Radar 영상을 이용한 지형복원방법과 변위관측에 관한 연구

유복모*· 손홍규*, Hongxing Liu**
*연세대학교 공과대학 사회환경.건축공학부 토목전공
**Department of Geography, Texas A&M University, College Station, TX, USA

1. 요지

Radar 영상은 능동적탐측기로서 밤과 낮의 구분없이 사용할 수 있고 또한 구름의 영향을 받지 않음으로 해서 여러 분야에서 사용되어왔다. 특히 SAR영상을 이용한 위상간섭법 (InSAR: Interferometric SAR)은 1990년대 초 미국의 JPL (Jet Propulsion Laboratory)에서 사용하기 시작하여 현재 원격탐측, 지구과학, 지구물리학, 측량학, 토목, 환경분야등에 다양하게 활용되고 있는 SAR영상을 이용한 최신의 원격탐측 기술이라 하겠다. 본 논문에서는 InSAR 방법을 중심으로 SAR 영상을 이용한 지형복원 방법과 변위관측 방법에 대해서 알아본다.

2. 연구 배경

InSAR 방법은 고해상도의 수치표고모델을 만들거나 지상에서 지상에서의 미세한 움직임을 관측하는 새로운 원격탐측의 한 방법으로 부상되고 있다 (Zebker at el., 1994). 이 방법은 레이다 영상 중 특히 복소수 영상 (complex image)의 위상정보를 이용한다. InSAR방법은 복소수 레이다 영상사이의 위상차 (phase difference)를 구하기 위해 지상의 대상물을 약간 다른 위치에서 관측한 레이다 신호를 이용한다. 이렇게 레이다 영상으로부터 위상차를 구하기 위한 방법으로는 위성의 궤도을 따르는 단일 주기 (single-pass along-track), 위성의 궤도에 90도 방향의 단일 주기 (single-pass cross-track), 그리고 위성의 궤도에 90도 방향의 반복 주기 (repeat-pass across track)의 세가지 방법이 있다. 현재로서는 위성에서 관측하는 SAR 센서만이 위상차를 얻기 위하여 반복주기 방법을 사용하고 있고 항공기에서는 위의 세가지 방법을 사용하여 활발한 연구가 진행되고 있다.

반복주기를 사용하는 InSAR에서는 각각의 궤도에서 두 번 이상 위성이 관측한 지상의 대상물에 대한 관측각이 거의 동일하여야 한다는 조건이 따른다 (Zebker and Goldstein, 1986). 만약 반복되는 주기중에 지상에 변화가 없었다면 (예를 들면 강우 및 강설등으로 인한 지상의 변화), 반복주기 중에 획득한 복소수 영상사이의 상관도는 매우 높을 것이고, 단일 탑재기에서는 불가능한 매우 긴 기선 (baseline)을 얻을 수도 있다.

그림 1은 InSAR의 원리를 기하학적으로 나타낸 것이다. 여기서 S_1과 S_2는 동일한 지역

에 대해 반복되는 위성 각각의 위치를 나타내며, 이 두 위치에서 획득한 복소수영상으로 위상도 (interferogram) 이 형성된다.

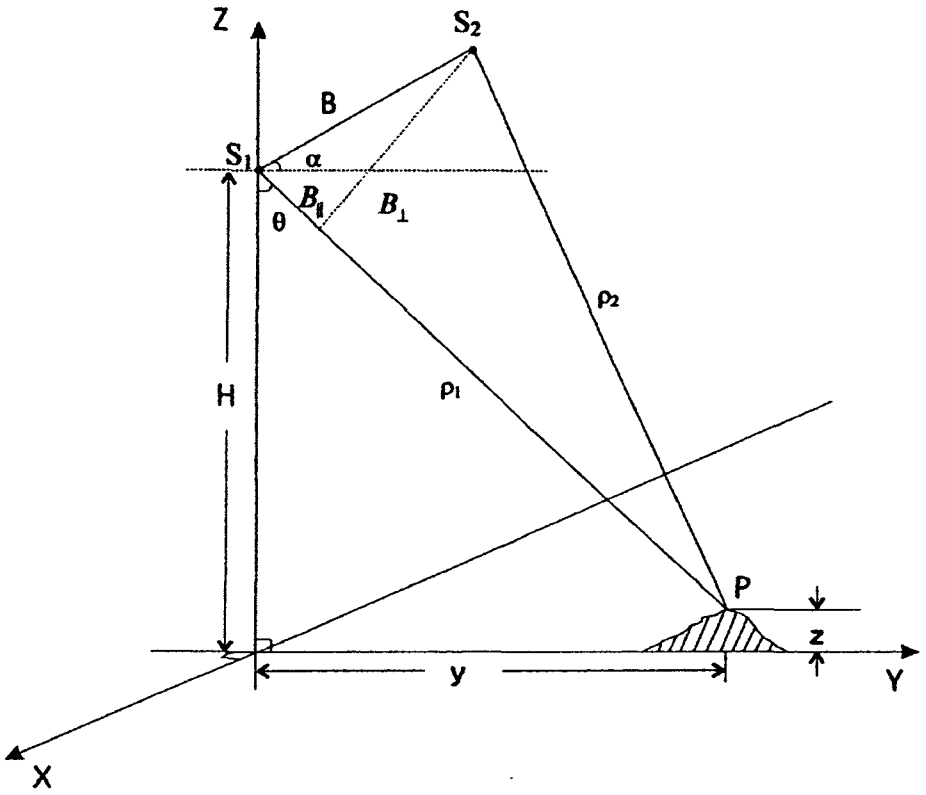


그림 1. cross-track InSAR의 원리

SAR 센서에 의해 전달되는 레이다 신호가 간섭성이므로 복소수 SAR 영상은 위상과 크기(amplitude), 두 정보를 가진다. 지상의 대상물에 대한 두 복소수 SAR 영상의 영상소(i,j)는 각각 다음과 같이 표현할 수 있다 (Rodriguez and Martin, 1992; Ghiglia and Pritt, 1998):

$$s_1(i,j) = A_1(i,j)e^{i\phi_1} \tag{1}$$

$$\phi_1 = \frac{4\pi}{\lambda}\rho_1 \tag{2}$$

$$s_2(i,j) = A_2(i,j)e^{i\phi_2} \tag{3}$$

$$\phi_2 = \frac{4\pi}{\lambda}\rho_2 \tag{4}$$

위식에서 $s_1(i,j)$와 $s_2(i,j)$는 복소수 SAR 영상소 (i,j)에서의 복소수 값이다; $A_1(i,j)$와 $A_2(i,j)$는 두 영상의 지형 반사도(backscattering) 값이다; ρ_1과 ρ_2는 반복되는 주기중의 각각의 안테나 위치인 S_1과 S_2로부터 영상소 (i,j)에 해당되는 지상점의 위치 P(x,y,z)까지의 거리이다; λ 는 레이다의 파장이고 Φ_1과 Φ_2는 두 영상에서의 획득한 레이다 신호의 위상이다.

따라서 두 복소수 영상 s_1과 s_2는 복소수 위상도를 형성하기 위해서 한복소수와 다른 복소수의 복소수공액을 곱한다. 위상도에서 각각의 영상소에 해당되는 값은 다음과 같이 계산된다

$$s_1(i,j)\cdot s_2^*(i,j) = A_1(i,j)A_2(i,j)e^{i\phi_M} \tag{5}$$

위성의 위치 S_1과 S_2에서 각각 기록되는 간섭성(coherent) SAR 영상의 간섭효과는 2차원의 fringe 모양으로 위상도가 형성된다. 이 위상도에서 측정된 위상은 다음과 같이 주어진다.

$$\phi_m = \mathrm{mod}(\phi, 2\pi) \tag{6}$$

$$\phi = \phi_1 - \phi_2 = \frac{4\pi}{\lambda}\Delta\rho = \frac{4\pi}{\lambda}(\rho_1 - \rho_2) \tag{7}$$

두 복소수 SAR 영상을 간섭한 후 얻어진 위상도로부터 관측된 위상 ϕ_M 은 단지 절대 위상 Φ의 나머지 값일 뿐이다. 두 관측사이의 거리의 변화 $\Delta\rho$ 를 결정하기 위해서는 절대위상 복원법(phase unwrapping)을 사용하여 잉여 위상(wrapped phase) ϕ_M 을 절대 위상으로 바꾸어야 한다. 잉여 위상을 파장의 일부분으로 각 영상소에서 구할 수 있기 때문에 위상간섭법은 높은 정확도를 가질 수 있다. 하지만, 2π 모호성 때문에 정확도 문제가 발생할 수 있다.

거리에 대한 변화 $\Delta\rho$ 를 기선 길이 B와 기선각 α (그림 1 참고)의 관계를 이용하여 측정된 위상을 절대 복원하여 계산하면, 지상에서 각 영상소에 해당되는 표고는 다음과 같이 구하여 진다 (Goldstein et al., 1989;Zebker et al., 1994):

$$\sin(\theta-\alpha) = \frac{\rho_1^2 - \rho_2^2 + B^2}{2\rho_1 B} \approx \frac{\Delta\rho}{B} = \frac{\lambda\phi}{4\pi B} \tag{8}$$

$$\theta = \alpha + \arcsin(\frac{\Delta\rho}{B}) \tag{9}$$

$$y = \rho_1 \sin\theta \tag{10}$$

$$z = H - \rho_1 \cos\theta \tag{11}$$

위식에서 z는 구하고자 하는 지점의 표고, B는 기선 즉 각각의 위성의 위치인 S_1과 S_2사이의 거리이다. α 는 수평선과 관련된 기선 각이다. θ는 기준되는 위성의 위치 S_1에서의 관측각(look angle) 이다; ρ_1과 ρ_2는 안테나위치 S_1과 S_2으로부터 영상소 (i,j)에 해당되는 지상 해상도 요소로의 경사 거리이다. $\Delta\rho$ 는 두 궤도 경로 사이의 경사거리 차이이다. H는 기준면으로 관측한 기준 궤도 안테나 S_1의 높이이다. 그리고 Φ 는 절대 위상이다.

간섭적 SAR로부터 얻어진 표고의 정확도는 위성의 궤도의 불확실성에 기인하는 기선 길이와 방향 측정 오차 그리고 열적 잡음(thermal noise)과 layover나 그림자 (shadow)와 같은 복소수 SAR 영상의 기하학적 왜곡에 기인하는 위상 측정과 위상회복방법에서 생기는 오차에 따라 달라진다 (Lin et al., 1994). 표고 σ_z의 표준편차는 다음과 같은 위상 관측 오차 σ_ϕ와 연관된다 (Zebker et al., 1994):

$$\sigma_z = \frac{\lambda\rho_1 \sin\theta}{4\pi B_\perp}\sigma_\phi \tag{12}$$

$$B_\perp = B\cos(\theta - \alpha) \tag{13}$$

$$B_\parallel = B\sin\cos(\theta - \alpha) \tag{14}$$

위식에서 $B_\perp, B_\parallel$는 각각 레이다가 보는 방향(그림 1)에 수직 또는 평행한 기선 요소이다. 위상에 대한 오차는 다음과 같은 근사식으로 나타낼 수 있다:

$$\sigma_\phi = \sqrt{\frac{1}{SNR}} \tag{15}$$

위식에서 SNR은 신호와 잡영의 비율이다. 반복주기 위상간섭법은 기선오차에 매우 민감하다. 위성의 위치자료만 사용하여 계산된 기선의 길이는 때때로 정확하지 않아서 종종 허용 오차내에 들지 못할 때가 많다. 따라서 지상기준점은 기선의 길이와 방향을 정확하게 계산

하기 위해서 반드시 필요하다. 최적의 시스템 수행에서 기선은 지형의 표고 변화에 생기는 위상차를 크게 하기 위해서 긴 것이 좋다. 지상의 기복에 대한 간섭방법은 기선의 수직성분 $B_{\perp}$에 매우 민감하게 반응한다. 또 구한 표고의 정확도는 기선이 길수록 높아진다. 그러나 기선이 길어질수록, 두 안테나에서 측정된 위상 차이는 파장보다 더 커질 것이고 기선에 의해 상관도가 작아지게 된다. 기선의 수평성분 $B_{\parallel}$는 기선 상관도에 영향을 끼치지 않는다. ERS-1 을 사용할 때 한계 기선은 1115m이고 고도 추출을 위한 최적의 기선은 약 200m이고 최소 기선은 75m정도라고 알려져 있다 (Zebker et al., 1994).

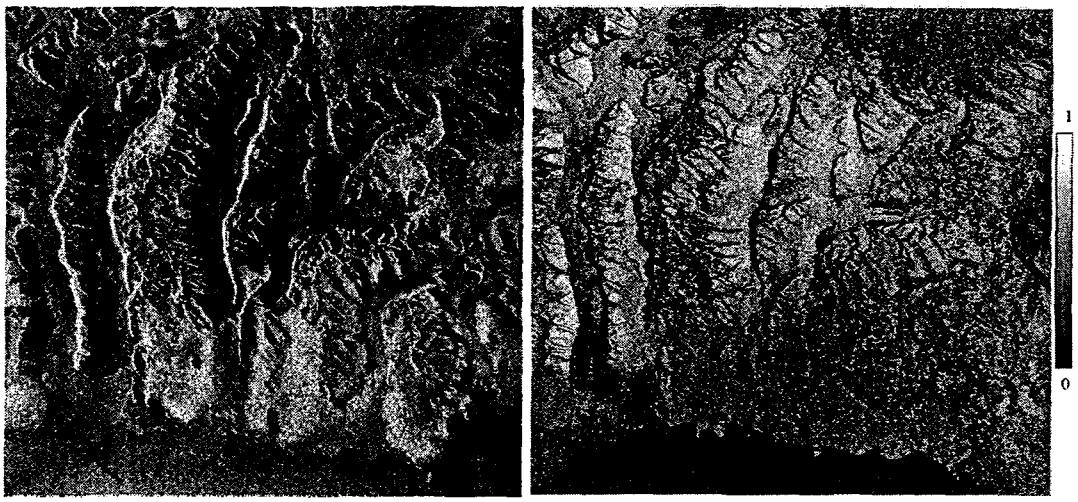
반복주기 위상간섭법의 주요한 제한조건는 환경의 변화 때문에 생기는 일시적인 비상관성(decorrelation) 이다. 또 재주기중에 생기는 지표면이 움직임이므로써 decorrelation이 발생할 수도 있다. 만일 그렇다면 관측된 위상은 지형의 표고에 의해서 뿐만 아니라 지표면의 이동에 의해서도 영향을 받는다. 지형의 표고에 의해서만 생기는 위상은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\phi_{topo} = \frac{4\pi}{\lambda}(\rho_1 - \rho_2) - \phi_{baseline} - \frac{4\pi}{\lambda}\Delta m_r \qquad (16)$$

위식에서 Δm_r경사거리 방향으로의 지표면 이동양이다. 인공위성 SAR 영상이 두번 이상 반복될 때 지표면에 의해서 생기는 위상차와 지표면의 이동에 의해서 생기는 위상차를 구별하기 위해서 미분 위성간섭법 (differential interferometry)을 사용할 수 있다(Kwok and Fahnestock, 1996).

3. 위성간섭법에 의한 표고 추출

반복주기 위성 간섭법을 적용하여 표고를 구하기 위해 남극의 Dry Valley지역(그림 2a)의 ERS-1/ERS-2 두 영상을 사용하였다. 각각의 영상은 1996년 2월 7일에 얻어진 ERS-1 복소수영상과 1996년 2월 8일에 얻어진 ERS-2 복소수 영상이다. 영상의 중앙에서의 ERS-1과 ERS-2에 대한 입사각은 각각 23.23° 와 23.22° 이다. 수직 기선 요소는 약 190 m 이고 수평요소는 약 102 m 이다. 두 영상사이의 영상획득 간격이 하루 밖에 되지 않아 시간차에 의해서 생기는 decorrelation과 관측된 위상에 있어서 만약 지표면 이동에 의한 효과가 매우 적다고 할 수 있다. 따라서 위 두 영상은 표면 지형 정보를 추출하는 데 적합할 것으로 사료된다. 연구대상지역은 그림 2 에서 보는 바와 같이 울퉁불퉁한 빙하지역이다.



(a) (b)

그림2. 연구지역의 크기와 상관도를 나타내는 영상. (a) 대상지역의 amplitude 영상 (b) 두영상의 상관관계를 구한 영상으로 0 부터 1 까지의 값을 가진다.

그림2의 (b)에서 보는 바와 같이 상관도가 낮은 지역은 해양, 호수 및 layover지역이다.

표고를 구하기 위해서는 높은 정확도의 위상을 가진 SLC(Single Look Complex) 영상에서으로 수행된다. 위에서 사용한 SLC 영상의 각각은 23415개의 행과 4928개의 열을 갖는다. 다음과 같은 일련의 과정을 통해 표고를 구할 수 있다. 그 일련의 과정은 sub-pixel level co-registration, 위상도와 상관성 계산, phase flattening, phase filtering, 절대위상복원 (phase unwrapping), 기선 재계산, 기조점준비 (seed point preparation), 그리고 절대위상을 표고로의 (unwrapped phase-to-elevation) 전환을 포함한다.

두 SLC 영상의 정확한 co-registration을 위해, 먼저 궤도의 위치정보를 사용하여 대략의 위치를 구한 뒤 두 복소수 영상사이에서 FFT(Fast Fourier Transform) 정합에 의해 두 영상사이의 offset을 구한다. 처음 영상과 두 번째 영상사이의 gross offset은 약 12 열(range offset)과 125 행(azimuth offset)이었다. 다음작업순서는 20×20의 정방형으로 분포된 점을 선택한다. 결과적으로 두 번째 SLC 영상은 0.1 영상소의 정확도로 첫 번째 SLC 영상과 bilinear function에 근거하여 영상 재배치(resampling)가 이루어진다.

Coregister된 두 복소수 영상에서 위상차는 각각의 영상소마다 구해지고 이것을 single look interferogram이라 한다. Single look interferogram은 phase noise가 많기 때문에 이를 감소시키기 위해서 multilook interferogram을 행방향에서 5영상소 그리고 열방향에서 1 영상소를 평균하여 구했다. N complex looks가 같은 통계값을 갖는다는 가정하에, 위상의 최근린예상값 (maximum likelihood estimator)은 single look complex 값 s_1과 s_2로부터 계산할 수 있다.

$$\phi_M = \arctan\left(\frac{\mathrm{Im}(\sum_{k=1}^{N} s_1^{(k)} s_2^{*(k)})}{\mathrm{Re}(\sum_{k=1}^{N} s_1^{(k)} s_2^{*(k)})}\right) \tag{17}$$

4683개의 행과 4928개의 열을 가진 multilook interferogram에서 5개의 행방향 평균을 하므로써 phase noise는 약 $\sqrt{5}$ 정도 감소된다 (Rodriguez and Martin, 1992). 잉여위상은 기선과 지형의 영향을 둘 다 포함한다.

SLC 영상 사이의 상관도가 얼마되는지를 평가함으로써 위상간섭에 사용한 영상에 대한 효용성 및 상대적인 정확도를 알 수 있다. SLC에서 상관도는 다음과 같이 계산된다.

$$\gamma = \frac{\sum_{k=1}^{N} s_1^{(k)} s_2^{*(k)}}{\sqrt{\sum_{k=1}^{N} s_1^{(k)} s_1^{*(k)} \sum_{k=1}^{N} s_2^{(k)} s_2^{*(k)}}} \tag{18}$$

위 식을 사용하여 계산된 상관도 계수는 그림 2b에서와 같이 0에서 1.0까지가 범위이다. 전반적으로 사용한 위성들간에는 그림 2.b 에서와 같이 높은 상관관계를 보인다. 그러나 아주 상관도가 낮은 지역도 존재한다. 이 두 쌍의 decorrelation 형상은 매우 지형과 관련이 있다. 레이더가 보는 방향의 가파른 경사는 그림 2a에서처럼 지나친 foreshortening 과 layover를 보인다. 이런 지역에서의 위상은 모호하거나 완전히 계산할 수 없기 때문에 상관관계는 매우 낮다. 물은 상관관계가 아주 적은 반사 물질이다. 따라서 해양 및 호수지역에서의 상관도는 매우 낮게 나타낸다. 상관도결과 (그림 2b)의 오른쪽 상단부의 고원은 비교적 낮은 상관성을 보이는데 이는 빙하가 위성이 반복하는 두 주기동안에 있어서 얼고 녹는 시간적인 변화가 크거나 그 지역으로부터 오는 신호의 강도가 낮기 때문일 것으로 사료된다. 상관성이 낮다는 것은 위상을 측정하는데 노이즈가 크다는 것을 의미하고 따라서 절대위상복원을 하는데 어려움이 따른다는 것을 암시한다.

절대위상복원을 쉽게 하기위해서 위성궤도의 기선에 기인한 열 방향과 행 방향의 위상의 경향 (trend)은 위성의 위치를 이용하여 각 영상소에서 먼저 제거한다. 표고가 0인 경향을 제거하고 난 뒤 남은 위상을 "flattened" 혹은 "deramped" 위상도라 하며 이때 남아 있는 위상은 대부분 지상의 표고에 의해 기인한다. 그림 3에 나타난 바와 같이 flattened interferogram 의 위상형태는 레이다가 보는 방향에서의 지표의 기복에 의해 생기는 등고선도와 비슷하다. 결과에서 알 수 있듯이 위상도는 매우 급격하게 변하는데 이는 2π 잉여값

에 기인한 절대위상이 복원 안된 위상 □ 뚠이다.

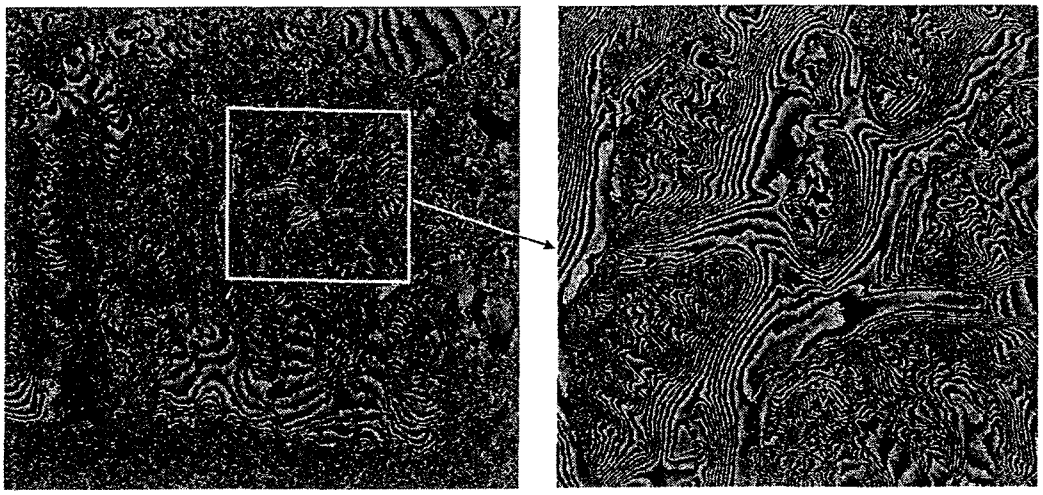


그림3. Flattened (deramped) 된 위상도

절대위상복원을 더욱 용이하게 하기 위해, 1:50,000과 1:250,000 USGS 지형도의 조합으로 만들어낸 저 해상도의 수치표고모형으로부터 가상의 위상도를 생성한다. 이런 저주파의 지형에 의한 위상을 flattened interferogram으로부터 제거함으로써 위상도의 fringe density는 크게 줄어든다. 이와 같이 저해상도표고모형을 사용함으로써 절대위상복원문제를 쉽게 해결할 수도 있다.

저해상도의 지형에 의해 생기는 위상을 제거한 후에 Goldstein phase 필터(Goldstein et al., 1989)를 남은 위상도에 적용하면 경계선은 선명하게 되면서 phase 노이즈는 적게된다. 필터의 작동순서는 먼저 국부적으로 phase 영상에 대해 Fourier transform을 수행하고 난후 Fourier transform된 자료를 몇 번 제곱한다. 그리고 마지막으로 역 Fourier transform을 행한다. 이 방법은 위상 영상이 강한 선 요소와 white 노이즈를 포함한다는 것을 배경에 두고 이루어진다. 스펙트럼을 지수화하면 강한 선 요소는 더욱 강해지고 노이즈는 점점 약해진다. 따라서 위상의 영상의 신호는 노이즈 보다 선택적으로 강화되어 더욱 선명하게 되는 것이다.

절대위상복원은 SAR를 이용한 위상간섭법에서 아주 중요한 단계이다. 여기서는 절대위상을 복원하기 위해 Goldstein의 branch-cut 알고리즘(Goldstein et al, 1989)을 사용하였다. 관측된 위상은 modulo 2π이므로 절대기준면으로 대한 실제 위상값을 계산하기 위해서는 정확한 2π 곱을 구하여야 한다. 결과적으로 구한 절대위상은 고도에 비례하게 된다. 이때 기본적인 가정사항은 지표면이 상대적으로 평활하게 그리고 급격하게 변하지 않아서 이웃한 영상소 사이에서는 π 이하의 위상차가 생긴다는 것이다. 절대위상복원방법은 먼저 기조점에 대한 위상값을 가지고 이웃한 영상소 사이에 위상차가 π 를 넘지않는 범위에서 2π를 각 영상소에 더하고

빼는 작업이라고 할 수 있다.

현재 ERS위성에 대한 궤도 추정은 최고로 약 30cm정확도 까지 알 수 있다 (Zebker et al, 1994). 이와 같이 높은 정확도에도 불구하고 InSAR 방법에서 사용된 기선을 추정하기에는 이 정확도가 충분치 못하다. 각각의 SLC 영상과 관련된 궤도위치 벡터에 근거하여 계산된 기선요소의 초기치는 $B_{\perp} = -192.325\,\mathrm{m}$, $\Delta B_{\perp} = -0.761\,\mathrm{m}$ (전체영상에 대한 변화량), $B_{\parallel} = 102.474\,\mathrm{m}$, $\Delta B_{\parallel} = 0.136\,\mathrm{m}$ (전체영상에 대한 변화량). 위성 궤도 위치 벡터와 기선에 대한 보다 정확한 값을 구하기 위해 1:50,000 USGS 지도 시리즈로부터 구한 4개의 지상기준점 과 GPS 관측값이 사용되었다. 먼저 시간에 대한 오차는 GCP점을 사용하여 보정하였다. 기선의 길이에 대한 정확한 값을 얻기 위해 USGS 지형도로부터 만든 저 해상도의 수치표고모형으로부터 여러 개의 접합점 (tie point)을 사용하였다. 지표면 변위의 영향을 최소화 하기위해 암반 노출지역에서 접합점을 추출하였다. 실제적인 기선의 길이는 행방향과 종방향으로 조금씩 변화한다. 이때 접합점은 이미 그 위치에서 표고를 알고 있다. 따라서 접합점을 이용하여 절대위상을 구할 수 있고, 최소제곱법에 의하여 기선의 길이 및 위상의 수렴성 등을 효과적으로 수정보안 할 수 있다. 수정보안 작업 뒤에 구한 정확한 기선의 길이는 $B_{\perp} = -189.827\,\mathrm{m}$, $\Delta B_{\perp} = -4.866$, $B_{\parallel} = 102.474$, $\Delta B_{\parallel} = 0.142$ 이다. 지상기준점과 저해상도 수치표고모형으로부터 구한 접합점을 사용한 결과 기선에 관련된 값들의 정확도가 향상되었고 따라서 구한 지상의 표고에 대한 절대적인 오차가 감소되었다.

저주파에 해당되는 지형에 대한 위상을 절대위상에 더한 다음 수정 보완된 기선에 대한 변수로 상관도가 매우 낮은 지역이나 위상의 정보가 없는 지역을 제외한 모든 영상소에서 표고를 구하였다. 기선계산에 있어 정확도를 높이기 위해 사용되었던 접합점은 절대위상을 이용하여 표고를 구할 때 초기값으로 사용하였다.

그림 4는 위상간섭법에 의하여 구한 표고를 이용하여 만든 hill-shaded relief 영상이다. 이 결과에서 보면 알 수 있듯이 호수와 바다와 가파른 경사에 해당되는 부문에 표고에 대한 정보가 없음을 알 수 있다. 이것은 이러한 지역에서는 위상의 상관도가 없거나 위상의 불연속이 존재한다. 레이다 방향의 투영에서 72.1%의 점들로부터 성공적으로 절대위상을 구할 수 있었다. 이는 바다와 호수를 포함하여 영상의 27.9%에 해당하는 점들에 대해 위상의 정보가 없다는 것이다. 1:50,000과 1:250,000 지형도의 조합으로부터 추출된 수치표고모형 (그림 5)과 비교했을 때 SAR영상을 이용한 위성 간섭법에 의해 구한 추출표고자료의 경계 형태가 USGS 지형도로부터 추출된 것과 좋은 일치도를 보이고 InSAR 추출 고도 자료는 USGS 1:50,000 지형도보다 상세한 지세를 나타내고 있음을 알 수 있다.

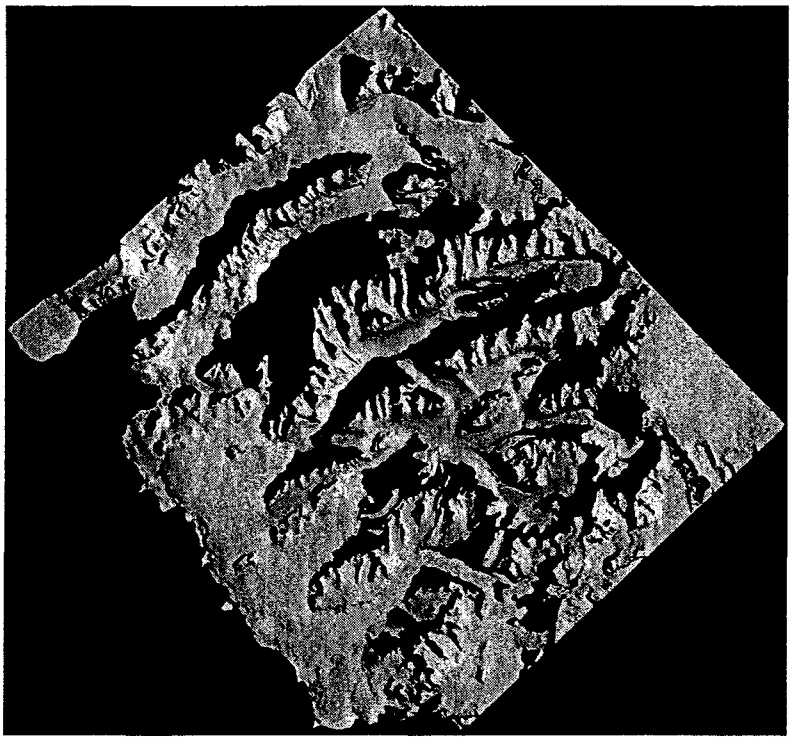


그림 4. 위상간섭법에 의해 구한 수치표고모형

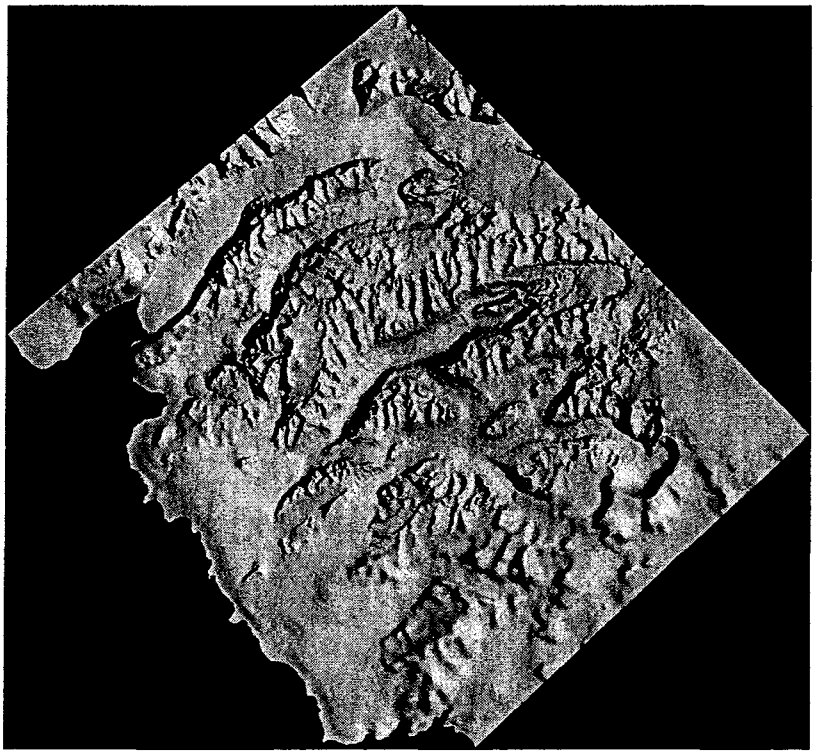


그림 5. 1:50,000 과 1:250,000 USGS 지형도로부터 작성한 수치표고모형

절대 수직 정확도를 계산하기 위해 InSAR 방법으로 추출된 표고값을 4개의 단면도를 따라 1:50,000 USGS 지형도로부터 추출된 것과 비교했다. 횡단면에 대한 평균제곱근오차 (RMSE) 값은 각각 19.4m, 20.8m, 26.2m 그리고 36m이다. RMSE 값은 InSAR 기술이 울퉁불퉁한 빙산에서 얻을 수 있는 수직 정확도의 수준을 대략적으로 반영하지만 1:50,000 지형도 자체적으로 한계가 있기 때문에 정확한 측정치를 나타내진 않는다. 그러나 어떤 지역의 InSAR 추출 표고 자료에서는 ±50m, ±100m의 규칙적인 오류가 발견되기도 한다. 이러한 규칙적인 오차는 절대위상을 복원할 때 상수의 곱을 정확하게 알 지 못해 생긴 것이다.

요약하면, 연구 지역에서의 SAR 위성을 이용한 위성간섭법은 1:50,000 USGS 지형도 보다 더 높은 해상도를 가진 고도 자료의 추출이 가능하다는 것을 보여준다. 그리고 약 20~30 m 의 수직 정확도를 얻을 수 있었다. 또 울퉁불퉁한 산이 많은 지역에서는 InSAR 한 pair만을 가지고는 표고 자료를 완전히 얻을 수 없다는 것을 알 수 있었다. ERS SAR의 투사각이 낮고 (23°) 연구대상지역의 표면경사가 높기 때문에, foreshortening 과 layover는 자료 손실의 원인으로 영상의 많은 부분에 영향을 미친다. 이 손실을 없애기 위해서, 마주 보이는 방향에 적어도 다른 InSAR pair가 요구된다고 할 수 있다.

4. 위상간섭법에 의한 지표면 변위관측

지표면의 변위를 관측하기위해 사용한 영상은 RAMP (Radarsat Antarctic Mapping Project)중에 획득한 24일 주기의 Radarsat SAR 영상이다. 또 연구대상지역은 남극의 Recovery Glacier이다. Recovery Glacier지역은 그림 6에 나타난 바와 같이 지구의 온난화 및 빙하의 동역학을 연구하는데 아주 중요한 지역으로 여러 개의 ice stream과 그 지류를 포함하고 있다.

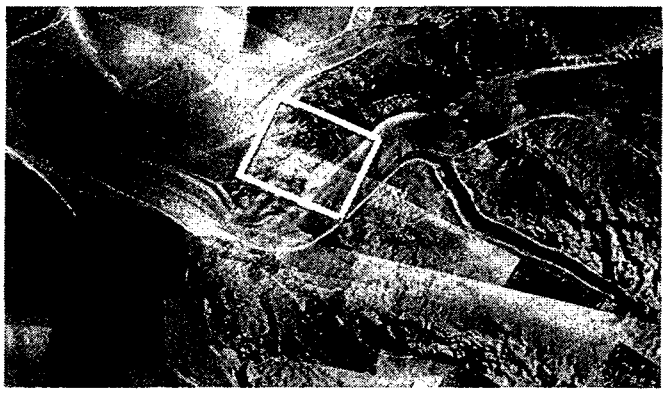


그림6. Recovery Glacier 지역을 중심으로한 Radarsat SAR mosaic의 일부분. 사각형친 부분이 InSAR 지역이다.

사용한 Radarsat-1영상은 파장 (λ)이 5.66 cm 이고 약 한 영상이 100km를 피복한다. SLC pair의 열 방향 및 행 방향 간격은 각각 8.12와 5.37 m 이다. 그림 7은 Recovery Glacier 지역의 amplitude 영상을 나타낸다. 그림에서 알 수 있듯이 Recovery Glacier는 수평방향의 전단을 받는 지역을 포함하고 있다.

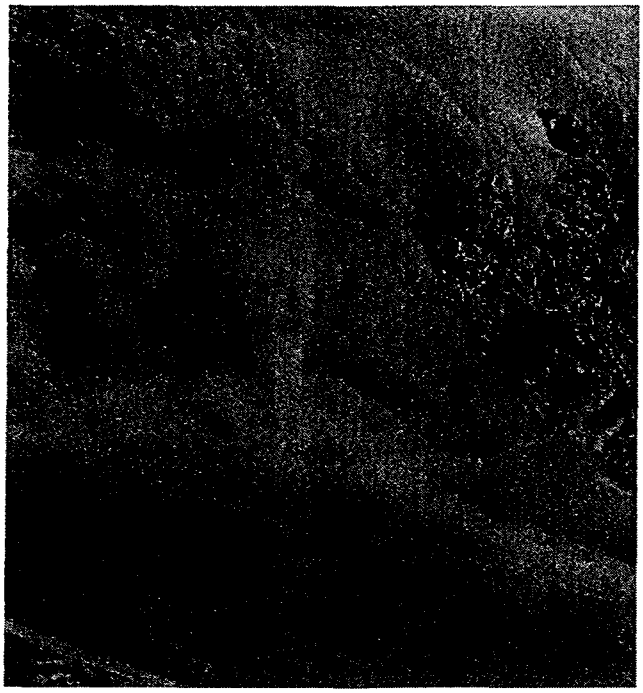


그림 7. Recovery Glacier 지역의 amplitude 영상. 레이다가 지표면을 바라보는 방향은 왼쪽에서 오른쪽방향이다.

위의 SLC 영상을 사용하여 행 방향으로 10 영상소 그리고 열 방향으로 3 영상소로 평균하여 multi look 복소수 영상을 만들었으며 이는 한 영상소가 약 50m에 해당된다. 두 영상의 상관도 (그림8)는 24일 주기동안 생기는 지상의 여러 동역학적인 변화를 고려해 볼 때 매우 높다는 것을 알 수 있다. 수평 전단 지역 (lateral shear margin)은 상관도영상으로부터 검은띠 모양으로 쉽게 찾을 수 있는데 이는 crevasse지역에서의 매우 광범위한 수평 및 회전 움직임에 기인하여 매우 상관도가 낮게 나타나기 □ 문이다.

그림 8. 대상지역의 InSAR 상관도 영상

그림 9는 기선의 영향을 제거한 뒤의 위상도 (flattened interferogram)를 나타낸다. 이는 지표면의 표고에 의한 영향과 지표면의 움직임에 의한 두 가지 영향을 포함하고 있다. 하지만 연구지역의 가운데 부문을 포함한 지역은 매우 편평한 지역이며 따라서 이 위상의 대부분은 지표의 움직임에 의하여 생기는 것으로 생각할 수 있다. 보다 정확한 기선길이를 구하기 위해 지상기준점을 사용하였으며 표고에 의해 생기는 위상의 영향을 제거하기위해 이 지역의 수치표고모형을 사용하였다.

Brunch-cut 방법을 사용하여 절대위상을 대부분의 영상에 대해 성공적으로 구하였으며 절대위상은 레이다가 보는 방향의 움직임을 구하기 위해 레이다 파장만큼 축적을 곱하였다. 바위부분의 돌출된 부분의 택하여 움직임이 없다고 가정하고 레이다가 보는 방향의 절대 변위를 구하였다. 그림 11은 레이다방향의 변위를 나타낸다. 이 지역은 상관도가 0.5보다 큰 지역에 대해서만 변위를 구한 것을 나타낸다. 결과에서 알 수 있듯이 전단지역에 있어서 레이다가 보는 방향의 속도는 1.5 에서 8m/a 로 갑자기 증가하는 것을 알 수 있다. 이 지역에 대해 비교할 만한 값이 없기 □문에 이에 대한 정확도를 알 수는 없지만 주변의 비슷한 지역에 대한 관측값과 비교해 볼 때 매우 고무적인 결과라 할 수 있겠다.

그림 10. 기선의 영향을 제거한 위상도.

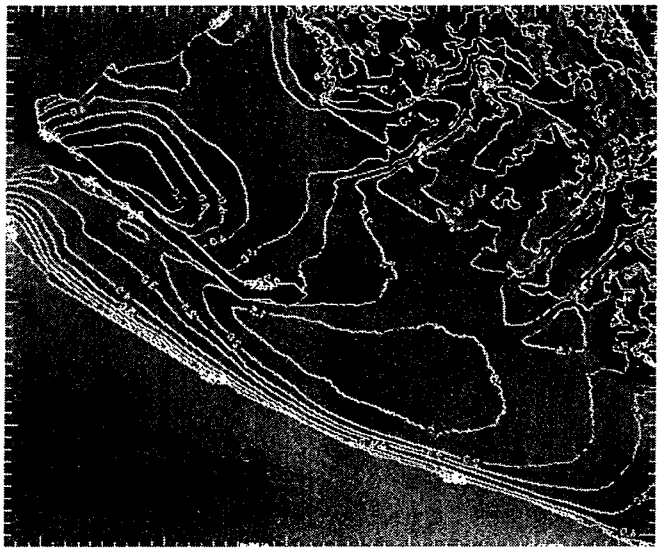


그림 11. amplitude 영상 위에 중첩한 레이다가 보는 방향의 속도에 대한 등속선. 등속선은 0.5 에서 0.8m/a 이다.

5. 결론

SAR영상을 이용한 위상간섭법을 이용하여 지형을 복원하는 방법과 변위관측을 하는 방법에 대해 알아 보았다. 그 결과 광범위한 지역의 표고를 정확도 약 20m 내외의 수준으로 복원할 수 있으며, 또한 지상의 변위는 레이다의 파장의 단위 즉 cm 단위 까지 정확하게 관측할 수 있다는 것을 알 수 있었다. 이 결과는 매우 고무적인 것으로 앞으로 광범위한 지역의 표고를 구하는 연구 및 지표면의 정밀한 변위 관측(예를 들면, 사면의 slide)에 기여할 바가 크다고 생각되며 이에 국내에서도 이 방법에 대한 활발한 연구활동이 진행되어야 한다고 사료된다.

References

Ghiglia, D.C. and M.D. Pritt, 1998, Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms, and Software, John Wiley & Sons, Inc

Goldstein, R.M., T.P. Barnett, and H.A. Zebker, 1989, Remote Sensing of ocean currents, Science, v. 246, pp. 1282-1285.

Kwok, R. and M.A. Fahnestock, 1996, Ice sheet motion and topography from radar interferometry, IEEE trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 34, No. 1, 189-200.

Lin, Q., J.F. Vesecky, and H.A. Zebker, 1994, Comparison of elevation derived from INSAR data with DEM over large relief terrain, Int. J. Remote Sensing, v.15, pp. 1775-1790.

Rodriguez, E. and J.M. Martin, 1992, Theory and design of interferometric synthetic aperture radars, IEEE Proceedings-F, Vol. 139, No. 2, 147-159.

Zebker, H.A. and R.M. Goldstein, 1986, Topographic mapping from interferometric synthetic aperture radar observations, J. Geophys. Res., 91(b5), pp. 4994-4999.

Zebker, H.A., C.L. Werner, P.A. Rosen, and S.Hensley, 1994, Accuracy of topographic maps derived from ERS-1 interferometric radar, IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing, vol. 32, pp. 823-836.