

차분 간섭도로부터 지표변위의 시계열 관측을 위한 개선된 Small Baseline Subset (SBAS) 알고리즘

정형섭 · 이창욱 · 박정원 · 김기동 · 원중선[†]

연세대학교 이과대학 지구시스템과학과

Improvement of Small Baseline Subset (SBAS) Algorithm for Measuring Time-series Surface Deformations from Differential SAR Interferograms

Hyung-Sup Jung, Chang-Wook Lee, Jung-Won Park, Ki-Dong Kim, and Joong-Sun Won[†]

Department of Earth System Sciences, Yonsei University

Abstract : Small baseline subset (SBAS) algorithm has been recently developed using an appropriate combination of differential interferograms, which are characterized by a small baseline in order to minimize the spatial decorrelation. This algorithm uses the singular value decomposition (SVD) to measure the time-series surface deformation from the differential interferograms which are not temporally connected. And it mitigates the atmospheric effect in the time-series surface deformation by using spatially low-pass and temporally high-pass filter. Nevertheless, it is not easy to correct the phase unwrapping error of each interferogram and to mitigate the time-varying noise component of the surface deformation from this algorithm due to the assumption of the linear surface deformation in the beginning of the observation. In this paper, we present an improved SBAS technique to complement these problems. Our improved SBAS algorithm uses an iterative approach to minimize the phase unwrapping error of each differential interferogram. This algorithm also uses finite difference method to suppress the time-varying noise component of the surface deformation. We tested our improved SBAS algorithm and evaluated its performance using 26 images of ERS-1/2 data and 21 images of RADARSAT-1 fine beam (F5) data at each different locations. Maximum deformation amount of 40cm in the radar line of sight (LOS) was estimated from ERS-1/2 datasets during about 13 years, whereas 3 cm deformation was estimated from RADARSAT-1 ones during about two years.

Key Words : SAR, SBAS algorithm, time-series surface deformation, ERS-1/2, RADARSAT-1.

요약 : 최근 spatial decorrelation을 극복하기 위하여 비교적 짧은 기선(baseline)을 지나는 여러 시기의 차분간섭도(differential interferogram)로부터 시계열 지표변위(time-series surface deformation)를 관측할 수 있는 small baseline subset(SBAS) 알고리즘이 개발되었다. 이 SBAS 알고리즘은 singular value decomposition(SVD)을 이용하여 시간별로 완벽하게 연결되지 않는 차분간섭도로부터 시계열 지표변위를 관측하였을 뿐 아니라 공간적으로 저주파 필터와 시간적으로 고주파 필터를 이용하여 대기효과를 보정하였다. 그러나 이 알고리즘은 초기 관측시 시계열 지표변위를 선형으로 가정하였기 때문에 각 차분간섭

2008년 4월 1일 접수 ; 2008년 4월 10일 수리.

[†] 교신저자: 원중선(jswon@yonsei.ac.kr)

도의 phase unwrapping 오차를 정확하게 보정하기 어려웠을 뿐 아니라 시계열의 지표변위에 존재하는 노이즈 성분을 완화시키지 못했다. 이와 같은 단점을 보완하기 위하여 이 연구에서는 기존의 SBAS 알고리즘을 개선하였다. 이 개선된 SBAS 알고리즘은 각 차분간섭도의 phase unwrapping 오차를 최소화하기 위하여 반복적으로 시계열 지표면 변위를 개선하였고, 시계열 지표변위의 노이즈를 제거하기 위하여 유한차분 근사법(finite difference approximation)을 이용하였다. 서로 다른 지역의 26개의 ERS-1/2자료와 21개의 RADARSAT-1 fine beam (F5) 자료를 이용하여 개선된 SBAS 알고리즘을 실험하고 분석하였다. ERS-1/2자료에서는 LOS(line-of-sight) 지표변위가 약 13년 동안 최대 -40cm가 관측되었고, RADARSAT-1 fine beam 자료에서는 약 2년 동안 최대 -3cm의 LOS 지표변위가 관측되었다.

1. 서론

근래에 개발된 레이더 차분간섭(Differential Interferometric Synthetic Aperture Radar; DInSAR)기법은 2차원적으로 수 십 km² 이상의 넓은 지역에서 수 cm 내지 수 mm 정도의 측정 민감도를 지니고 지표변위를 관측하는데 성공적으로 이용되어온 기술이다. 과거 15년동안 차분간섭기법은 지진(Massonnet *et al.*, 1993; Fialko *et al.*, 2005), 화산(Massonnet *et al.*, 1995; Amelung *et al.*, 2000; Lee *et al.*, 2008), 빙하(Joughin *et al.*, 2006), 산사태(Tarchi *et al.*, 2003), 지하수 팽창(Amelung *et al.*, 1999), 매립지 침하(Kim *et al.*, 2005) 등에 활용되어 왔다.

현재까지 전 세계 많은 지역에서 SAR 영상자료가 축적됨에 따라 시계열 지표변위(time-series surface deformation)의 측정에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다. 그러나 temporal decorrelation, baseline decorrelation 등과 같은 영향에 의하여 전체 관측시간에 따른 동일위치에서의 지표변위를 정량적으로 측정하는 것은 쉽지 않았다. Ferretti *et al.*(2000, 2001)은 이를 해결하기 위하여 긴밀도(coherence)가 높은 고정된 산란체인 Permanent Scatterer(PS)에 기반하여 시계열 지표변위를 관측하는 PSInSAR(Permanent Scatterer SAR Interferometry)기법을 개발하였다. 이 기법은 SAR 영상으로부터 연간 수 mm의 침하량을 관측할 수 있게 하였으며, 지반침하(Dixon *et al.*, 2006), 지구조 운동 변위 관측(Lyons and Sandwell, 2003), 폐광산 침하(Jung *et al.*, 2007) 등에 활용되었다. 그러나 PSInSAR기법은 모든 SAR 자료를 하나의 주영상(master image)과 나머지 부영상(slave image)으로 구분한 후, PS에서의 침하를 측정하기 때문에 주

영상과 부영상 간의 수직기선(perpendicular baseline)이 큰 차분 간섭도에서 spatial decorrelation을 발생시키는 단점을 지닌다.

Berardino *et al.*(2002)은 spatial decorrelation을 극복하기 위하여 비교적 짧은 기선을 지나는 차분 간섭도만을 이용하여 시계열 지표 변위를 관측할 수 있는 small baseline subset(SBAS) 알고리즘을 개발하였다. 이 알고리즘은 시간적으로 연결되지 않는 차분간섭도로부터 시계열 지표면의 변위를 연속적으로 관측하기 위하여 singular value decomposition(SVD)를 이용하였고, unwrapping 오차를 최소화하기 위하여 잔류 차분간섭도(residual DInSAR interferograms)를 이용하여 공간적으로 저주파 필터와 시간적으로 고주파 필터를 적용하였다. 이 방법을 적용하여 칼데라(Tizzani *et al.*, 2007, 2008), 단층(Lanari *et al.*, 2007), 도심지의 지표변위(Casu *et al.*, 2006) 등에서 시계열 지표 변위가 관측되었다. 그러나 이 방법은 초기 관측시 시계열 지표 변위를 선형으로 가정하였기 때문에 각 차분간섭도의 phase unwrapping 오차를 정확히 보정하기 어려웠을 뿐만 아니라 시계열 지표변위의 노이즈 성분을 완화시키지 못했다.

이 연구에서는 기존의 SBAS 알고리즘의 단점을 보완하기 위하여 SBAS 알고리즘을 향상시켰다. 제안하는 SBAS 알고리즘은 다음과 같이 향상되었다:

- 1) SBAS 알고리즘에 사용하는 모든 차분간섭도에서 양질의 차분간섭도만을 추출한 후, 양질의 차분간섭도만을 이용하여 초기 선형 지표변위와 고도오차를 관측한다. 초기 선형 지표변위는 대기추출과 고도오차 관측에 매우 중요한 역할을 하기 때문에 최대한 비교적 정확한 관측을 요구한다. 이와 같은

방법은 unwrapping 오차를 지니거나 coherence 가 낮은 차분간섭도를 제외함으로써 보다 정확한 초기 선형 지표변위와 고도오차를 관측할 수 있도록 한다.

- 2) SBAS 알고리즘에 의하여 관측된 시계열 지표변위를 반복과정을 통하여 개선한다. 비록 양질의 차분간섭도를 이용하여 선형 지표변위를 추출하였다고 하더라도, 지표변위를 선형으로 단순화하여 시계열 지표변위를 근사화하는 것은 결과를 왜곡시킬 가능성이 있다. 이와같은 단점을 보완하기 위하여 제안한 알고리즘은 반복과정을 거쳐 시계열 지표변위의 왜곡을 완화시켰다.
- 3) 유한차분 근사법(finite difference approximation)을 이용하여 시계열 지표변위의 노이즈를 완화시킨다. 기존의 SBAS 알고리즘은 단지 공간적으로 노이즈를 완화시켰지만, 이 연구에서 제안하는 SBAS 알고리즘은 유한차분 근사법을 이용하여 노이즈 완화를 시간으로도 확장하였다.
- 4) 참조 위상 보정(reference phase correction)이 반복과정을 통하여 적용되어진다. 차분간섭도는 제로 위상의 위치를 정해주어야 하며, 이를 참조점(reference point)이라 한다. 참조점은 대개 지표변위가 없고, coherence가 높은 안정적인 점(stationary point)을 선택한다. 그러나 이와 같이 선택된 참조점이라도 대기의 영향과 궤도오차에 의한 영향을 지니게 되기 때문에 참조점에 의존한 제로 위상은 참조점으로부터 멀어질수록 오차를 전파시킨다. 이 문제를 해결하기 위하여 제안하는 SBAS기법은 참조점으로부터 선택된 제로 위상을 잔류 차분간섭도를 이용하여 반복적으로 개선한다.

우리는 26개의 ERS-1/2 자료와 21개의 RADARSAT-1 fine beam 자료를 이용하여 이 연구에서 제안하는 알고리즘을 검증하였다.

2. 개선된 SBAS 알고리즘

1) Basic time series

$N+1$ 개의 SAR 영상이 동일한 지역에서 얻어졌고, $(t_0,$

$t_1, \dots, t_N)$ 과 같이 영상의 촬영 시간이 주어졌다고 가정하자. 그러면 수식 (1)과 같이 차분 간섭도의 수(M)는 $N(N+1)/2$ 이하일 것이다.

$$M \leq N \cdot \left(\frac{N+1}{2} \right) \quad (1)$$

각 차분간섭도의 위상($\Delta\phi_{ij}$)은 두 영상사이의 시선방향(line-of-sight; LOS)의 지표 변위를 나타내며, 아래와 같이 정의될 수 있다(Berardino *et al.*, 2002).

$$\Delta\phi_{ij} = \phi_i - \phi_j = \frac{4\pi}{\lambda} (d_i - d_j) \quad (2)$$

여기서 λ 는 레이더의 파장이고, d_i 와 d_j 는 기준시간(t_0)에 대한 t_i 와 t_j 에서의 LOS 지표변위를 나타낸다.

임의의 영상점의 지표변위와 관련된 $N+1$ 의 위상 벡터를 식 (3)과 같이 정의하고, 차분간섭도로부터 측정된 M 개의 위상차 벡터를 식 (4)와 같이 정의하자.

$$\phi^T = [\phi_0, \phi_1, \dots, \phi_{N-1}, \phi_N] \quad (3)$$

$$\Delta\phi^T = [\Delta\phi_{01}, \Delta\phi_{03}, \Delta\phi_{13}, \Delta\phi_{24}, \dots, \Delta\phi_M] \quad (4)$$

그러면 위상벡터(ϕ)와 위상차 벡터($\Delta\phi$)는 아래와 같이 행렬로 표현될 수 있다.

$$A \cdot \phi = \Delta\phi \quad (5)$$

여기서 행렬 A 는 계획행렬(design matrix)이다.

$N+1$ 개의 SAR 영상으로부터 제작된 M 개의 차분간섭도를 고려하면, 계획행렬(A)는 $M \times (N+1)$ 행렬로 정의되고, 식 (6)과 같은 형태를 지니게 된다.

$$A = \begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ -1 & 0 & 0 & 1 & 0 & \dots \\ 0 & -1 & 0 & 1 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & -1 & 0 & 1 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix} \quad (6)$$

위의 식 (5)에서 정의되는 미지수의 수는 계획행렬의 랭크(rank)보다 하나 더 크기 때문에 지표 변위 위상은 지표면의 변위가 0이라고 가정되는 참조영상에서 상대적으로 정의되어야 한다. 이것은 묵시적으로(implicitly) 미지수 하나를 제거함으로써 가능하다. 식 (6)에서 계획행렬 A 가 $N+1$ 개의 미지수와 M 개의 방정식을 지니고 있다고 하더라도 계획행렬 A 의 랭크는 단지 N 이 된다. 이와 같은 이유로 미지수를 완벽하게 결정할 수 없다. 식 (3)과 (6)에 대하여 시간 t_0 에서의 $\phi_0 = 0$ 라고 가정하면 미지수는 N 개가 되며, 이는 다음과 같이 표현된다.

$$\phi^T = [\phi_1, \dots, \phi_{N-1}, \phi_N] \quad (7)$$

$$A = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & 1 & 0 & \dots \\ -1 & 0 & 1 & 0 & \dots \\ 0 & -1 & 0 & 1 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix} \quad (8)$$

여기서 벡터 ϕ 와 행렬 A 의 크기는 각각 $N \times 1$ 과 $M \times N$ 이다.

2) Singular value decomposition(SVD)

만약 행렬의 랭크가 떨어진다면, 그 행렬의 역행렬을 구하는 것은 불가능하다. 하지만, minimum norm least square solution에 의해서 구해지는 pseudo-inverse는 singular value decomposition(SVD)로부터 얻어질 수 있다. 행렬 A 는 수식 (9)와 같이 SVD에 의해서 분해된다.

$$A = USV^T \quad (9)$$

여기서 U 는 A 의 left-singular vectors를 포함하는 $M \times M$ 직교행렬(orthogonal matrix)이고, V 는 A 의 right-singular vectors를 포함하는 $N \times M$ 직교행렬이며, S 는 $M \times M$ 대각행렬(diagonal matrix)로 S 의 대각 성분은 A 의 singular values이다.

A 의 역행렬은 다음과 같이 정의된다.

$$A^{-1} = VS^{-1}U^T \quad (10)$$

S 가 대각행렬이므로, S 의 역행렬 S^{-1} 은 아래와 같이 주어진다.

$$S^{-1} = \text{diag}\left(\frac{1}{\sigma_1}, \frac{1}{\sigma_2}, \dots, \frac{1}{\sigma_M}\right) \quad (11)$$

그러나 행렬 A 의 랭크가 떨어진다면, singular values 중 하나 또는 그 이상이 0이거나 0에 가까운 수를 지니게 되므로 이러한 값의 역수를 얻는 것은 합리적이지 않다. 이와 같은 이유로 거의 0에 가까운 singular values의 역수를 0으로 바꾸어준다. 만약 식 (4)에 의해서 정의된 위상차 벡터($\Delta\phi$)가 L 개의 서로 다른 짧은 기선 부분집합(small baseline subset)으로 이루어졌다고 한다면, 행렬 A 의 랭크는 $N - L + 1$ 이 될 것이며, 이때 pseudo-inverse matrix(S^+)는 다음과 같이 정의될 수 있다(berardino *et al.*, 2002).

$$S^{-1} = \text{diag}\left(\frac{1}{\sigma_1}, \frac{1}{\sigma_2}, \dots, \frac{1}{\sigma_{N-L+1}}, 0, \dots, 0\right) \quad (12)$$

여기서 L 은 시간적으로 서로 이어지는 부분집합의 개수를 의미하는 것으로, 만약 지표 변위를 정의하는 위상차 벡터($\Delta\phi$)가 $\Delta\phi^T = [\Delta\phi_{01}, \Delta\phi_{03}, \Delta\phi_{13}, \Delta\phi_{24}]$ 과 같이 정의된다면, $L = 2$ 가 된다.

Minimum norm least squares approximation을 통한 측정된 위상벡터($\hat{\phi}$)는 아래와 같이 정의된다.

$$\hat{\phi} = A^+ \cdot \Delta\phi \quad (13)$$

여기서 $A^+ = VS^+U^T$ 이다.

그렇지만 불행히도 시간의 급수를 이용하는 방식은 결과 값에서 불연속성을 지니게 되기 때문에, 즉 서로 다른 부분집합의 지표 변위가 서로 연결되지 않기 때문에, 의미없는 결과를 도출한다(Berardino *et al.*, 2002).

3) Velocity inversion

앞서 기술한 바와 같이 시간급수를 이용하여 Singular value decomposition을 수행하는 경우, 지표 변위를 시간에 따라 누적시킬때 서로 다른 부분집합이 독립적으로 누적되기 때문에 의미없는 결과를 도출하게 된다. 이와 같은 이유로 시간 급수 방정식을 속도(위상의 변화율)에 대하여 다시 정의할 필요가 있다(Berardino *et al.*, 2002). 따라서 식 (7)에 정의된 미지수를 지닌 위상벡터(ϕ)는 아래와 같이 속도벡터(v)로 다시 정의될 수 있다.

$$v^T = \left[v_1 = \frac{\phi_1}{t_1 - t_0}, \dots, v_N = \frac{\phi_N - \phi_{N-1}}{t_N - t_{N-1}} \right] \quad (14)$$

또한 식 (4)에 정의된 각 차분간섭도의 위상차($\Delta\phi_{ij}$)는 속도에 대하여 아래와 같이 정의된다.

$$\Delta\phi_{ij} = \sum_{k=i}^j (t_k - t_{k-1}) \cdot v_k, \text{ for } i \text{ and } j = 1, \dots, N \quad (15)$$

식 (15)를 행렬형식으로 표현하면 아래와 같다.

$$B \cdot v = \Delta\phi \quad (16)$$

여기서 행렬 B 는 $M \cdot N$ 행렬(design matrix)로 아래와 같이 주어진다.

$$B = \begin{pmatrix} t_1 - t_0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ t_1 - t_0 & t_2 - t_1 & t_3 - t_2 & 0 & \dots \\ 0 & t_2 - t_1 & t_3 - t_2 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & t_3 - t_2 & t_4 - t_3 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \end{pmatrix} \quad (17)$$

SVD 분해법은 행렬 \mathbf{B} 에 적용되고, 속도벡터 \mathbf{v} 에 대한 minimum-norm 방식을 이용하기 때문에 서로 다른 부분 집합사이에 생기는 불연속이 발생하지 않는다. 그러나 지표 변위 위상 값을 얻기 위해서는 추가적으로 시간에 대한 속도를 누적하는 절차가 요구된다. 결과적으로 도출된 지표 변위 위상 값(ϕ_i)은 아래의 수식으로부터 얻어진다.

$$\phi_i = \sum_{k=i}^j (t_k - t_{k-1}) \cdot v_k, \text{ for } i = 1, \dots, N \quad (18)$$

4) Mean velocity estimation

어떤 경우에는 도출된 지표면의 변위 위상값을 시간의 다항식에 대하여 모델링하는 것이 좋은 결과를 나타낼 수 있다. 특히 SBAS 알고리즘은 평균속도로부터 계산한 지표변위를 제거한 잔류 위상차(residual phase difference)를 이용하여 unwrapping오차를 최소화한다. 그러므로 식 (14)의 속도벡터를 모델 변수 벡터(\mathbf{p})를 이용하여 다시 표현 할 수 있다(Berardino *et al.*, 2002).

$$\mathbf{v} = \mathbf{M} \cdot \mathbf{p} \quad (19)$$

여기서 \mathbf{M} 의 행성분은 \mathbf{v} 의 벡터성분을 나타내며, 식 (16)에 식 (19)를 대입하면

$$\mathbf{B}\mathbf{M}\mathbf{p} = \Delta\phi \quad (20)$$

과 같이 정의된다.

잔류 위상차를 계산하기 위하여 식 (20)에서 \mathbf{p} 는 평균속도(\bar{v})로 정의하고, 행렬 \mathbf{M} 은 $[1, 1, 1, \dots, 1]^T$ 와 같이 $N \times 1$ 벡터로 정의한다.

평균 속도(\bar{v})는 아래와 같이 계산되어 진다.

$$\bar{v} = \mathbf{p} = [(\mathbf{B}\mathbf{M})^T \cdot (\mathbf{B}\mathbf{M})]^{-1} \cdot [(\mathbf{B}\mathbf{M})^T \cdot \Delta\phi] \quad (21)$$

5) Finite Difference Smoothing

SBAS 알고리즘에 의해서 추출되어진 변위 위상값은 시간에 따른 노이즈 성분을 충분히 smoothing하지 못한다. 이와 같은 노이즈 성분을 제거하기 위하여 시간에 대한 이차미분을 이용한 유한차분법을 이용할 수 있다. 이를 적용하기 위하여 식 (16)을 아래와 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \gamma^2 d^2/dt^2 \end{bmatrix} \cdot \mathbf{v} = \begin{bmatrix} \Delta\phi \\ 0 \end{bmatrix} \quad (22)$$

여기서, γ 는 smoothing을 위한 가중치이다.

식 (17)의 \mathbf{B} 행렬을 (22)의 표현으로 바꾸어보면 아래와 같다.

$$\begin{bmatrix} \mathbf{B} \\ \gamma^2 d^2/dt^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} t_1 - t_0 & 0 & 0 & 0 & \dots \\ t_1 - t_0 & t_2 - t_1 & t_3 - t_2 & 0 & \dots \\ 0 & t_2 - t_1 & t_3 - t_2 & 0 & \dots \\ 0 & 0 & t_3 - t_2 & t_4 - t_3 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ -\gamma & \gamma & 0 & 0 & \dots \\ \gamma^2 & -2\gamma^2 & \gamma^2 & 0 & \dots \\ 0 & \gamma^2 & -2\gamma^2 & \gamma^2 & \dots \\ 0 & 0 & \gamma^2 & -2\gamma^2 & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ \dots & \dots & \dots & \gamma & -\gamma \end{bmatrix} \quad (23)$$

만약 γ 값이 작다면, 변위 위상값은 울퉁불퉁 할 것이고, γ 가 크다면, 변위 위상값이 감소하게 되고 직선에 가까워지기 때문에 최적의 가중치(γ)를 결정하는 것은 매우 중요하다. 일반적으로 cross validation sum of squares (CVSS)를 이용하여 최적의 가중치를 결정한다(Menke, 1989). Fig. 1은 입력 시계열 지표 변위와 CVSS를 통하여 최적의 가중치를 결정한 후 유한차분

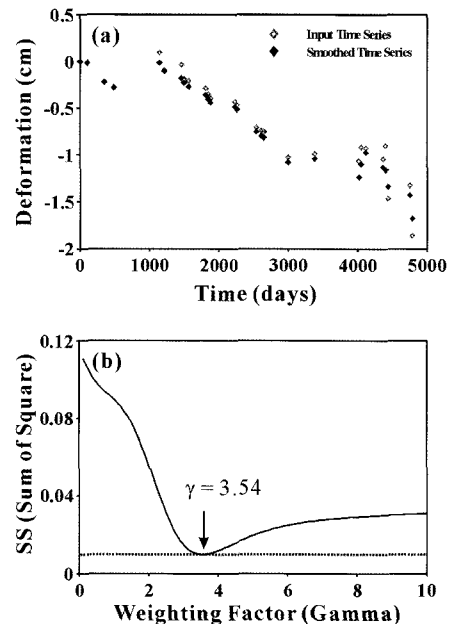


Fig. 1. Examples of (a) the time-series deformation estimated by finite difference approximation and (b) the estimation of weighting factor (γ) using SS (Sum of Square).

근사법에 의해서 smoothing된 시계열 지표 변위를 비교한다.

6) Processing algorithm

식 (2)에 표현된 차분간섭도의 위상차($\Delta\phi_{ij}$)는 식 (24)와 같이 간섭신호(interferometric signal)에 의해서 정의될 수 있다(Berardino *et al.*, 2002).

$$\begin{aligned} \Delta\phi_{ij}(x,r) &= \phi_i(x,r) - \phi_j(x,r) \\ &\approx \frac{4\pi}{\lambda} [d_i(x,r) - d_j(x,r)] + \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp ij} \Delta z}{r \sin\theta} \\ &\quad + [\phi_i^{am}(x,r) - \phi_j^{am}(x,r)] + \Delta n_{ij} \end{aligned} \quad (24)$$

여기서 x 는 azimuth방향으로의 거리를 나타내고, r 은 slant range distance를 나타내며, 식 (24)는 네 가지 위상 성분을 표현한다. 첫 번째 항은 지표면의 변위에 의해서 발생하는 위상을 나타내는 것이고, 두 번째 항은 지형고도 오차(Δz)에 의해서 발생하는 위상 오차를 표현한다. 또한 세 번째 항은 대기의 효과에 의해서 나타나는 위상오차를 표현하며, 마지막 항은 temporal decorrelation과 노이즈의 영향에 의해서 나타나는 위상오차를 의미한다.

제안하는 방법은 Berardino *et al.*(2002)에 의해서 제안된 SBAS 알고리즘에 기초한다. Fig. 2는 제안하는 방법의 흐름도를 보인다. 기존의 SBAS 알고리즘과 달리 unwrapping을 수행한 차분간섭도는 크게 두 개의 세트로 분류된다. 첫 번째 세트는 언래핑 오차를 거의 지니지 않고, 비교적 긴 시간의 차분간섭도로 구성되며,

두 번째 세트는 시계열 지표 변위를 관측할 모든 차분간섭도로 구성된다.

첫 번째 단계에서는 지표 변위의 선형 위상 속도와 고도오차를 추정하는 것이다. 선형 위상과 고도오차를 동시에 추정하기 위하여 식 (20)은 다음과 같이 다시 표현된다(Berardino *et al.*, 2002).

$$[BM, c] p_c = \Delta\phi \quad (25)$$

여기서 $p_c^T = [p^T, \Delta z]$ 이고, 벡터 c 는 아래와 같이 정의된다.

$$c^T = \left[\frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp 1}}{r \sin\theta}, \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp 2}}{r \sin\theta}, \dots, \frac{4\pi}{\lambda} \frac{B_{\perp M}}{r \sin\theta} \right] \quad (26)$$

첫 번째 세트인 unwrapping 오차를 거의 지니지 않는 차분간섭도로부터 식 (25)와 (26)을 이용하여 선형 위상 속도와 고도오차를 결정한다. 결정된 선형 위상 속도는 영상의 각 위치에서의 시계열 지표 변위의 저주파 성분(low pass surface deformation; LP surface deformation)에 해당된다. Fig. 3은 수식 (25)에 의해서 결정된 평균 속도와 고도오차의 예를 보인다.

두 번째 단계에서는 추정된 선형 위상 속도로부터 식 (24)의 첫 번째 항에 해당되는 지표 변위에 의해서 발생하는 위상성분의 저주파 성분을 제거하고, 식 (24)의 두 번째 항에 해당하는 고도오차에 의한 위상오차 성분을 제거한 후 위상을 wrapping하여 잔류 차분간섭도를 계산한다. 구해진 잔류 차분 간섭도는 고도오차에 의한 위상오차성분이 제거되고, 지표 변위의 저주파 성분이 제거되기 때문에 지표 변위의 고주파 성분, 대기오차에 의한 위상 및 노이즈에 의한 위상만이 남게 되며, 아래와 같이 정의될 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta\phi_{ij}(x,r) &\approx \frac{4\pi}{\lambda} [d_i^{HP}(x,r) - d_j^{HP}(x,r)] + \\ &\quad + [\phi_i^{am}(x,r) - \phi_j^{am}(x,r)] + \Delta n_{ij} \end{aligned} \quad (27)$$

여기서 d^{HP} 는 지표 변위의 고주파 성분(high pass surface deformation; HP surface deformation)을 의미한다.

위와 같이 계산된 잔류 차분 간섭도는 변위의 저주파 성분을 지니고 있지 않기 때문에 지표면의 변위성분이 작다. 그러므로 잔류 차분 간섭도를 이용하게 되면 급격한 지표 변위에 의한 phase unwrapping 오차를 최소화할 수 있다.

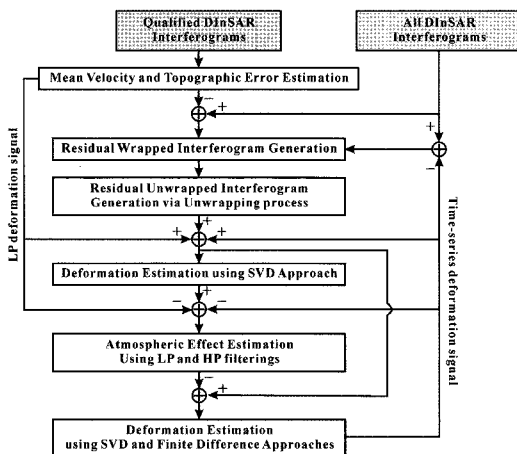


Fig. 2. Block diagram of the improved SBAS algorithm.

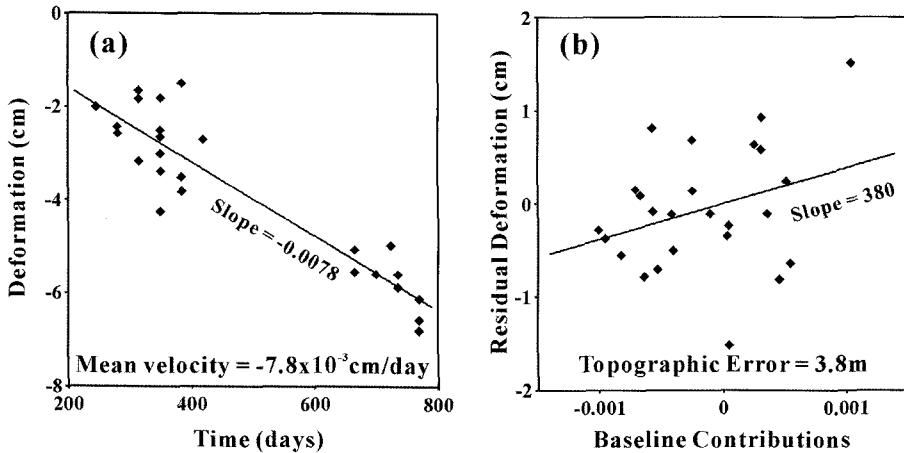


Fig. 3. Estimation of (a) mean velocity and (b) topographic error.

세 번째는 잔류 차분간섭도를 일반적인 phase unwrapping 알고리즘을 이용하여 unwrapping하는 단계이다. unwrapping된 잔류 차분간섭도의 위상의 합으로부터 참조점으로부터 결정된 참조위상을 보정한다. 이러한 보정은 지표변위의 고주파성분(d^{HP})의 공간적인 합이 0가 될 것이라는 가정에 기초한다. 분명 첫 번째 반복에서 이 가정은 정확히 사실이 아니지만, 반복 과정을 거쳐 얻어지는 지표변위의 고주파성분은 노이즈 성분이 될 것이고, 그렇다면 각 잔류 차분 간섭도의 합은 노이즈성분과 대기의 효과성분으로 구성될 것이다. 이러한 이유로 잔류 차분 간섭도의 위상으로부터 참조 위상을 보정하며, 대기의 효과 추출 후 참조위상을 한 번 더 보정한다.

네 번째 단계는 unwrapping된 잔류차분 간섭도를 첫 번째 단계에서 얻어진 변위의 저주파 성분과 더한 후 SVD를 이용하여 시계열 지표 변위를 계산한다. 이 단계에서 계산된 시계열 지표 변위는 고도오차와 unwrapping오차가 최소화되지만, 대기에 의한 영향은 그대로 남아 있다. 이와 같은 대기의 영향을 제거하기 위해서 계산된 시계열 지표변위에서 지표 변위의 저주파 성분을 제거한 후, 공간적으로는 저주파 필터링을 수행하고, 시간적으로는 고주파 필터링을 수행하여 대기성분을 계산한다. 차분 간섭도에서 대기는 공간적으로 넓게 분포하지만, 시간적으로는 랜덤(random)하게 나타나기 때문에 이러한 통계적 특성을 이용하여 대기를 계산하게 된다. 이와 같이 계산된 대기의 효과는 앞서 기술한 바와 같이

공간적인 평균을 통하여 참조위상을 보정한다.

마지막으로 각 차분간섭도에서 대기에 의한 오차를 제거한 후 시간에 따른 오차를 제거하기 위하여 유한 차분 근사법을 이용하여 시계열 지표변위를 측정한다. 그러나 마지막으로 측정된 시계열 지표 변위는 unwrapping 오차를 지닐 수 있기 때문에 변위의 저주파성분을 측정된 시계열 지표변위로 대체하여 두 번째 단계부터 마지막 단계까지 반복하여 최종적으로 시계열 지표변위를 결정한다.

3. 실험 및 결과

본 연구에서는 알라스카 어거스틴(Augustine) 지역의 ERS-1/2자료와 뉴올리언스(New Orleans) 지역의 RADARSAT-1 fine beam (F4) 자료를 이용하여 이 연구에서 제안하는 SBAS 알고리즘을 실험하였다.

ERS-1/2는 1992년 6월 21일부터 2005년 7월 27일까지 얻어진 27개의 자료(트랙 229와 프레임 2403; descending)로 구성된다. 이들 26개의 영상으로부터 수직기선(perpendicular baseline)이 약 350m이내인 25개의 차분 간섭도를 제작하였다. 각 차분간섭도는 range방향으로 2룩(look)을 적용하였고, azimuth방향으로 10룩을 적용하였다. 그래서 차분간섭도의 픽셀크기는 range와 azimuth 방향으로 약 43m×40m였다.

RADARSAT-1은 2005년 2월 5일부터 2007년 2월

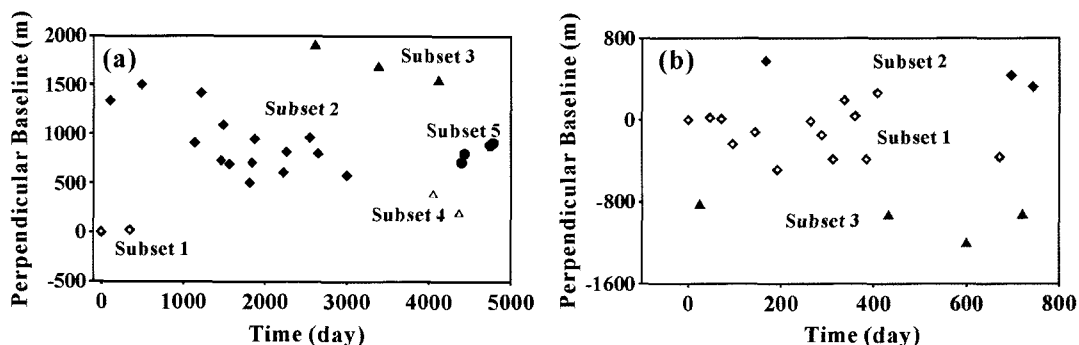


Fig. 4. The number of small baseline subsets of (a) ERS-1/2 and (b) RADARSAT-1 DInSAR interferograms.

Table 1. Perpendicular baseline and phase difference values for DInSAR interferograms of ERS-1/2 images. Phase difference value is the positive in LOS (line-of-sight) uplift, while it is the negative in LOS subsidence. Mean LOS deformation velocities were computed by dividing the sum of phase difference value into the sum of time

DInSAR interferograms		B _⊥ (Subset)	Phase difference values (rad)			
Master	Slave		site1	site2	site3	site4
1992/06/21	1993/06/06	19(1)	-9.35	-5.19	0.03	-3.02
1992/10/04	1993/10/24	157(2)	-7.91	-6.43	0.61	-3.11
1993/10/24	1995/10/17	-83(2)	-11.76	-2.14	-1.76	4.62
1995/08/08	1996/06/19	-179(2)	-7.13	-4.95	0.99	-3.30
1995/08/08	1996/07/24	186(2)	-7.87	-5.53	1.08	-3.42
1995/10/17	1996/07/24	-323(2)	-6.89	-6.54	2.20	-3.63
1996/07/24	1998/09/02	-280(2)	-13.89	-9.14	-1.50	-4.09
1996/10/02	1997/06/04	-192(2)	-4.41	-2.62	-0.78	-0.83
1996/10/02	1997/07/09	16(2)	-5.67	-3.39	0.64	-2.69
1996/10/02	1998/07/29	-83(2)	-10.78	-8.41	-1.14	-3.58
1996/10/02	1998/09/02	123(2)	-12.25	-10.25	-0.19	-5.29
1997/07/09	1998/09/02	107(2)	-6.59	-6.05	-0.94	-2.04
1997/08/13	1998/07/29	-342(2)	-5.49	-3.86	-1.63	-1.18
1997/08/13	1998/09/02	-136(2)	-7.34	-5.37	-0.45	-2.85
1997/08/13	1999/06/09	12(2)	-11.95	-11.30	0.65	-5.79
1998/07/29	2000/09/06	-34(2)	-13.94	-9.34	1.51	-5.81
1998/09/02	2000/09/06	-240(2)	-12.59	-8.55	-0.28	-4.61
1999/08/18	2001/09/26	-216(3)	-16.67	-8.60	0.77	-5.58
1999/09/22	2000/09/06	-226(1)	-6.34	-3.57	0.95	-2.66
2001/09/26	2003/10/01	-140(3)	-13.55	-5.60	0.18	-4.53
2003/06/18	2004/07/07	355(5)	-3.68	-3.21	1.27	-0.80
2003/07/23	2004/06/02	-193(4)	-3.67	-3.73	-1.51	1.22
2004/07/07	2005/06/22	176(5)	-6.11	-4.40	-0.08	-1.38
2004/08/11	2005/06/22	88(5)	-4.16	-3.02	0.56	-0.54
2004/08/11	2005/07/27	108(5)	-3.79	-4.98	0.39	0.69
Mean LOS deformation velocity (rad/yr)			-6.52	-4.46	0.05	-1.96
Mean LOS deformation velocity (mm/yr)			-29.4	-20.1	0.22	-8.82

Table 2. Perpendicular baseline and phase difference values for DInSAR interferograms of RADARSAT-1 images. Phase difference value is the positive in LOS (line-of-sight) uplift, while it is the negative in LOS subsidence. Mean LOS deformation velocities were computed by dividing the sum of phase difference value into the sum of time

DInSAR interferograms		B _⊥ (Subset)	Phase difference values (rad)			
Master	Slave		site1	site2	site3	site4
2005/02/05	2005/03/25	17 (1)	0.23	-0.34	0.49	0.00
2005/02/05	2005/04/18	5 (1)	0.23	-0.34	0.49	0.00
2005/02/05	2005/10/27	-15 (1)	-1.28	-0.31	0.26	1.27
2005/03/01	2006/04/13	-105 (3)	-2.25	-0.44	0.11	-0.21
2005/04/18	2005/05/12	-245 (1)	-1.07	-1.56	-0.61	-2.07
2005/04/18	2005/06/29	-127 (1)	-0.67	-2.58	0.87	0.10
2005/05/12	2005/06/29	118 (1)	0.06	-1.80	0.62	1.14
2005/05/12	2005/08/16	-251 (1)	-0.14	2.52	-0.61	1.45
2005/05/12	2005/11/20	87 (1)	-0.92	0.82	-1.43	1.94
2005/05/12	2005/12/14	-150 (1)	-2.47	-0.15	-2.60	0.83
2005/05/12	2006/01/31	272 (1)	-1.84	-0.16	-1.82	3.66
2005/06/29	2005/10/27	107 (1)	4.61	2.02	-1.45	-0.65
2005/07/23	2007/01/02	138 (2)	-6.34	-4.31	-2.15	-0.90
2005/08/16	2005/12/14	101 (1)	-3.22	-2.68	-0.55	-0.01
2005/10/27	2006/01/31	47 (1)	-2.25	-2.59	-1.62	-0.68
2005/11/20	2006/01/31	184 (1)	-1.59	-1.83	-0.59	-0.39
2005/12/14	2006/02/24	-9 (1)	-0.65	-0.15	-0.34	1.15
2005/12/14	2006/12/09	26 (1)	-2.68	-0.45	0.86	1.03
2006/01/07	2006/01/31	-158 (1)	-0.94	-0.97	-0.87	-0.16
2006/01/07	2006/03/20	71 (1)	1.52	0.21	0.05	1.83
2006/01/31	2006/03/20	229 (1)	2.40	1.00	0.92	1.28
2006/02/24	2006/12/09	35 (1)	-1.66	0.14	0.90	0.52
2006/04/13	2006/09/28	-274 (3)	-3.14	-1.93	-1.02	-0.12
2006/04/13	2007/01/26	11 (3)	-4.68	-1.88	-0.60	0.53
2007/01/02	2007/02/19	-113 (2)	-0.52	-0.31	0.60	-0.49
Mean LOS deformation velocity (rad/yr)			-2.67	-1.65	-0.92	1.01
Mean LOS deformation velocity (mm/yr)			-12.00	-7.41	-4.13	4.53

19일까지 fine beam F5 모드의 21개 (descending) 자료로 구성되며, 이들 영상으로부터 수직기선이 약 300m이내인 25개의 차분간섭도를 제작하였다. 각 차분간섭도는 range와 azimuth방향으로 8룩 8룩을 적용하였고, 그래서 차분간섭도의 픽셀크기는 range와 azimuth 방향으로 약 40m×40m였다.

Fig. 4는 ERS-1/2 자료와 RADARSAT-1 자료를 촬영시간과 수직기선으로 표현한 그래프이다. 이 그림에서 보는 것처럼 ERS-1/2 자료는 5개의 기선 부분집합으로 이루어졌으며, RADARSAT-1 자료는 3개의 기선 부분집합으로 이루어졌다.

개선된 SBAS 알고리즘을 검증하기 위하여 ERS-1/2 자료와 RADARSAT 자료를 사용하여 지표 변위가 발생하는 네 지점을 각각 선택하였다. Table 1은 ERS-1/2 자료에서 네 지점의 각 차분간섭도의 위상차를 보이며, Table 2는 RADARSAT-1 자료에서 네 지점의 위상차를 나타낸다.

4. 결과 및 토의

개선된 SBAS 기법을 검증하기 위하여 알래스카 어저스턴 지역의 ERS-1/2 27개 자료와 뉴올리언즈 지역의 RADARSAT-1 fine beam 21개 자료를 이용하여 각각 25개의 차분 간섭도를 제작하였고, 알래스카 어저스턴 지역의 LOS 지표변위 속도를 고려하여 unwrapping이 잘 안되는 9개의 차분간섭도를 제외한 16개를 양질의 차분간섭도로 선택하였으며, 뉴올리언즈 지역의 차분간섭도에 나타나는 대기 영향을 고려하여 10개의 차분간섭도를 제외하고 15개를 양질의 차분간섭도로 선택하였다. 또한 두 지역의 자료에서 참조점(reference points)은 상대적으로 지표변위가 크지 않다고 알려진 점을 선택하였다.

각각 양질의 차분간섭도로 선택된 16개와 15개의 차분간섭도로부터 초기 선형 LOS 지표변위를 추정하고, DEM(digital elevation model)의 오차를 추정 후, 각각 25개의 모든 차분 간섭도에서 추정된 선형 LOS 지표변위와 DEM의 오차를 제거하여 잔류 차분간섭도를 제작하였으며, 이 잔류 차분간섭도를 unwrapping 한 후 이들의 공간적으로 위상을 합하여 참조점으로부

터 결정된 참조위상을 보정하였고, 초기 선형 LOS 지표변위를 더하여 개선된 차분간섭도를 만들었다. 이들로부터 대기의 효과에 의한 위상을 계산하기 위하여 다시 개선된 차분간섭영상에서 선형 LOS 지표변위에 해당하는 위상을 제거하고 공간적으로 저주파 필터링과 시간적으로 고주파 필터링을 수행하였다. 계산된 각 차분간섭영상의 대기효과에 의한 위상은 개선된 차분간섭영상에서 제거하였고, 유한차분근사법과 SVD를 이용하여 초기 시계열 LOS 지표변위를 관측하였다. 이 시계열의 LOS 지표변위를 개선시키기 위하여 초기 시계열 LOS 지표변위를 이용하여 다시 DEM 오차를 계산하였고 이로부터 잔류 차분간섭도를 제작하였고, 참조위상의 보정을 수행한 후, 대기 효과위상을 다시 계산하였다. 이 과정을 통하여 시계열 LOS 지표변위는 개선되었고, 이와 같은 과정은 시계열 LOS 지표변위의 양이 변화가 없을 때까지 반복되었다.

Fig. 5는 ERS-1/2 영상으로부터 대표적인 지표변위를 보이는 네 지점에서 단순 SVD 방법과 개선된 SBAS 방법에 의해 관측된 시계열의 LOS 지표변위를 비교한다. 이 네 지점에 대한 25개의 차분간섭도의 위상차는 Table 1에 나타내었다. 지점 1은 어저스턴 지역에서 최대 지표변위를 나타내는 곳으로 차분간섭도의 단순 평균으로부터 계산한 평균 변위속도는 -29.4mm/yr이었다. 이 평균 변위속도는 각 차분간섭도가 지나는 대기의 효과, 궤도오차, DEM의 오차 및 노이즈를 포함하지만, 이러한 효과를 완화시키기 위하여 차분간섭도의 위상차를 모두 더하고 각 차분간섭도의 시간간격을 모두 더한 후 위상차의 합을 시간간격의 합으로 나누어 계산하였다. Fig. 5(a)는 지점 1에서의 단순 SVD 방법과 개선된 SBAS 방법에 의하여 관측된 시계열의 LOS 지표변위를 보인다. 단순 SVD 방법에 의하여 관측된 평균 변위속도는 -30.4mm/yr이었고, 개선된 SBAS 방법에 의하여 관측된 평균 변위속도는 -31.6mm/yr이었다. 세 가지 경우의 평균 변위속도는 거의 유사했지만, 시계열의 LOS 지표변위의 측정에 있어 단순 SVD 방법은 SBAS방법에 비해 과소평가되었다. 이러한 이유는 네 번째와 다섯 번째 레이더 영상간의 653일 시간차이가 unwrapping 오차를 발생시키기 때문이었다. 개선된 SBAS 방법은 잔류 차분간섭도를 이용하여 unwrapping 오차를 제거한 반면, 단순 SVD는 그렇지

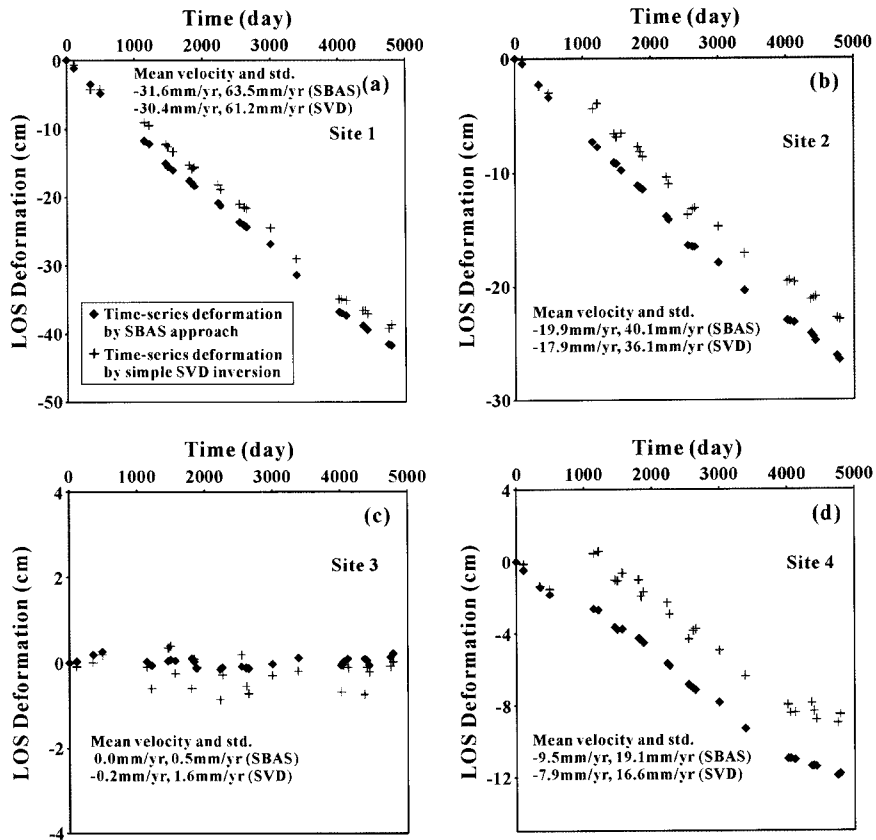


Fig. 5. LOS time-series deformations estimated by the improved SBAS algorithm and simple SVD inversion using ERS-1/2 DInSAR interferograms at (a) site 1, (b) site 2, (c) site 3 and (d) site 4 of table 1. 'std.' denotes standard deviation of time-series LOS deformation.

못했다. 이와 같은 현상은 지점 2와 지점 4에서 동일하게 나타났다(Fig. 5(b)와 (d)). 지점 3에서의 단순 평균 변위속도와 SVD와 SBAS의 평균 변위속도는 각각 0.2mm/yr, -0.2mm/yr과 0.0mm/yr로 거의 유사한 값을 지녔다. 그러나 Fig. 5(c)에서 볼 수 있듯이 SVD와 SBAS의 지표변위에 대한 연간 표준편차는 각각 1.6mm/yr와 0.5mm/yr로 SBAS의 평균 변위속도가 SVD의 평균 변위속도에 비해 노이즈가 완화되어 있음을 알 수 있다.

Fig. 6은 RADARSAT-1 fine beam mode 영상으로부터 대표적인 지표변위를 보이는 네 지점에서 단순 SVD 방법과 개선된 SBAS 방법에 의해 관측된 시계열의 LOS 지표변위를 비교한다. 이 네 지점에 대한 25개의 차분간섭도의 위상차는 Table 2에 나타내었다. 지점 1은 뉴올리언스 지역에서 최대변위를 나타내는 곳으로 단순 평균으로부터 계산한 평균 변위속도는 -12.0mm/

yr이었다. 그러나 SBAS와 SVD방법에 의한 결과는 각각 -16.5mm/yr와 -14.9mm/yr로 다소 큰 차이를 보였다. 이러한 이유는 이 지역이 대기의 영향이 비교적 심한 지역이었기 때문이다. Fig. 6(a)에서 볼 수 있듯이 SBAS와 SVD의 연간 표준편차는 각각 4.9mm/yr와 6.0mm/yr로 차이를 보였다. 이는 SBAS 방법이 대기의 영향에 의한 위상의 변화를 완화시켰기 때문이다. Fig. 6(b)와 (c)는 지점 2에서 4의 단순 평균 변위속도는 각각 -7.4mm/yr, -4.1mm/yr 및 4.5mm/yr였고, SBAS의 평균 변위속도는 각각 -5.9mm/yr, -1.9mm/yr 및 3.3mm/yr였으며, SVD의 평균 변위속도는 각각 -7.2mm/yr, -3.5mm/yr 및 1.8mm/yr였다. 이와 같은 결과는 SBAS 방법이 대기의 영향을 완화시켰음을 지시한다.

이와 같은 결과는 개선된 SBAS 알고리즘이 unwrapping의 오차의 제거, 노이즈의 완화 및 대기효과 완화의 통하여 시계열 지표변위를 관측할 수 있게

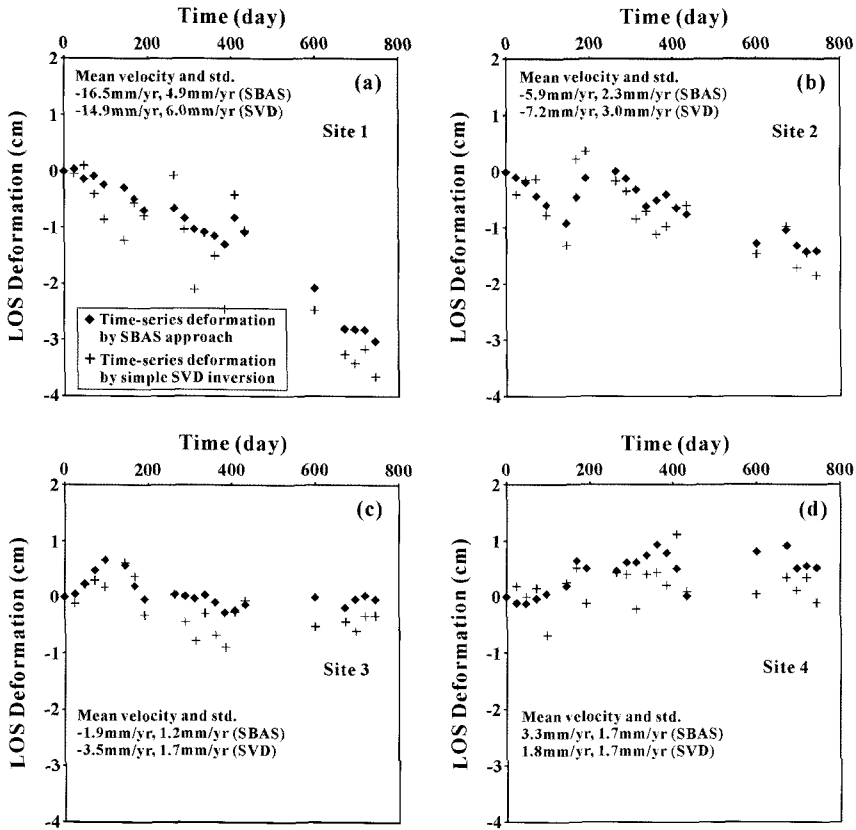


Fig. 6. LOS time-series deformations estimated by the improved SBAS algorithm and simple SVD inversion using RADARSAT-1 DInSAR interferograms at (a) site 1, (b) site 2, (c) site 3 and (d) site 4 of table 2. 'std.' denotes standard deviation of time-series LOS deformation.

한다는 것을 의미한다.

5. 결론

최근 spatial decorrelation을 극복하고 시계열 LOS 지표변위를 관측할 수 있는 small baseline subset (SBAS) 알고리즘이 개발되었다. 그러나 이 알고리즘은 초기 관측시 시계열 지표변위를 선형으로 가정하였기 때문에 각 차분간섭도의 phase unwrapping 오차를 정확히 보정하기 어려웠을 뿐만 아니라 시계열 지표변위의 노이즈 성분을 완화시키지 못했다.

이 연구에서 제안하는 개선된 SBAS 알고리즘은 1) 양질의 차분간섭도만을 이용하여 초기 선형 지표변위와 고도오차를 비교적 정확하게 관측하며, 2) 반복과정을 통하여 시계열 지표변위를 개선하고, 3) 유한차분 근사

법을 이용하여 시계열 지표변위의 노이즈를 완화시키며, 4) 반복적인 참조 위상 보정을 수행하여 보다 정확한 시계열 지표변위를 관측한다.

우리는 알래스카 어거스틴 지역의 ERS-1/2 27개 자료와 뉴올리언스 지역의 RADARSAT-1 fine beam 21개 자료를 이용하여 각각 25개의 차분 간섭도를 제작하였고, 개선된 SBAS 기법을 검증하였다. 그 결과 어거스틴 지역에서의 phase unwrapping 오차에 의해 과소 평가되었던 시계열 지표변위가 보정되었고, 뉴올리언스 지역에서의 대기의 영향에 의해 나타나는 위상의 왜곡이 완화되었다. 이와 같은 결과는 이 연구를 통하여 제안하는 개선된 SBAS 알고리즘이 unwrapping의 오차의 제거, 노이즈의 완화 및 대기효과의 완화를 통하여 비교적 짧은 기선을 지니는 차분 간섭도로부터 정확한 시계열 지표변위를 관측할 수 있게 한다는 것을 의미한다. 제안된 알고리즘은 지표변위가 발생하는 지역에서

시간에 따른 지표변위의 양을 정량적으로 제시하여 그 지역의 메카니즘을 이해하는데 도움을 줄 것이다.

사 사

이 연구는 한국항공우주연구원의 특정연구개발사업인 '다목적 실용위성 5호 시스템 종합개발사업'의 지원을 받았다.

참고문헌

- Amelung, F., D. L. Galloway, J. W. Bell, H. A. Zebker, and R. J. Lacznik, 1999. Sensing the ups and downs of Las Vegas; InSAR reveals structural control of land subsidence and aquifer-system deformation, *Geology*, 27(6): 483-486.
- Amelung, F. S. Jonnson, H. A. Zebker, and P. Segall, 2000. Widespread uplift and 'trapdoor' faulting on Galapagos observed with radar interferometry, *Nature*, 407: 993-996.
- Berardino, P., G. Fornaro, R. Lanari, and E. Sansosti, 2002. A New Algorithm for Surface Deformation Monitoring Based on Small Baseline Differential SAR Interferograms, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 40(11): 2375-2383.
- Casu, F., M. Manzo, and R. Lanari, 2006. A quantitative assessment of the SBAS algorithm performance for surface deformation retrieval from DInSAR data, *Remote Sensing of Environment*, 102: 195-210.
- Dixon, T. H., F. Amelung, A. Ferretti, F. Novali, F. Rocca, R. Dokka, G. Sella, S.-W. Kim, S. Wdowski, and D. Whitman, 2006. Subsidence and flooding in New Orleans, *Nature*, 441: 587-588.
- Ferretti, A., C. Prati, and F. Rocca, 2000. Nonlinear subsidence rate estimation using permanent scatterers in differential SAR interferometry, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 38: 2202-2212.
- Ferretti, A., C. Prati, and F. Rocca, 2001. Permanent Scatterers in SAR interferometry, *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, 39: 8-20.
- Fialko, Y., D. Sandwell, M. Simons, and P. Rosen, 2005. Three dimensional deformation caused by the Bam, Iran, earthquake and the origin of the shallow hlip deficit, *Nature*, 435: 295-299.
- Joughin, I., S. Tulaczyk, M. Fahnestock, and R. Kwok, 1996. A mini-surge on the Ryder Glacier, Greenland, observed via satellite radar interferometry, *Science*, 274: 228-230.
- Jung, H.-C., S.-W. Kim, H.-S. Jung, K.-D. Min, and J.-S. Won, 2007. Satellite observation of coal mining subsidence by persistent scatterer analysis, *Engineering Geology*, 92: 1-13.
- Kim, S.-W., C.-W. Lee, K.-Y. Song, K.-D. Min, J.-S. Won, 2005. Application of L-band differential SAR interferometry to subsidence rate estimation in reclaimed coastal land, *International Journal of Remote Sensing*, 26(7): 1363-1381.
- Lanari, R., F. Casu, M. Manzo, and P. Lundgren, 2007. Application of the SBAS-DInSAR technique to fault creep: A case study of the Hayward fault, California, *Remote Sensing of Environment*, 109: 20-28.
- Lee, C.-W., Z. Lu, O.-I. Kwoun, J.-S. Won, 2008. Deformation of Augustine volcano, Alaska, 1992-2005, measured by ERS and ENVISAT SAR inteferometry, *Earth Planets and Space*, (in press).
- Lyons, S. and D. Sandwell, 2003. Fault creep along the southern San Andreas from interferometric synthetic aperture radar, permanent scatterers,

- and stacking, *Journal of Geophysical Research*, 108(B1): 2047.
- Massonnet, D., M. Rossi, C. Carmona, F. Adragna, G. Peltzer, K. Fiegl, and T. Rabaute, 1993. The displacement field of the Landers earthquake mapped by radar interferometry, *Nature*, 364: 138-142.
- Massonnet, D., P. Briole, and A. Arnaud, 1995. Deflation of Mount Etna monitored by spaceborne radar interferometry, *Nature*, 375: 567-570.
- Menke, W., 1989, *Geophysical data analysis: Discrete inverse theory*, *International geophysics series*, Academic Press, Sandiego, CA, USA.
- Tarchia, D., N. Casaglib, R. Fantib, D. D. Levaa, G. Luzic, A. Pasutod, M. Pieraccinic, 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(1-2): 15-30.
- Tizzani, P., P. Berardino, F. Casu, P. Euillades, M. Manzo, G. P. Ricciardi, G. Zeni, and R. Lanari, 2007. Surface deformation of Long Valley caldera and Mono Basin, California, investigated with the SBAS-InSAR approach, *Remote Sensing of Environment*, 108: 227-289.
- Tizzani, P., P. Berardino, F. Casu, P. Euillades, M. Manzo, G. P. Ricciardi, G. Zeni, and R. Lanari, 2008. Ground deformation of Long Valley caldera and Mono Basin, eastern California, mapped by satellite radar interferometry, *International Journal of Remote Sensing*, 29(2): 439-441.