InSAR 고도계의 높이 및 각도 추정에 대한 모의실험

Simulation Study of Altitude and Angle Estimation with an InSAR Altimeter

백인찬 · 이상일 · 전주환* · 이혁중* · 장종훈**

Inchan Paek · Sangil Lee · Joohwan Chun* · Hyukjung Lee* · Jong Hun Jang**

요 약

본 논문에선 Interferometric Synthetic Aperture Radar(InSAR) 고도계의 측정값인 거리와 도래각(Angle of Arrival: AOA)을 실제 수치 표고 자료(Digital Elevation Model: DEM)상에서 모의실험하여 얻었다. 이 때 거리 측정값을 얻기 위해서 필요한 원시 데이터 및 압축 데이터의 결과도 나타났다. 도래각은 안테나 간의 위상 차이로부터 Deterministic Maximum Likelihood Estimator(DMLE)를 사용하여 구했다. 거리 빈(range bin)의 크기와 펄스 반복 주기(PRI: Pulse Repetition Interval)가 실제 수치 표고 자료의 셀 크기에 비해 작기 때문에 모의실험에 적합하지 않다. 따라서 본 논문에서는 선형 보간법을 이용하여 해상도가 높은 수치 표고 자료를 생성하여 모의실험하였다. 서론 부분에서 InSAR 고도계를 소개하였고, 고도와 각도를 구하는 방법에 대해서 설명하였으며, 모의실험 부분에서 위에 소개된 방법의 성능을 보였다.

Abstract

We present a simulation study of an algorithm for the range and angle of arrival(AOA) estimation with an interferometric synthetic aperture radar(InSAR) altimeter using a real digital elevation model(DEM). We also illustrate a step-by-step procedure of generating raw InSAR data, as well as their range and azimuth compressed data, which is to be used for the subsequent altitude and angle estimation. The AOA is estimated using a deterministic maximum likelihood estimator(DMLE) applied to the first arrived point for each pulse in the compressed data obtained with three antennas. The range bin size and the pulse repetition interval(PRI) are much smaller than the cell size of the DEM used in this study. To make the DEM compatible to the radar parameters, we first generate a higher resolution DEM by linearly interpolating the given DEM. After a brief description of the principle of the InSAR altimeter, the algorithms for altitude and angle estimation are presented, and their performance is assessed through simulation.

Key words: Radar Altimeter, SAR, InSAR, DMLE

I. 서 론

탐재체의 위치를 추정하기 위해서 기존에 사용되는 관성 항법 장치(Inertial Navigation System: INS)는 순간 속도와 가속도를 이용하여 위치를 추정하므로 오차가 계속해

서 축적되는 문제가 있어 추정 결과가 만족스럽지 못하다. 현재 위치를 추정하는 다른 방법으로는 고도계를 이용하는 방법이 있으며, 본 논문에서는 InSAR 고도계를 사용하여 안테나로부터 거리와 도래각을 실제 수치 표고 자료 상에서 측정하는 방법이 있다^{[1]~[4]}. InSAR 고도계

삼성탈레스(Samsung Thales)

*한국과학기술원 전기 및 전자공학과(Department of Electronic Engineering, KAIST)

**국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received March 31, 2014 ; Revised May 22, 2014 ; Accepted July 22, 2014. (ID No. 20140331-032)

· Corresponding Author: Inchan Paek (e-mail: ic.paek@samsung.com)

를 사용하는 이유를 설명하기 앞서 SAR 고도계가 등장한 배경은 다음과 같다. 일반적인 고도계의 신호처리로부터 얻은 측정값은 가장 가까운 한 지점에 대한 정보만 담겨 있는 고도계에서 가장 가까운 지점(leading edge)의 시각이다. 그러므로 레이더의 펄스(pulse) 폭 혹은 빔(beam) 폭이 좁지 않고, 고도계가 산지 혹은 고층 건물이 즐비한 도시 지형에 사용된다면 빔의 foot 프린트가 탑재체의 수직 방향 아래의 넓은 원을 포함하게 된다. 결과적으로, 가장 처음에 돌아온 반사파의 시각이 탑재체 바로 아래의 지점에 대한 거리를 의미하지 않게 된다.

이와 같은 문제점을 해결하기 위해서는 빔 foot 프린트를 줄이면 되는데, 빔 foot 프린트를 줄이기 위한 방법 중 하나는 SAR의 각(azimuth) 압축 기법^{[10],[13]}을 사용하는 것이다. 이 기법을 통해 탑재체 이동 방향(along-track)의 해상도 셀(cell) 크기를 $\Delta x = \frac{h\lambda}{2X}$ 로 줄일 수 있다. 여기서 h , λ , X 는 각각 탑재체의 고도, 파장, coherent 적분 길이를 나타낸다. 지연-도플러 고도계(Delay-Doppler altimeter: DDA)^{[5],[6]}는 SAR 각 압축을 하는데 있어 noncoherent 방식을 사용하므로 계산량이 매우 적지만, 해상도는 coherent 방식에 비하여 떨어진다. 하지만 위성 SAR의 경우처럼 높이 h 가 아주 크다면 해상도가 coherent SAR 방식에 접근한다. SAR 방식은 기존의 레이더와는 달리 안테나가 진행하면서 펄스를 여러 번 쏘고 받아 축적한 데이터를 처리하여 2D 이미지를 얻는 것을 말한다.

그러나 SAR 기술로는 탑재체 이동방향에 수직방향(cross-track)의 해상도는 개선되지 않는다. Jensen^[7]이 처음 돌아오는 반사파의 도래각을 구하기 위해 여러 개의 안테나를 cross-track 방향으로 놓고, InSAR를 사용하는 것을 제안했다. 고도계가 지형 대조 항법(Terrain-Aided Navigation: TAN)^[9]을 위하여 사용된다면 도래각과 같은 정보가 아주 유용하게 된다. 하지만 InSAR 기술은 반사파 신호가 넓은 각도(angular) 분포 또는 동일한 거리 빈(range bin)에서 두 개 이상의 도래각을 가지면 정확한 도래각의 측정값을 제공하지 않는다는 단점이 있다.

그림 1은 pulse-limited 해상도 셀(어두운 원), 각압축 이후 도플러 pulse-limited 해상도 셀(원 안의 막대형 직사각형), InSAR가 도래각을 반사할 대지 spot(검은색 사각형)

그림 1. 일반적인 레이더 고도계와 SAR 고도계의 footprint 비교

Fig. 1. Comparison of a conventional radar altimeter's footprint to SAR altimeter's footprint.

을 나타낸다. 회색이 일반적인 고도계의 해상도를 결정하는 영역, 갈색이 SAR 고도계의 해상도를 결정하는 영역에 해당한다.

그림 1에서 검은 사각형으로 표시된 부분에 레이더 신호가 가장 먼저 도착할 것이다. 그러나, 돌아오는 반사파 신호는 보통 노이즈와 클러터에 묻혀있기 때문에 고도계에서 가장 가까운 지점의 시각을 결정하는 것은 매우 어려운 일이다. 신호 대 클러터 잡음비(Signal to Clutter Noise Ratio: SCNR)와는 별개로, 고도계가 단독(stand-alone) 기기로 사용될 때 고도계에서 가장 가까운 지점의 시각을 결정하기 위해 필요한 추가적인 정보는 지형의 높이 프로파일의 연속성을 가정하는 것이다.

레이더 고도계가 중요하게 사용되는 사례^[9] 중 하나는 디지털 지형 고도 자료(Digital Terrain Elevation Data: DTED)를 가지는 탑재체의 지형 대조 항법 장치이다. 디지털 지형 고도 자료는 관성항법장치를 보강하기 위해 실시간으로 고도계의 측정값과 비교된다. 만약 레이더 고도계가 지형 대조 항법을 위해 사용된다면 탑재된 디지털 지형 고도 자료로부터 고도계에서 가장 가까운 지점의 시각 결정 과정을 포함하는 몇 가지 신호처리 단계가 도움을 받을 수 있다. 더불어 수직 방향의 거리 측정값의 엄격한 요구사항이 완화될 수 있다. 그러므로 고도계가 지형 대

조 항법을 위해 사용된다면 고도계의 신호처리 부분과 함께 항법 데이터 처리 부분을 함께 설계하는 것이 중요하다.

단원 II에서는 InSAR 고도계의 모의실험 원시 데이터 합성 방법을 설명하였고, 단원 III에서는 각방향으로의 각 압축 방법을, 단원 IV에서는 도래각의 추정 방법을 설명하였다. 또한 단원 V에서 제시한 표적의 반사율 계산방법을 반영하여 단원 VI에서 수치 표고 자료를 이용한 모의실험 결과를 나타내었다. 마지막으로 본 논문의 결론을 서술하였다.

II. InSAR 고도계 모의실험 원시 데이터합성

InSAR 고도계의 거리 측정값은 SAR 원시 데이터를 얻는 데에서부터 출발한다. InSAR 고도계는 일반적인 SAR와는 달리 side-looking이 아닌 nadir looking geometry을 사용한다.

그림 2는 InSAR 고도계의 nadir looking geometry를 나타낸다. 비행체는 점 O에 있고, 속도 벡터 v 방향을 양의 x 방향으로 놓고, 속도 벡터에 수직인 지면 방향은 양의 z 방향으로 하며, y 방향은 positive coordinate system이 되도록 정한다. 그러므로 레이더는 x 축 방향으로 진행하면서 직하방 방향으로 일정한 빔폭을 가지고 정해진 Pulse Repetition Frequency(PRF)로 펄스를 쏘고 받으면서 측정

그림 2. InSAR 고도계의 nadir looking geometry
Fig. 2. Nadir looking geometry in InSAR altimeter.

해 나간 데이터를 SAR 원시 데이터라고 한다. 펄스를 쏘고 받는 데에 시간 차이가 생기는데, 거리와 시간 차이가 비례하므로 펄스를 쏜 위치에서 가장 먼저 돌아온 시간을 측정(leading edge detection)하여 가장 가까운 점까지의 거리를 알 수 있다. 그림 2를 통해 탑재체 이동 방향의 빔폭이 크면 레이더 위치의 고도를 정확히 알기 어려우므로 빔폭이 좁아야 함을 알 수 있다. 각압축(탑재체 이동 방향 압축)이 바로 그런 역할을 하게 되는데, 압축을 하면 탑재체 이동 방향의 빔폭이 좁아지는 효과가 나타난다. 압축은 각각 matched 필터를 이용하여 수행하였다.

수치 표고 자료 위로 고도계가 직선상으로 움직일 때 형성되는 측정값은 빔폭 안에 해당하는 모든 표적으로부터 반사된 신호의 합으로 생성된다. 따라서 모의실험 시에 빔폭 안에 포함되는 표적들에 대하여 반사파가 계산되어야 한다. 이제 $p = [x_k, y_k, z_k]^T$ 가 점반사체를 나타낸다고 하자. 이 때 점반사체, p 가 빔의 안쪽에 존재하는지 다음의 부등식을 통해 알 수 있다.

$$\left(\frac{x_k}{b}\right)^2 + \left(\frac{y_k}{a'}\right)^2 \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} \begin{matrix} out \\ in \end{matrix} \quad (1)$$

이 때, 삼각형의 닮음에 의해 비례식 $z_k : h = a' : a$ 와 $z_k : h = b' : b$ 이 성립하므로 식 (1)을 다음과 같이 a, b, z_k 로 표현이 가능하다.

$$\left(\frac{x_k}{b}\right)^2 + \left(\frac{y_k}{a}\right)^2 \begin{matrix} > \\ < \end{matrix} \left(\frac{z_k}{h}\right)^2, \quad in \quad (2)$$

여기서 h 는 탑재체의 고도이고, $a = h\theta_c/2$, $b = h\theta_a/2$ 이며, θ_c, θ_a 는 각각 비행 횡축 방향과 탑재체 이동 방향의 빔폭을 나타낸다. 식 (2)는 간략화된 안테나 빔 패턴을 나타내며, 원시 데이터를 합성할 때 필요하다.

받은 신호를 거리 압축을 하면 거리 측정값을 얻을 수 있으며, 이 때 얻은 거리가 빔이 포함하는 모든 산란점들 중 고도계에서 가장 가까운 지점에 해당하는 거리이기 때문에 레이더 바로 아래의 지점까지의 거리를 의미하지 않음을 알 수 있다.

III. 각 압축

지형 대조 항법을 하기 위한 InSAR 고도계의 각압축은 일반적인 SAR와는 달리 causal 각압축이 필요하다.

그림 3(a)는 SAR 고도계의 coherent 적분 시간(integration time) 길이를 나타낸다. 양의 z 방향은 지표면을 향하고 있고, 양의 y 방향은 종이면을 뚫고 나오는 방향이다. 빔폭 span의 양쪽 side를 모두 사용하지 못하는 이유는 점 p 의 각압축 이미지가 causal하게 얻어질 수 있게 하기 위하여 탑재체가 그 점을 지나기 전에 얻을 수 있게 함을

그림 3. (a) Coherent 적분 시간 길이, (b) Causal 각압축 matched filter의 임펄스 응답

Fig. 3. (a) Coherent integration time interval, (b) Impulse response for causal azimuth compression matched filter.

의미한다. 그러므로, 탑재체가 점 표적을 지난 후에는 빔이 그 점을 비추고 있다고 하더라도 적분에는 포함되지 않는다.

또한, 연산 능력과 혹은 긴 펄스열의 coherency가 부족하다는 한계점 때문에 일반적으로 빔폭이 허락하는 것보다 훨씬 짧은 적분 시간 길이를 사용한다. 해당하는 각압축 matched 필터의 임펄스 응답이 그림 3(b)에 나타나 있다. x 축은 azimuth bin의 수를 의미하고, y 축은 실수 값을 의미한다. 비행체가 시간 t_1 에 P 점으로의 도플러 주파수가 최대가 되고, t_2 에 주파수가 0이 된다. 그러므로 이와 같은 도플러 신호에 matched 되는 임펄스 응답은 그림 3(a)에 보인 바와 같이 time-reverse 된 파형이어야 한다. 즉, 그림 3(b)는 matched 필터의 임펄스 응답이다. 이와 같이 각압축을 하면 탑재체 이동 방향의 해상도를 높여 빔폭이 좁게 느껴지는 효과를 얻을 수 있다.

거리압축 이후에 각압축이 수행되며, side-looking을 사용하는 일반적인 SAR와는 달리 nadir-looking을 사용하기 때문에 비행 횡축 방향에서 레이더를 기준으로 (+)방향에 있는 표적으로부터 반사된 것인지, (-)방향의 표적으로부터 반사된 것인지 구분할 수 없다. 따라서 압축 결과는 일반적인 SAR에서처럼 2D 이미지가 생성되지 않는다.

IV. InSAR 고도계의 각도 측정

도래각 θ 는 반 파장만큼 거리를 둔 두 개의 안테나로부터 얻을 수 있다. 그러나, 배열 안테나로 얻을 수 있는 해상도는 구경(aperture)의 크기 또는 배열안테나의 경우, 배열의 길이에 의하여 결정된다. 하지만 두 개의 안테나를 멀리 떨어뜨려 놓으면 모호성(ambiguity)이 생기므로 세 개의 안테나를 사용하여 두 개의 baseline을 얻어서 긴 baseline은 해상도를 높이는 역할을 하고, 짧은 baseline은 모호성을 없애는 역할을 하게 한다^{[8],[12],[15]}.

그림 4는 InSAR 고도계의 구조를 진행방향에서 나타낸 것이고, 진행방향은 지면을 뚫고 들어가는 방향이다. 세 개의 안테나가 y_1, y_2, y_3 에 위치해 있으며, 사이의 거리는 각각 d_L 과 d_R 로 나타내었다. $d_L = m_L \frac{\lambda}{2}$ 이라 하고,

그림 4. InSAR 고도계 안테나의 배치를 진행방향에서 본 그림

Fig. 4. Positioning of the InSAR altimeter antennas viewed from the along-track direction.

$d_R = m_R \frac{\lambda}{2}$ 라고 하자. 이 때 도래각의 모호성을 피하기 위해서는 m_L 과 m_R 은 항상 서로 소여야 한다. 또한 좌우의 안테나는 수신만하고, 가운데의 안테나는 송수신 모두 동작하는 것으로 가정한다.

$d_L + d_R$ 는 h 에 비해 무시할 만큼 작기 때문에 점반사체 y_k 로부터 돌아오는 반사파는 평면파로 간주된다. 이 때 어레이 응답 벡터는 $\mathbf{a} = \begin{bmatrix} e^{-jkd_L \sin \theta} \\ 1 \\ e^{jkd_R \sin \theta} \end{bmatrix}$ 와 같다. 이 응답 벡터를 이용하여 신호의 세기를 b 라고 가정할 때 안테나의 측정값은 다음과 같다.

$$\mathbf{z} = \begin{bmatrix} z_1 \\ z_2 \\ z_3 \end{bmatrix} = b\mathbf{a} + \mathbf{n} = b \begin{bmatrix} e^{-jkd_L \sin \theta} \\ 1 \\ e^{jkd_R \sin \theta} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ n_3 \end{bmatrix}, \quad (3)$$

여기서 b 는 신호의 세기이며, 노이즈는 평균이 0이고, 공분산이 $\sigma_n^2 \mathbf{I}$ 인 complex Gaussian이다. n 회 측정했을 경우에 최대화해야 하는 likelihood 함수는 다음과 같다^[16].

$$p(\mathbf{z}_n) = \frac{1}{\pi^3 \det(\sigma_n^2 \mathbf{I})} \exp[-(\mathbf{z}_n - b\mathbf{a})^H (\mathbf{z}_n - b\mathbf{a}) / \sigma_n^2] \quad (4)$$

안테나에서 측정된 N 회의 신호 측정값들의 노이즈 사이에는 correlation이 없으므로 $p(\mathbf{z}) = \prod_{n=1}^N p(\mathbf{z}_n)$ 와 같이 나타낼 수 있고, 결국 $\sum_{n=1}^N (\mathbf{z}_n - b\mathbf{a})^H (\mathbf{z}_n - b\mathbf{a})$ 를 최소화하면 됨을 알 수 있다. 이때 추정하고자 하는 변수는 b 에는 포함되어 있지 않기 때문에 b 의 값을 고정할 필요가 있다. 이와 같은 파라미터를 nuisance 파라미터라고 하며, 일반화된 likelihood 함수를 구하기 위하여 likelihood를 최소로 하는 정류점을 구하면 $b = (\mathbf{a}^H \mathbf{a})^{-1} \mathbf{a}^H \mathbf{z}_n$ 임을 알 수 있다. 이를 앞서 구한 likelihood에 대입하여 일반화된 likelihood 함수를 구하면 다음과 같다.

$$\sum_{n=1}^N [(I - P_a) \mathbf{z}_n]^H [(I - P_a) \mathbf{z}_n], \quad (5)$$

여기서 P_a 는 $\mathbf{a}(\mathbf{a}^H \mathbf{a})^{-1} \mathbf{a}^H$ 이다. 식 (5)를 최소화하기 위해서는 $\sum_{n=1}^N (P_a \mathbf{z}_n)^H (P_a \mathbf{z}_n)$ 를 최대화해야 한다. 이를 전개하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \sum_{n=1}^N \mathbf{z}_n^H P_a^H P_a \mathbf{z}_n &= \sum_{n=1}^N \mathbf{z}_n^H P_a \mathbf{z}_n \\ &= \text{tr} \left[P_a \sum_{n=1}^N \mathbf{z}_n \mathbf{z}_n^H \right], \\ &= N \text{tr} [P_a \hat{R}_z] \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 $\text{tr}[\cdot]$ 는 trace를 나타내며, $\hat{R}_z = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N \mathbf{z}_n \mathbf{z}_n^H$ 이다. 결과적으로 최대화해야 하는 likelihood 함수는 $L(\theta) = \text{tr}[P_a(\theta) \hat{R}_z]$ 이다.

이제 지표면 최근점 p 까지의 각도 θ 및 거리 r 를 알면 비행체의 고도 h 정보로부터 p 점의 고도를 다음식 $h - r \cos \theta$ 으로부터 얻을 수 있다.

V. 지표면의 반사율

각각의 격자점으로부터 평균 반사파 신호세기, σ_c 를 계산하기 위해 다음의 간소화된 클러터 단면적 모델을 사용할 것이다.

$$\sigma_c = A_c \sigma^0, \quad (7)$$

그림 5. 격자점, p 의 grazing angle(ψ) geometry
Fig. 5. Grazing angle(ψ) geometry of a grid point, p .

여기서 A_c 는 레이더 해상도 셀 안의 표면적이고, σ^0 는 표면 클러터 평균 반사율(혹은 surface backscatter coefficient)을 의미하는 상수이다. 이는 다음과 같이 모델링된다.

$$\sigma^0 = \gamma \sin \psi, \quad (8)$$

여기서 γ 는 표면 타입에 따라 달라지는 정규화(normalize)된 반사율이고, ψ 는 지표각이다. 모의실험에서 파라미터 A_c 와 ψ 의 계산 방법은 그림 5을 사용해서 설명된다.

점 p (그림 5에서 중앙그리드 점)에서의 지표각 ψ 를 구할 것임이 가정하자. 먼저 선택한 격자점 주변의 가장 가까운 이웃 격자점 네 개를 선택하고, 마주 보는 격자점의 쌍을 연결하는 단위벡터 $\mathbf{u}_1$ 과 $\mathbf{u}_2$ 를 얻는다. 두 개의 벡터가 형성하는 평면을 고려하면 벡터 $\mathbf{u}_3 = \mathbf{u}_1 \times \mathbf{u}_2$ 는 그 평면에 수직할 것이다. $\mathbf{u}_4$ 를 점 p 로부터 탑재체를 향하는 단위벡터라고 하자. $\mathbf{u}_3$ 와 $\mathbf{u}_4$ 가 이루는 각이 지표각임을 알 수 있다. 그러므로,

$$\psi = \cos^{-1}(\mathbf{u}_3 \cdot \mathbf{u}_4) \quad (9)$$

표면적 A_c 는 근사적으로 다음과 같이 계산된다.

$$A_c = \frac{S}{\cos^{-1}(\mathbf{u}_3 \cdot (-\hat{\mathbf{z}}))}, \quad (10)$$

여기서 S 는 planar grid 영역을 의미한다.

표면 클러터 평균 반사율의 분포는 다음의 Weibull-

distribution^[14]을 따른다.

$$p(w) = \begin{cases} \left(\frac{\eta}{\nu}\right) \left(\frac{w}{\nu}\right)^{\eta-1} e^{-\left(\frac{w}{\nu}\right)^\eta} & : w \geq 0 \\ 0 & : otherwise \end{cases}, \quad (11)$$

여기서 η 는 shaping 파라미터이고, ν 는 scale 파라미터이다. Expectation $E(w) = \nu \Gamma\left(\frac{1}{\eta} + 1\right)$ 이므로 다음을 보일 수 있다.

$$\nu = \frac{\sigma^0}{\Gamma\left(\frac{1}{\eta} + 1\right)} \quad (12)$$

육지 표면에서는 η 가 실험적으로 다음과 같이 알려져 있다^[17].

$$\frac{1}{\eta} = 6.74 - 0.8 \log_{10} A_c \quad (13)$$

모의실험을 위하여는 파라미터가 (η, ν) 인 Weibull - distributed random 샘플, 즉 식 (11)의 분포를 갖는 w 을 얻어야 한다. 본 논문에서는 쉽게 얻을 수 있는 uniform random 샘플 $u \in [0, 1]$ 로부터 다음의 함수 계산 $w = f(u)$ 를 이용하여 얻고자 한다.

$$w = \nu \cdot (-\ln u)^{1/\eta} \quad (14)$$

위의 식 (14)가 원하는 Weibull - distributed random 샘플을 줌은 function of random variable의 관계식을 사용하여 쉽게 확인할 수 있다.

요약하자면, 식 (9)와 (10)으로부터 각각 ψ 와 A_c 를 얻고, 식 (8)으로부터 σ^0 를, 식 (13)으로부터 η 를, 식 (12)로부터 ν 를 계산한 다음 식 (14)를 사용하면 random 샘플 w 를 생성할 수 있으며, 식 (7)에서 random한 σ_c 를 얻기 위해 w 를 A_c 에 곱한다. 주어진 디지털 지형 고도 자료에서 모든 격자점들로부터 add-up contribution를 하기 위해 Ray optics^[11]가 사용될 것이다.

VI. 모의실험 결과

고도계를 통해 얻어진 데이터의 거리 빈(range bin)의 크기와 펄스 반복 주기는 실제 수치 표고 자료 데이터의

그림 6. (a) 보간 수행 전의 수치표고자료(90 m×90 m 그리드), (b) 보간 수행 후의 수치표고자료(30 m×5 m 그리드)

Fig. 6. (a) DEM before interpolation(90 m×90 m grid), (b) DEM after interpolation(30 m×5 m grid).

셀 크기에 비해 작기 때문에 모의실험에 적합하지 않다. 따라서 격자 크기가 90 m×90 m인 실제 수치 표고 자료^[18] 데이터(그림 6(a)) 중 검은색 박스로 표시한 부분만 선형 보간(linear interpolation)을 통해 그림 6(b)에 보인 30 m×5 m(비행 횡축 방향×탐재체 이동 방향)인 고해상도 수치표고 자료를 생성하였다. 정확한 원시 데이터를 얻으려면 더욱 촘촘한 grid가 필요하나, 원시 데이터 합성에 매우 오랜 시간이 걸리므로 높은 PRF에 적합하도록 탐재체 이동 방향은 비교적 높은 해상도를 주고, 덜 중요한 비행 횡축 방향은 낮은 해상도를 주었다.

그림 7의 contour plot에서 파란색 선은 $y=0$ 인 직선을 따라 탐재체가 날아갈 때 가장 가까운 지점들의 궤적을 의미하고, 빨간색 지점들은 수치 표고 자료에서 동일한 along track에서 가장 높은 지점의 궤적을 의미한다. 가장 높은 곳과 가장 가까운 곳은 다름을 알 수 있으며, 고도계에서 가장 가까운 지점 측정에서는 가장 가까운 지점의

그림 7. 실제 수치 표고 자료의 contour plot
Fig. 7. The real DEM's contour plot.

표 1. 모의실험 파라미터

Table 1. Simulation parameter.

파라미터	값
주파수	Ku band
빔폭	20° cross track, 10° along track
PRI	150 usec

거리를 측정값으로 삼게 된다.

그림 8는 위의 실제 수치 표고 자료에서 $x=1,112$ m에서 시작하여 $y=0$ 인 직선을 따라 탐재체가 날아갈 때 왼쪽 안테나로부터 생성된 원시 데이터, 거리압축 데이터, 각압축 데이터를 나타낸다. 레이다 고도계의 파라미터들은 표 1과 같다.

점포적 모의실험결과에 의한 해상도는 이론적 해상도보다 두 배 정도 나쁜 것을 확인할 수 있었다.

그림 9는 그림 8(c)의 거리, 각 압축 데이터의 시작점부터 $x=20$ m 이동한 지점에서 반사파 프로파일을 나타낸다.

그림 9에서 가장 먼저 peak가 뜨는 지점인 약 370 m 높이를 가진 지점으로부터 탐재체까지의 거리가 측정값으로 쓰이며, 그로부터 특정 탐재체 이동 방향 지점에서의 탐재체 바로 아래 지점의 지형의 높이를 구하게 된다. Peak가 뜨는 지점을 검출하기 위해서는 기준이 필요한데, 노이즈를 고려하여 정규화된 SAR 데이터에서 문턱 값을 0.03으로 하여 고도계에서 가장 가까운 지점을 검출하였

그림 8. (a) 그림 6(b)의 수치 표고 자료를 통해 얻은 왼쪽안테나의 원시 데이터, (b), 거리 압축 데이터, (c) 거리, 각압축 데이터

Fig. 8. (a) Raw data received from the left antenna using the DEM in Fig. 6(b), (b) Range compression data. (c) Range, azimuth compression data.

다. 이와 같은 방법으로 각각의 탑재체 이동 방향 지점에서의 거리를 통해 지형의 높이 및 도래각을 구하면 그림 10(a) 및 10(b)와 같다.

그림 10(a)와 10(b)에서 max noise-level height는 SAR 데이터로부터 얻은 측정값을 통해 계산한 지형의 높이이고, Tracked height는 그것을 smoothing 필터를 통과시켜 얻은 높이이다. Height of the highest point는 탑재체의 탑재체 이동 방향 위치에 따라 수치 표고 자료의 데이터로부터 가장 높은 지점의 높이를 의미하며, height of the closest point는 탑재체와 수치 표고 자료의 데이터로부터 가장 가까운 위치의 높이를 의미한다. 즉, 실제 탑재체 이동 방향에 해당하는 지형의 높이로, 참값을 의미한다. 마찬가지로 그림 10(b)에는 각도 측정값을 탑재체 이동 방향에

그림 9. 그림 8(c)에서 $x = 20$ m 이동한 지점에서의 반사파 profile

Fig. 9. The echo profile when the vehicle has flown to $x = 20$ m in Fig. 8(c).

따라 나타났다. 가장 높은 지점의 각도와 가까운 지점의 각도가 다른 것을 통해 고도계에서 가장 가까운 지점의 거리를 측정값으로 하는 것을 재확인할 수 있다.

Smoothing 필터에서 쓰인 방식은 moving-average로, 입력 값들을 설정한 window 사이즈 개수만큼 더하고, window 사이즈 크기만큼 나누는 방식을 말한다. 예를 들어, window 사이즈가 3이고, 필터의 입력 값이 3, 6, 9, 12라면 필터의 출력 값은 1, 3, 6, 9, 7, 4으로 smoothing된다. 필터를 통과한 다음의 값은 원래의 값보다 [window 사이즈 - 1]만큼 길어지기 때문에 원래의 값의 길이 4를 맞춰주기 위해서中间的 3, 6, 9, 7를 값을 사용하였다. Window 사이즈의 값을 작게 하면 변화 추이에 더욱 민감하게 결과가 나타나며, window 사이즈의 값을 크게 할수록 변화 추이에 둔감하여 값의 변화가 더 적게 나타나게 된다.

Ⅶ. 결 론

본 논문에서는 InSAR 고도계의 측정값인 레인지와 도래각을 실제 수치 표고 자료 상에서 모의실험하였다. 사용된 실제 수치 표고 자료의 데이터는 선형 보간법을 이용하여 격자 크기를 작게 하여 촘촘한 수치 표고 자료를 이용하여 모의실험하였으며, 점 표적 각각의 반사율은 Weibull - distribution을 통해 구하였다. 얻어진 거리와 도

그림 10. (a) 탑재체 진행방향 위치 vs. height(거리측정값) 추정치, (b) 탑재체 진행방향 위치 vs. angle 추정치

Fig. 10. Platform position(along track) vs. height(range measurement) estimation, (b) Platform position(along track) vs. angle estimation.

래각 측정값은 InSAR 고도계가 지형 대조 항법과 같은 용도로 쓰일 때 유용하다. 본 논문이 기여한 바는 조악하나 원시 데이터를 생성하여서 InSAR 고도계의 기본 알고리즘들을 모의실험을 통하여 검증하여 본 점에 있다. 문제점으로는 거리 및 각도 추정에서 fluctuation이 매우 커서 smoothing 필터를 사용해야만 한다는 점이다. 이 문제가 생성한 원시 데이터의 불완전함 때문일 수 있는

데, 추후 실제 데이터를 이용할 수 있으면 알고리즘의 최적화가 가능할 것이다. 또한 높이 값을 검출하기 위해 사용된 문턱 값을 설정하는 알고리즘에 대한 추가적인 연구가 필요하다.

References

- [1] 이동택, 정형섭, 윤근원, 김두라, 선웅 "IRA (Interferometric Radar Altimeter)를 이용한 정밀 3차원 좌표 추출" KSAS 학술대회.
- [2] 이동택, 정형섭, 윤근원, "정밀 3차원 지상좌표 추출을 위한 IRA의 효율적인 신호처리 기법", *Korean Journal of Remote Sensing*, vol. 27, no. 5, pp. 507-520, 2011.
- [3] 정승환, 윤주홍, 박민규, 김대영, 성창기, 김현석, 김윤희, 광희준, 선웅, 윤국진, "간섭계 레이더 고도계를 활용한 지형참조항법의 성능 분석", *한국항공우주학회지*, 40(4), pp. 285-291, 2012년.
- [4] 이선민, 유영민, 이원희, 이달호, 박찬국, "기울기 프로파일을 이용한 일괄처리 방식 지형참조항법의 성능 개선", *Journal of Institute of Control, Robotics and Systems*, vol. 18, no. 4, pp. 384-390, 2012년.
- [5] R. Raney, "The Delay/Doppler radar altimeter", *IEEE Trans. on Geosci. and Remote Sensing*, vol. 36, no. 5, pp. 1578-1588, Sep. 1998.
- [6] R. Raney, J. Jensen, "An airborne CryoSat prototype: The D2P radar altimeter", *Proceedings of the International Geoscience and Remote Sensing Symposium, Toronto*, pp. 1765-1767, 2002.
- [7] J. Jensen, "Angle measurement with a phase monopulse radar altimeter", *IEEE Trans. on Antennas Propagat.*, vol. 47, no. 4, pp. 715-724, 1999.
- [8] J. Hager, "Interferometric synthetic aperture radar altimeter", Assignee: Honeywell Inc., US Patent 6,025,800, Feb. 2000.
- [9] S. Carreno, P. Wilson, P. Ridao, and Y. Petillot, "A survey on terrain based navigation for auvs", *MTS/IEEE OCEANS*, Seattle, 2010.
- [10] A. Meta, P. Hoogeboom, and L. Lighart, "Signal pro-

cessing for FMCW SAR", *IEEE Trans on Geosci and Remote Sensing*, vol. 45, no. 11, pp. 3519-3532, Nov. 2007.

- [11] Sung-Sik Kim, Kwanghoon Sohn, Vladimir Savaljev, Eugene F Pen, Jung-Young Son, and Joohwan Chun, "Optical design and analysis for super multiview three-dimensional imaging system", *Proc. SPIE* 4297, pp. 222-226, 2001.
- [12] S. Kay, *Fundamentals of Statistical Signal Processing - Estimation Theory*, Prentice Hall, Upper Saddle River, New Jersey, 1993.
- [13] J. Curlander, R. McDonough, *Synthetic Aperture Radar, Systems and Signal Processing*, John Wiley, New York,

1991.

- [14] D. Barton, *Radar System Analysis and Modeling*, Artech House, Boston, 2005.
- [15] H. Jenkins, *Small-Aperture Radio Direction Finding*, Artech House, Boston, 1991.
- [16] Steven Kay, *Fundamentals of Statistical Signal Processing*, vol. I, Estimation Theory, Prentice Hall, 1993.
- [17] Bassem R. Mahafza, *Radar Signal Analysis and Processing Using MATLAB*, Chapman and Hall/CRC 2008.
- [18] W. Schwanghart, N. Kuhn, "TopoToolbox: a set of Matlab functions for topographic analysis" *Environmental Modelling & Software*, vol. 25, pp. 770-781, 2010.

백 인 찬

1996년 2월: 한양대학교 물리학과 (이학석사)
 2005년 2월: 한양대학교 물리학과 (이학박사)
 1997년 1월~2008년 9월: 코리아일렉콤 연구소장
 2008년 10월~현재: 삼성탈레스 ISR · PGM

연구소 수석연구원

[주 관심분야] Radar/Radar Altimeter System, Signal Processing for Radar Systems, Optimization 등

전 주 환

1980년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학사)
 1984년 2월: Cornell University 전자공학과 (공학석사)
 1989년 2월: Stanford University 전자공학과 (공학박사)
 1992년 2월~현재: 한국과학기술원 전기

및 전자공학과 교수

[주 관심분야] Signal Processing for Wireless Communication, Signal Processing for Radar Systems, Detection and Estimation 등

이 상 일

1997년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학사)
 1997년 1월~2000년 1월: 삼성전자 연구원
 2000년 2월~현재: 삼성탈레스 ISR · PGM 연구소 수석연구원

[주 관심분야] 레이더/전파고도계 시스템,

신호처리 등

이 혁 중

2013년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학사)
 2013년 2월~현재: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사과정

[주 관심분야] Signal Processing for Radar Systems, Detection and Estimation 등

장 중 훈

2004년 8월: 포항공과대학교 전자전기공학
학과 (공학사)

2007년 2월: 포항공과대학교 정보통신대
학원 (공학석사)

2007년 1월~2011년 10월: LG전자 MC연
구소 주임연구원

2011년 11월~현재: 국방과학연구소 연구

원

[주 관심분야] 안테나 설계, FMCW 레이더 설계 등