

# SAR Interferometry Phase Unwrapping 비교 분석: Branch cut, Minimum discontinuity 및 Minimum $L^p$ -norm 방법을 중심으로

김 상완, 이 효재, 원 중선  
연세대학교 지구시스템과학과  
서울 서대문구 신촌동 134  
sangwan@geors.yonsei.ac.kr

## 요 약

SAR(Synthetic Aperture Radar) interferometry 기술은 co-registration, 정밀케도 계산, phase unwrapping, 지형보정과 같은 기술로 구성되어 있다. 구속화된 위상값을 절대 위상값으로 변환하는 과정인 phase unwrapping 기술은 정밀지형고도를 얻는데 있어서 핵심기술이다. 본 연구에서는 JERS-1 SAR 영상으로부터 interferogram을 구하고, 이로부터 추출된 위상정보를 이용하여 branch cut(Goldstein et. al, 1988), minimum discontinuity(Flynn, 1997) 그리고 minimum  $L^p$ -norm(Ghiglia and Romero, 1996)방법 적용결과에 대한 비교 분석을 실시하였다.

Goldstein 알고리즘은 수행속도가 매우 빠르지만 residue를 연결한 branch cut에 의해 분할된 영역 내에서, 서로 다른 적분 경로로 인해 위상이 단절되었다. 영상내의 모든 화소에서 절대 위상을 구한 minimum discontinuity와 minimum  $L^p$ -norm 알고리즘 수행 결과는 상관관계가 0.995로 매우 유사하였는데, 가중된 불연속선의 합을 최소화하는 minimum discontinuity 알고리즘이 minimum  $L^p$ -norm에 비해 영상 일부 지역에서 발생하는 위상 오차를 전파시키지 않는다는 장점이 있다. Minimum  $L^p$ -norm 방법은 다른 두 방법과 달리 위상정보 내에 많은 잡음이 있더라도 적절한 해를 구할 수 있다는 장점이 있다. 각 방법은 대상 자료의 특성에 따라 효율성이 있으나 Flynn의 알고리즘이 지역적 특성과 무관하게 가장 효과적임을 알 수 있었다.

## I. 서론

Interferometry 기술은 최근에 지형고도 추출 및 산사태, 지진, 화산활동 등에 의한 지형변화의 정밀한 관측을 위해 급격하게 발전하고 있다. 서로 다른 위치에서 획득된 두 SAR 영상의 위상정보를 이용한 레이더 interferometry 기법은 입체시 기법과 달리 기상상태, 자연광 정도에 영향을 받지 않는다는 장점이 있다. Interferometric SAR(InSAR) 기법에 있어서  $(-\pi, \pi]$  구간의 값으로 구속화된 위상정보로부터 절대 위상값을 구하기 위한 phase unwrapping은 매우 중요한 단계이다. 이러한 과정은 영상 내에 잡음이 없고, 서로 이웃한 interferometric 신호에서  $\pm\pi$ 보다 더 큰 위상변화가 없다면 매우 단순한 적분에 의해서 유일한 절대 위상을 구할 수 있다. 하지만

실제 SAR 영상은 speckle 잡음, thermal 잡음 및 temporal decorrelation에 의한 두 자료간의 낮은 간밀도 등에 의해 많은 위상 불연속점들이 존재한다. 위상 불일치를 처리하기 위한 방법 중 하나는 각 불일치 점들은 찾고 그것들을 서로 연결한 다음 적당한 적분 경로를 선택하여 화소 대 화소 unwrapping을 수행하는 것으로 Goldstein et. al(1998)에 의해 제안된 이후로 가장 일반적으로 사용되고 있다. 최소자승법을 이용한 phase unwrapping 기법은 구속화된 위상과 불구속화된 위상 기울기간의 차이를 최소화하는 것으로 Ghiglia and Romero(1994)에 의해서 InSAR 분야에 적용된 이후로 널리 활용되고 있다.

## II. 연구방법 및 자료

두 SAR 영상에서 획득되는 위상정보  $\psi(t)$ 는 식(1)에서와 같이 임의의 정수함수  $k(t)$ 에 의해  $(-\pi, \pi]$ 로 구속화된다.

$$\psi(t) = \varphi(t) + 2\pi k(t) \quad (1)$$

$\varphi(t)$ 는 interferometry에서 지표의 고도와 관련된 정보를 포함하고 있으며 보다 정량적인 분석을 수행하기 위해서는 구속화된 위상  $\psi(t)$ 로부터 절대 위상  $\varphi(t)$ 에 대한 추정치  $\phi(t)$ 를 구해야한다. 2차원 영상에서 이러한 과정은 두 화소간의 임의의 적분경로  $C$ 를 따라  $\nabla\phi$ 를 적분함으로써 구현될 수 있다. 실제 SAR 영상에 적용하는 경우에 있어서는 위상불일치 또는 residue의 존재에 의해 적분경로  $C$ 의 선택에 따라 전혀 다른 위상값을 구하게 되는데, 이러한 문제를 해결하기 위한 접근 방법은 크게 위상불일치를 고려하여 적절한 적분경로  $C$ 를 선택하는 방법(path-following)과 식(2)과 같이 추정 위상 기울기와 측정된 위상 기울기의 차의 제곱( $\epsilon^2$ )을 최소로 하는 minimum norm으로 구분된다.

$$\epsilon^2 = \int W(\nabla\phi - (\nabla\varphi + n))^2 dA \quad (2)$$

여기서,  $W$ 는 가중함수,  $n$ 은 위상정보에 대한 잡음 벡터이다.

본 연구에서는 path-following 중 대표적인 Goldstein 방법과 Flynn 방법을 그리고 minimum norm 방법 중 Ghiglia의  $L^p$ -norm 방법을 JERS-1 SAR 영상에 적용하고 그 결과를 비교 분석하고자 한다. Phase unwrapping 결과의 정량적인 평가를 위해서는 절대 위상으로부터 수치표고자료를 추출하고 기존의 수치표고자료와 오차분석 등을 실시하여야 하지만, 본 연구에서는 세 가지 결과들의 상대적 값의 변화를 이용한 정성적 분석만을 실시하였다.

## III. 적용결과 및 분석

본 연구에서 이용된 JERS-1 SAR 자료는 1994년 8월 29일과 1995년 8월 16일에 취득된 복소수 자료로서 백두산 일대가 포함된다. Fig. 1은 백두산 천지를 중심으로 한 시험적용 지역(4096×2048화소)의 진폭영상으로 방위방향의 화소간격이 약 4.46m,

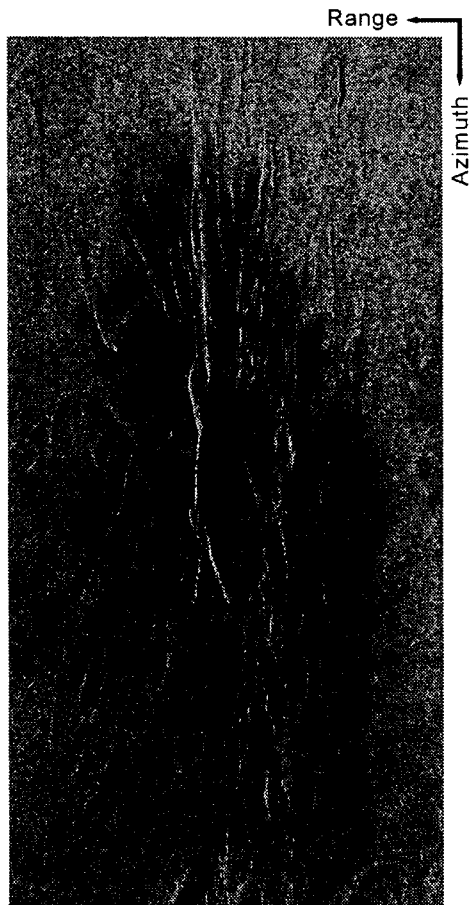


Fig. 1. JERS-1 SAR Amplitude image for Mt. Baegdu.

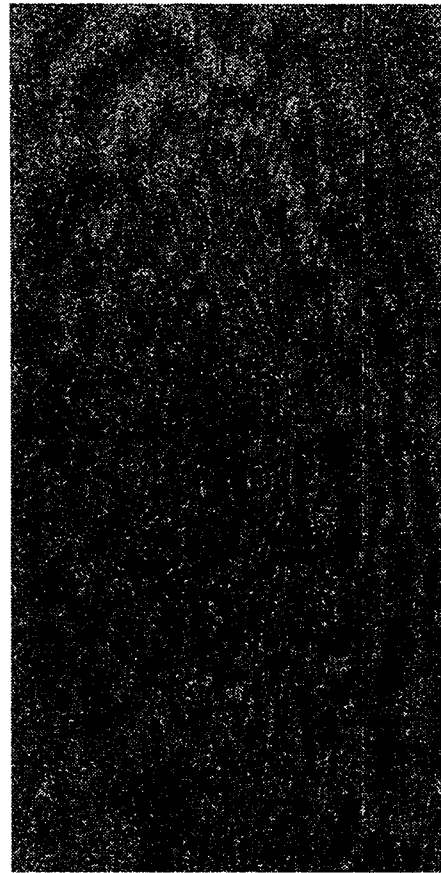


Fig. 2. Raw interferogram of test area.

지표 거리방향은 약 13.17m이기 때문에 길게 신장되어 보이고 있다. Fig. 2의 interferogram은 방위 및 거리방향의 전처리 필터링과 진폭 상관계수 및 스펙트럼 상관계수의 혼합을 이용한 co-registration을 수행한 후 지구타원체에 의한 위상정보를 제거한 것으로, 비록 두 자료 사이의 획득시간 간격이 거의 1년이나 되지만 JERS-1 위성의 긴 파장(L밴드)으로 인해 어느 정도의 interferogram이 형성되었다. single-look 자료를 이용하여 생성된 이러한 interferogram은 효과적으로 위상 잡음을 제거하기 위해 multi-look 처리 또는 exponential, sinc 함수 등을 이용한 저주파통과 필터 등이 이용된다. 본 연구에서는 방위방향으로 35, 거리방향으로 5 크기의 sinc 함수를 이용하여 필터링을 수행한 후 방위방향과 지표 거리방향의 비를 맞추기 위해 방위방향으로의 샘플 개수를 1/3로 줄였다. 최종적으로 phase unwrapping에 입력자료로 사용된 Fig. 3은 Carrasco et. al(1996)의 STFT(Short Time Fourier Transform)을 지형적 특성에 따라 소창문의 크기를 변형하는 방법을 이용하여 필터링한 것이다.

Fig. 3의 interferogram으로부터 추출된 구속화된 위상정보는 각각 Goldstein, Flynn 및 Ghiglia의 알고리즘에 적용되었으며 그 결과는 Fig. 4와 같고 절대위상의 통

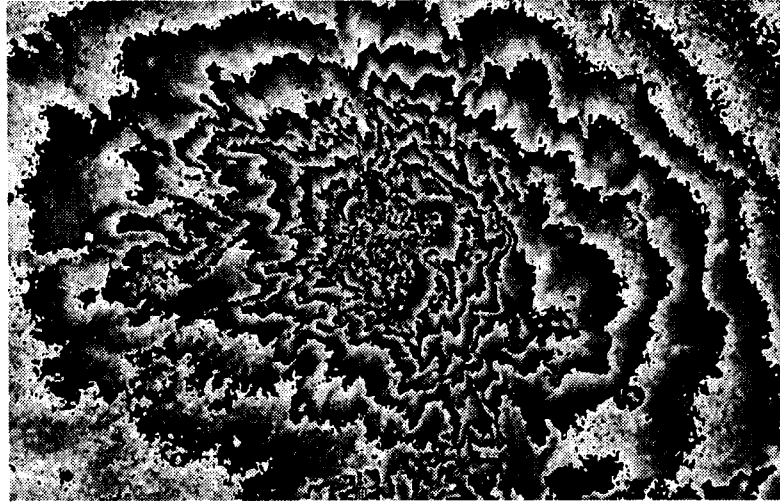


Fig. 3. Enhanced interferogram of Mt. Baegdu.

계적 특성은 Table 1과 같다. 다른 두 가지 방법과 달리 Goldstein 방법 결과(Fig. 4(a))는 phase unwrapping이 전지역에 대하여 수행되지 못했으며 아울러 몇 개의 큰 블록(중앙부, 좌·우측부)을 경계로 하여 위상이 단절되는 것을 볼 수 있다. 이러한 것은 branch cut을 경계로 서로 전혀 다른 적분 경로의 선택에 의해 phase unwrapping이 수행되었기 때문이다. Flynn과 Ghiglia에 의한 두 결과 Fig. 4(b), (c)는 전지역에 걸쳐 절대 위상을 구하였으며 또한 위상의 변화가 smooth함을 알 수 있다. 각 결과의 정량적 분석을 위해서는 수치표고자료를 이용하는 방법이 일반적이나, 현재 이 지역의 수치표고자료가 없고 unwrapping된 interferogram은 절대 위상정보의 고도화 및 geocoding등의 과정이 아직 수행되지 않았기 때문에 다음과 같이 상대적인 평가만을 실시하였다. 먼저 두 unwrapping 결과 사이의 상관계수가 0.995로 매우 유사한 Fig. 4(b)와 Fig. 4(c)의 위상 차를 구해보았다(Fig. 5(a)). 대부분의 지역에서 단순한 평균값의 차이만을 보이고 있으나 영상 좌측부와 중앙부에서 차이를 보이고 있다. 영상 중앙부는 백두산의 천지에 의해 두 SAR 자료간의 긴밀도가 매우 낮아 interferogram이 형성되지 않는 부분으로 이러한 부분은 최종적으로 제거되어야 한다. 이와 달리 영상 좌측부에 발생하는 오차는 두 결과 중 하나가 잘못 계산한 것으로 해석되는데, Fig. 5(b), (c)는 이러한 해석에 유용한 정보를 제공한다. Fig. 5(b)는

Table 1. Statistic of unwrapped data by 3 methods.

	Branch cut	Minimum discontinuity	Minimum $L^p$ norm
Minimum	-18.245	-10.388	-22.379
Maximum	49.957	53.837	41.964
Mean	13.307	18.395	5.776
Std. Dev.	10.593	10.625	10.626

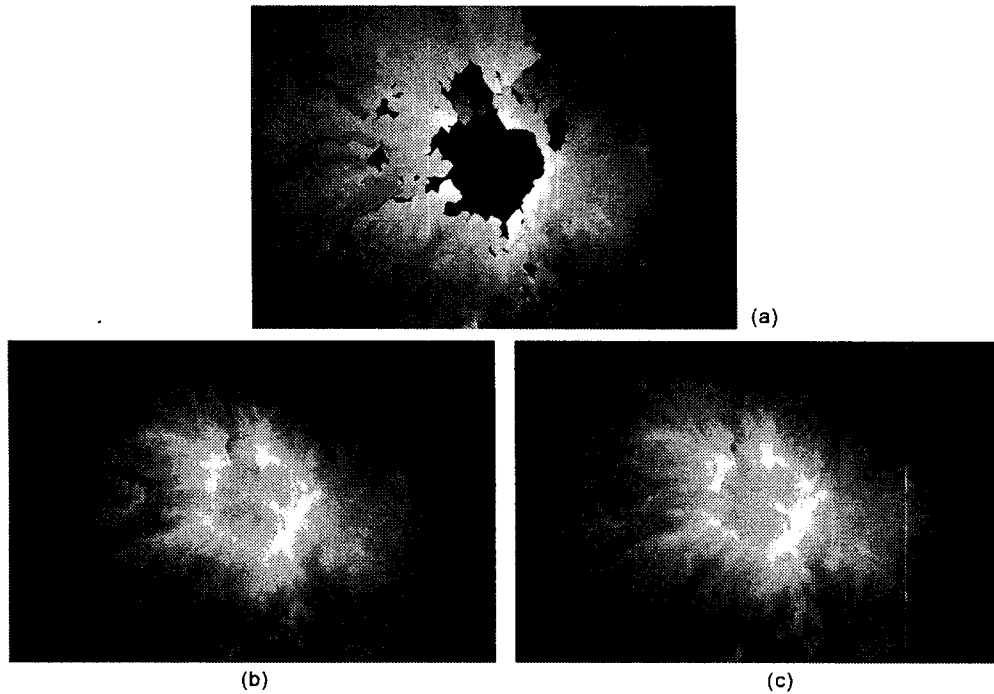


Fig. 4. Unwrapped phase after (a) Goldstein's branch cut, (b) Flynn's minimum discontinuity, and (c) Ghiglia's minimum  $L^p$ -norm algorithm.

Ghiglia에 의한 결과에서 Goldstein 결과를 뺀 영상이고 Fig. 5(c)는 Flynn 결과에서 Goldstein 결과의 차를 구한 것이다. 두 영상 모두 Goldstein 결과에서 나타나는 위상 단절에 의한 영향이 우세하지만 Fig. 5(a)의 좌측부에 나타나는 반점은 Fig. 5(c)에서만 관찰되고 있다. 일반적으로 branch cut 알고리즘은 화소 대 화소로 계산하기 때문에 광범위한 지역에서 위상의 연속성을 유지하는데는 문제점이 있지만 지역적인 위상 계산은 가장 정확하다. 따라서 Fig. 5(a)에서 나타나는 위상 오차는 Ghiglia 방법에 의한 것으로 판단된다. 또한 세 가지 알고리즘의 수행속도에 있어서는 branch cut 알고리즘이 가장 빠르고 Flynn의 minimum discontinuity 그리고 Ghiglia의  $L^p$ -norm 알고리즘 순이다. 본 연구에서는 Flynn의 방법이 가장 좋은 결과를 보였다.

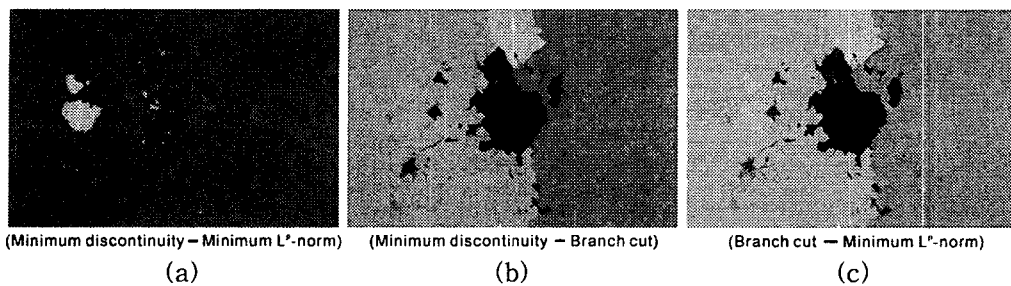


Fig. 5. Unwrapped phase difference among the algorithms.

#### IV. 결론

본 연구에서는 백두산 지역의 JERS-1 SAR 영상으로부터 추출된 interferogram을 이용하여 Goldstein의 branch cut, Flynn의 minimum discontinuity 그리고 Ghiglia의 minimum  $L^p$ -norm 알고리즘에 대한 장·단점을 비교하였다. 비록 JERS-1 SAR 영상은 두 자료 획득 사이의 간격이 1년여임에도 불구하고 비교적 높은 긴밀도를 유지하고 있어 InSAR에 충분히 이용 가능하였다.

Branch cut 알고리즘은 수행 속도가 빠르고 residue의 수가 적은 지역에서는 정확한 절대 위상을 구할 수 있다는 장점이 있지만 residue가 많거나 또는 residue를 연결한 branch cut에 의해 서로 분할된 영상들의 위상이 연속되지 않는다는 단점이 있었다. 가중된 불연속선의 합을 최소화하는 Flynn의 알고리즘은 영상내의 모든 화소에서 절대 위상을 구할 수 있으며, 최소자승법을 이용한 방법과 달리 영상 내 일부 지점의 불연속에 의한 위상 오차가 영상 전체로 전파되지 않는다는 장점이 있다. Minimum  $L^p$ -norm 방법은 영상 내에 잡음이 많더라도 대상지역 전체에 걸쳐 매우 smooth한 위상을 얻을 수는 있으나 실제 지표에서 나타나는 지형학적 불연속 및 layover에 의한 위상 불연속을 반영하지 못한다. 따라서 이러한 결과는 영상 전체에 걸쳐서 위상 오차를 발생시키고, 결국 원래의 위상 자료와 잘 일치되지 않는다. 본 연구 결과, 대상 자료의 특성에 따라 각 방법의 효율성이 있으나 Flynn의 알고리즘이 지역적 특성과 무관하게 가장 효과적임을 알 수 있었다. Phase unwrapping은 InSAR에서 여전히 중요한 문제로 남아 있으며, 적절한 적분 경로의 선택과 잡음이 많은 지역에서의 최소자승법의 장점을 결합한 알고리즘의 개발이 필요하다.

#### 감사의 글

본 연구에 사용된 JERS-1 SLC 자료를 제공하여 주신 서울대학교 문우일 교수님께 진심으로 감사 드립니다.

#### 참고문헌

- T. J. Flynn, "Two-dimensional phase unwrapping with minimum weighted discontinuity," J. Opt. Soc. Am. A 14, 2692-2701 (1997).
- R. M. Goldstein, H. A. Zebker, and C. L. Werner, "Satellite radar interferometry: two-dimensional phase unwrapping," Radio Sci. 23, 713-720 (1988).
- D. C. Ghiglia and L. A. Romero, "Robust two-dimensional weighted and unweighted phase unwrapping that uses fast transforms and iterative methods," J. Opt. Soc. Am. A 11, 107-117 (1994).
- D. C. Ghiglia and L. A. Romero, "Minimum  $L^p$ -norm two-dimensional phase unwrapping," J. Opt. Soc. Am. A 13, 1999-2013 (1996).
- D. C. Ghiglia and M. D. Pritt, Two-Dimensional Phase Unwrapping: Theory, Algorithms, and Software(Wiley, New York, 1998).
- D. Carrasco, S. Sanz, R. Sousa, and A. Broquetas, "The Developing of a Wide Area Interferometric Processor," Fringe 96 Workshop 193-201 ( 1996 ).