값을 할당). 초기 $\Delta\phi = \phi$ 로 할당.
3. 관측각 θ 를 계산
4. 식 (17)으로부터 ambiguity height(h_a) 계산
5. 고도값 계산 ($Height_i = h_a \cdot \Delta\phi$)
6. 궤도정보와 관측 기하학을 이용하여 $Height_i$ 일 때 간섭도에서 나타나는 위상(ϕ_{sim}) 계산
7. 실제 간섭위상과 계산된 간섭위상 차를 계산 ($\Delta\phi = \phi - \phi_{sim}$)

Fig. 3. Flowchart of ambiguity algorithm for phase to height conversion.

Fig. 4. Flowchart of refined ambiguity algorithm for phase to height conversion.

8. if $(\Delta\phi \cdot h_a > 0.05m)$ 3번에서부터 반복

3) Schwäbisch 방법

이 방법은 Schwäbisch에 제안된 것으로 ambiguity 방법에 비해 수행 속도가 매우 빠르다는 장점이 있다 (Schwäbisch, 1995; Geudtner and Schwäbisch, 1996). 기본적인 개념은 선택된 몇 개의 임의의 고도에서의 위상을 계산하고 이를 실제 간섭도에서의 위상과 비교하여 고도값을 결정하는 방법이다. 자세한 알고리즘 수행 과정은 다음과 같다.

각 화소에서 임의로 선택된 여러 개의 지형 고도(h_i)에 따른 간섭도 위상(ϕ_i)를 구한 다음 아래 식으로부터 다항식 계수를 모델링한다.

$$\begin{aligned} h=0 &= \alpha_0 + \alpha_1\phi_0 + \alpha_2\phi_0^2 \\ h=1000 &= \alpha_0 + \alpha_1\phi_1 + \alpha_2\phi_1^2 \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} h=2000 &= \alpha_0 + \alpha_1\phi_2 + \alpha_2\phi_2^2 \\ \begin{bmatrix} 1 & \phi_0 & \phi_0^2 \\ 1 & \phi_1 & \phi_1^2 \\ 1 & \phi_2 & \phi_2^2 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \alpha_0 \\ \alpha_1 \\ \alpha_2 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 0 \\ 1000 \\ 2000 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (13)$$

위의 모델링을 통해 획득한 α 값을 이용하여 간섭도

Fig. 5. Flowchart of Schwäbisch algorithm for phase to height conversion.

의 위상을 고도값으로 변환할 수 있다. 모든 화소마다 이러한 방법을 적용할 수 있으나 수행 시간을 고려해, 실제 구현한 알고리즘은 다음과 같다. 영상 내에 고루 분포하는 다수의 화소를 임의로 선택한 후, 각 지점으로 부터 위의 방법을 적용하여 α_i 계수를 구한다. 그리고 각 화소 지점에서의 α 값을 구하기 위해 다음과 같은 2차원 고차다항식 모델을 수행한다.

$$\begin{aligned} \alpha_{0,p} &= \beta_{00} + \beta_{10} \cdot l + \beta_{01} \cdot p + \beta_{20} \cdot l + \beta_{12} \cdot p + \beta_{11} \cdot l \cdot p + \dots \\ \alpha_{1,p} &= \beta_{30} + \beta_{10} \cdot l + \beta_{01} \cdot p + \beta_{20} \cdot l + \beta_{12} \cdot p + \beta_{11} \cdot l \cdot p + \dots (14) \\ &\vdots \end{aligned}$$

여기서 l 와 p 는 레이더 좌표계에서의 라인과 컬럼값이다. 모델링을 통해 구한 β_i 를 이용하여 각 화소에서의 α_i 값을 구한 후 이 값을 이용하여 위상을 고도로 변환하였다. 구현된 알고리즘의 흐름도는 Fig. 5와 같다. 이 방법은 비록 앞서 구현한 두 가지 ambiguity 방법보다 속도가 빠르고 변환된 고도값도 기존의 ambiguity 방법 보다 정확하다는 장점이 있으나 위성의 궤도가 선행에서 다소 벗어날 때 β_i 값 모델링의 해가 안정적이지 않는다는 단점이 있다(Kampes, 1999).

3. 알고리즘 간의 성능 비교 분석

개발된 알고리즘의 성능을 분석하기 위하여 백두산 지역에서 획득된 JERS-1 SAR 간섭쌍 중 주영상과

Fig. 6. Flow chart for comparison of algorithm performance.

부영상 궤도간의 사이각이 0.030352° 로 비교적 가장 평행하지 않는 간섭쌍을 선택하였다. 실제 기존의 ambiguity 방법을 이용하여 이 간섭쌍의 위상을 고도 변환 하였을 때 오차가 크게 발생하는 영상 중 하나이다. 알고리즘 간의 비교분석을 위한 자료처리 과정은 Fig. 6과 같다.

분석에 사용된 두 SAR은 백두산 지역에서 1994년 8월 29일과 1995년 8월 16일 획득된 영상으로 수직기선 거리는 457 m이며 ambiguity height는 영상의 중심 부에서 고도가 0일 때 -117.2 m로 계산되었다. Fig. 7은 1994년 8월에 획득된 SAR 자료의 밝기 영상으로 약 $70 \text{ km} \times 70 \text{ km}$ 지역에 해당한다. 실제 SAR 영상의 위상은 고도정보 뿐만 아니라 두 SAR 자료 획득 시간동안 발생한 지표변위, 대기 성분 변화에 따른 대기오차, 노이즈 등이 존재하기 때문에 간섭위상을 고도로 변환하는 단계에서 나타나는 오차만을 따로 구분하기 어렵다. 특히 JERS-1의 경우 궤도 오차가 매우 크기 때문에 간섭도를 제작하는 동안 지구타원체 위상을 제거하는 과정 및 위상을 고도로 변환하는 단계에서 오차가 발생하게 된다. 따라서 본 연구에서는 실제 SAR 간섭위상을 사용하지 않고 연구지역에서 획득된 SRTM-3초 DEM(Fig. 8)과 두 궤도 정보를 이용하여 모사된 간섭도를 이용하여 성능 비교 분석을 수행하였다. DEM을 이용하여 모사된 간섭도를 그대로 다시 고도로 역변환 하였을 때 알고리즘 구현 과정에서 발생하는 오차가 없다면 변환된 고도는 초기 고도값과 동일하여야 한다. 고

Fig. 7. JERS-1 master image over Mt. Baekdu.

Fig. 8. Radar coordinated DEM derived from SRTM 3-arc DEM.

도변환 과정에서 발생한 오차는 다시 레이더 좌표계 고도를 geocoding 하는 과정에서 수평방향의 오차를 유발하게 된다. 따라서 간섭위상의 고도변환 과정에서 발생하는 오차만을 비교 분석하기 위해 geocoding 수행전의 레이더 좌표계에서의 고도값과 간섭위상 모사에 사용된 레이더좌표계 DEM간의 비교를 수행하였다.

Fig. 9는 연구지역의 SRTM-3초 DEM을 이용하여 모사된 간섭위상이다. 비록 Fig. 9의 위상은 로 구속화되어 있는 위상을 보여주지만 실제 모사된 간섭 위상은 궤도정보와 DEM으로 계산되어지는 것이기 때문에 unwrapping되어 있는 위상값 획득이 가능하다. 즉 분석과정에서 phase unwrapping에 의한 오차는 존재하지 않는다. Fig. 9의 모사된 간섭영상을 입력 자료로 한 세가지 고도변환 알고리즘을 적용하여 레이더좌표

Fig. 9. Simulated interferogram using radar coordinated DEM.

Fig. 10. Height map in radar coordinate derived from ambiguity method.

계 고도값을 구하였다. 기존의 ambiguity 방법을 적용하여 구한 레이더좌표계 고도값은 Fig. 10과 같다. 정량적인 비교 분석을 수행하기 위해 Fig. 8의 레이더좌표계 DEM으로부터 각 방법으로 구한 고도값의 차이를 도식한 결과는 Fig. 11-13과 같다. 빠른 테스트를 위해 azimuth 방향과 range 방향으로 24×8 멀티룩을 적용한 영상을 사용한 각 방법의 처리 시간은 Ambiguity 2.9초, 개선된 Ambiguity 4.9초, Schwäbisch 0.6초이다.

수행 속도는 Schwäbisch가 다른 두 방법에 비해 약 5배 이상 빠르며, refined ambiguity는 기존 ambiguity 방법에 비해 약 1.5배 정도 시간이 더 소요되었다. ambiguity 방법에 비해 refined ambiguity 방법은 고

Fig. 11. Difference of radar coordinated height map between radar coordinated SRTM DEM and height map from ambiguity method.

Fig. 12. Difference of radar coordinated height map between radar coordinated SRTM DEM and height map from refined ambiguity method.

도 계산 후 반복 계산에 의해 간섭도의 잔여 위상 자체가 0에 수렴하도록 수행하는 것이기 때문에 다소 궤도 오차에 덜 민감하다. 즉 Fig. 2의 평행하지 않은 InSAR 궤도 배열에서도 각 range 마다 다른 기선거리를 계산하는 식(8)의 3D 기선거리 계산 없이 azimuth 방향에 따른 기선거리 변화만을 가정하는 2D로 근사함으로써 고도 변환 오차의 큰 증가 없이 수행 속도를 개선하였다. 고도 변환 오차는 Fig. 11에서 보는바와 같이 ambiguity 방법은 $0 \sim -40$ m 정도로 매우 큰 값을 보인다. 낮은 지역에서는 고도 오차가 0에 가까우면 높은 지형일수록 고도 오차가 큼을 알 수 있다. 그에 반해 새로 개발된 refined ambiguity 방법은 고도 오차가 지형 고저에 관

Fig. 13. Difference of radar coordinated height map between radar coordinated SRTM DEM and height map from Schwäbisch method.

계없이 거의 0에 가까운 값을 보인다. Schwäbisch 방법을 적용을 위해 영상 내에서 고루 분포하는 500개의 임의의 점을 추출한 후 식(13)을 이용하여 β_i 를 구하였으며, 다시 β_i 를 이용하여 식(14)으로부터 모델을 구하였다. 모델로부터 각 화소에서의 위상을 이용하여 고도값으로 변환한 결과는 Fig. 13과 같다. 비록 Fig. 12의 개선된 ambiguity 방법에 비해 잔차가 다소 크지만, 기준 고도와 차이가 ± 0.3 m 이내에 불과하다. 비록 Schwäbisch 방법이 빠르고 비교적 정확한 결과를 제공하지만, 모든 화소에서 고도변환 계수를 직접 구하지 않고 β_i 모델을 이용하므로, 보다 불규칙하게 움직이는 궤도의 경우 β_i 모델의 불안정으로 인해 오차가 커질 수 있다. 따라서 충분히 안정적인 β_i 모델을 구할 수 있는 경우라면 Schwäbisch 방법이 속도와 정확도 면에서 좋은 성능을 가지고 있으나, 불안정한 궤도 등에 의한 요인으로 β_i 모델이 안정적으로 구해지지 않는 경우에는 개선된 ambiguity 방법이 고도변환에 적합한 알고리즘이다.

4. 결 론

두 개의 SAR 자료의 InSAR 기법을 이용한 DEM 생성 과정 중 하나인 unwrapped 위상을 고도값으로 변환하는 과정에 대한 정밀도 향상을 위한 알고리즘을 개발하였다. 개발된 알고리즘은 지구타원체를 고려하여 수정된 기존의 ambiguity 방법, Schwäbisch 방법과

더불어 두 SAR 자료의 궤도가 평행하지 않을 때 발생하는 오차를 현저히 줄일 수 있는 개선된 ambiguity 방법이다. 실제 두 개의 SAR 영상의 궤도 사이각이 0.030352° 인 평행하지 않은 JERS-1 궤도를 이용한 알고리즘 성능 분석을 통해 기존 ambiguity 알고리즘은 간섭위상의 고도변환 과정 중에 약 40 m 이상의 오차가 발생하였음을 확인할 수 있었다. 따라서 새로 개발된 알고리즘은 JERS-1과 같이 불안정한 위성의 궤도로 인해 두 궤도가 평행하지 않는 경우뿐만 아니라 Cross-InSAR 기법 적용을 위해 두 위성간의 궤도가 평행하지 않게 제어되고 있는 ERS-2와 Envisat 두 위성을 이용한 DEM 생성 시에 매우 유용할 것으로 판단된다. 또한 개발된 알고리즘은 추후 KOMPSAT-5 SAR 자료를 이용한 정밀 InSAR DEM 생성에도 활용될 수 있다.

사 사

이 연구는 한국항공우주연구원의 특정연구개발사업인 다목적실용위성 5호 시스템종합 개발사업의 지원을 받아 수행되었습니다.

참고문헌

- 김상완, 2004. L-밴드 영상레이더 위상간섭기법을 이용한 백두산 및 부산지역의 지표면 변위 관측, 연세대학교 박사학위 논문, 1-20, 26-43, 53-87.
- 김창오, 김상완, 이동천, 이용욱, 김정우, 2005. 레이더 간섭기법을 이용한 수치고도모델 해상도 향상에 관한 연구, 대한원격탐사학회지, 21(4): 287-302.
- 윤근원, 김상완, 민정덕, 원중선, 2001. DEM 정밀도 향상을 위한 2-pass DInSAR 방법의 적용, 대한원격탐사학회지, 17(3): 231-242.
- Crosetto, M. 2002. Calibration and validation of SAR interferometry for DEM generation, *ISPRS Journal of Photogrammetry and Remote Sensing*, 57(3): 213-227.
- Geudtner, D. and M. Schwäbisch, 1996. An algorithm for precise reconstruction of InSAR

- imaging geometry: Application to .at earth. phase removal, phase-to-height conversion, and geocoding of InSAR-derived DEMs. *In EUSAR'96*, Könogswinter, Germany.
- Graham, L.C., 1974. Synthetic Interferometer Radar for Topographic Mapping, *Proc. IEEE*, 62(6): 63-768.
- Kampes, B., 1999. Delft Object-Oriented Radar Interferometric Software: Users manual and technical documentation, Delft University of Technology, Delft, 1.54 ed.
- Kampes, B. and S. Usai, 1999. Doris : The Delft object-oriented Radar Interferometric software, *Proc. ITC 2nd ORS symposium*, ITC, Enschede, The Netherlands.
- Massonnet, D. and K.L. Feigl, 1998. Radar interferometry and its application to changes in the earth's surface, *Review of Geophysics*, 36: 441-500.
- Rodriguez, E. and J.M. Martin, 1992. Theory and design of interferometric synthetic aperture radars. *IEE Proceedings-F*, 139(2): 147-159.
- Rufino, G., A. Moccia, and S. Esposito, 1998. DEM Generation by Means of ERS Tandem Data, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 36(6): 1905-1912.
- Sansosti, E., P. Berardino, M. Manunta, F. Serafino, and G. Fornaro, 2006. Geometrical SAR image registration, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 44(10): 2861-2870.
- Schwäbisch M., 1995. Die SAR-Interferometrie zur Erzeugung digitaler Geländemodelle, Forschungsbericht 95-25, Deutsche Forschungsanstalt für Luft- und Raumfahrt, Oberpfaffenhofen.
- Seymour, M.S., 1999. Refining Low-quality Digital Elevation Models Using Synthetic Aperture Radar Interferometry, Doctoral thesis, the University of British Columbia.