

수치표고모델을 이용한 지형 레이더 반사 면적 생성 및 바이스태틱 SAR 영상합성 기술 연구

Reflectivity Data Generation from Digital Elevation Model and Bistatic SAR Image Synthesis

이병두 · 김석* · 송성찬* · 김수민 · 김정배 · 이의민 · 정채린 · 가민호

Byoung-doo Lee · Seok Kim* · Sungchan Song* · Sumin Kim ·
Jeongbae Kim · Uimin Lee · Chaerin Chung · Min-Ho Ka

요 약

본 논문에서는 바이스태틱(bistatic) 합성개구레이다(synthetic aperture radar, SAR) 시스템 환경에서 수치표고모델(digital elevation model, DEM)을 활용한 표적 데이터 생성 및 원시 데이터 획득, 영상 합성 시뮬레이션에 대하여 설명한다. 시뮬레이션을 위한 표적 정보는 DEM을 사용함으로써 실제 지형과 유사한 표적 정보를 획득할 수 있으며, 특히 표적의 반사도는 SAR 송/수신기와 표적의 기하 구조를 통해 계산할 수 있다. 본 연구에서는 바이스태틱 SAR 시스템을 모델링하여 DEM으로부터 표적 정보를 생성하고, 수신 신호 데이터 획득 시뮬레이션을 수행하였다. 또한, PFA(polar format algorithm)를 통해 SAR 영상을 합성하여 DEM 및 반사도 계산 결과와 비교함으로써 본 논문에서 제안한 기법을 분석하였다.

Abstract

In this study, we simulated target data for bistatic synthetic aperture radar (SAR) using a digital elevation model (DEM), raw data acquisition, and image synthesis. Using the DEM, target data similar to the actual topography could be generated. In particular, the reflectivity of the target was calculated from the geometrical structure between the SAR and the target. To verify and estimate the proposed method, we generated target data using bistatic SAR system modeling and simulated raw data acquisition. Finally, we compared the DEM and SAR images synthesized using the polar format algorithm (PFA).

Key words: Synthetic Aperture Radar, Bistatic Synthetic Aperture Radar, SAR Reflectivity, SAR Imaging

I. 서 론

합성개구레이다(synthetic aperture radar, SAR)는 이동하는 플랫폼상에 탑재된 레이더 센서를 바탕으로 표적에

「이 논문은 2021년도 한화시스템(주)의 재원과 과학기술정보통신부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임.」

연세대학교 글로벌융합공학부(School of Integrated Technology, Yonsei University)

*한화시스템 (Hanwha Systems)

· Manuscript received November 30, 2021 ; Revised December 13, 2021 ; Accepted February 21, 2022. (ID No. 20211130-110)

· Corresponding Author: Min-Ho Ka (e-mail: kaminho@yonsei.ac.kr)

대한 영상을 합성하는 기술로, 민/군수 원격 탐사 분야에서 활발하게 사용되고 있다. SAR은 광학 영상 기술과는 달리 RF 대역의 전자기파를 사용하므로 주야간 및 기상 상황에 구애받지 않고 전천후로 고해상도 영상을 얻을 수 있다는 장점이 있다^[1]. 모노스테틱 SAR 시스템은 송신기와 수신기가 동일한 위치에서 신호를 송수신한다. 이와 달리 바이스태틱 SAR 시스템은 송신기와 수신기가 서로 다른 위치에서 신호를 송/수신한다.

바이스태틱 SAR 시스템은 모노스테틱 SAR 시스템에 대하여 다음과 같은 이점을 지닌다. 첫째로, 분리된 송/수신기 구조로 인해 모노스테틱 SAR 시스템 대비 유연한 SAR 시스템 디자인이 가능하다. 둘째, 모노스테틱 SAR는 기하학적 한계와 안테나 빔 폭 제한으로 인해 관측 영역이 제한되지만, 바이스태틱 SAR은 송/수신기 기하에 따라 관측 범위의 한계를 극복할 수 있다. 마지막으로, 모노스테틱 SAR 시스템보다 수집할 수 있는 정보의 다양성과 저피탐 표적에 대한 탐지 가능성 등의 이점을 지닌다^{[2]~[4]}.

SAR 데이터 획득 시뮬레이션은 SAR 시스템 파라미터를 설계하고, 처리 과정의 시험 및 분석을 위한 도구로서 중요한 역할을 한다. 일반적으로, 개별적인 산란 표적들에 대한 수신 데이터 획득 시뮬레이션은 2D 해상도 및 PSLR(peak sidelobe ratio) 등을 분석하기 위한 도구로서 적합하다. 다수의 산란 표적들을 이용한 시뮬레이션은 주로 각각의 표적들에 대한 수신 신호를 모델링하는 PBP(pulse by pulse) 및 TBT(target by target) 방식으로 진행된다^[5].

본 논문에서는 수치표고모델(digital elevation model, DEM)을 사용하여 바이스태틱 SAR 데이터 획득 시뮬레이션을 진행하였다. DEM은 지형에 대한 정보를 담고 있는 3차원 지형 자료이다. 기존의 SAR 시뮬레이션은 소수의 점 표적을 이용하거나, 가상의 자연환경을 모방한 표적을 사용하여 진행되었다^{[6]~[9]}. 앞서 언급한 방법들과 다르게 DEM 데이터를 사용하여 표적 정보를 생성하는 것은 실제 지형을 모사한 3차원 표적 데이터를 만들 수 있는 이점을 가지고 있다. 또한 생성된 DEM 표적 정보를 이용하여 반사도 계산과 TBT를 응용한 수신 신호 데이터를 획득하고, 영상 합성 시뮬레이션을 진행했을 때의 결과는 단순한 표적을 사용했을 때보다 사실성이 증대된

결과를 얻을 수 있다.

본 논문에서는 바이스태틱 SAR 시스템하에서 DEM에 대한 반사도를 시뮬레이션하고, 수신 데이터 획득 및 영상합성 시뮬레이션에 대한 결과를 분석하였다. DEM에 대한 반사도 계산은 송/수신 레이더와 표적 사이의 입사각을 구하는 것으로 계산할 수 있다. 이를 위하여 레이더 신호와 송/수신기 탑재체 및 안테나를 모델링하고, 송/수신기와 DEM의 기하학적 관계에 따른 입사각을 계산하여 반사도를 구한다. 계산된 반사도를 이용하여 수신 신호 데이터 획득 시뮬레이션을 진행하고 영상합성을 수행하여 시뮬레이션을 마무리하였다.

본 논문의 II 장에서는 바이스태틱 레이더 신호와 DEM의 반사도 계산에 대하여 설명하였다. III 장에서는 바이스태틱 PFA(polar format algorithm)에 대하여 설명하고, DEM을 사용하여 반사도 계산 시뮬레이션을 진행하였으며 그 결과로부터 수신 데이터 생성 및 PFA를 사용한 영상합성 시뮬레이션을 진행하였다.

II. 바이스태틱 SAR 신호 및 표적 모델

2-1 바이스태틱 SAR 신호 모델

SAR 시스템에서는 레이더 신호로서 일반적으로 펄스 LFM(linear frequency modulation) 신호를 사용한다. 본 논문에서도 송신 신호로서 LFM 신호를 가정하였으며, 식 (1)과 같이 모델링하였다^[10].

$$s(\tau) = \text{rect}\left(\frac{\tau}{T}\right) \exp(j2\pi f_c \tau + j\pi k_r \tau^2) \quad (1)$$

상기 식 (1)에서 $\text{rect}(\cdot)$ 는 0을 중심으로 길이가 1, 크기가 1인 창 함수이고, T 는 펄스폭, f_c 는 중심 주파수, 그리고 k_r 은 칩 레이트(chirp rate)이다.

단일 표적으로부터 반사된 수신 신호는 시간 지연된 송신 신호로서 식 (2)와 같이 모델링할 수 있다.

$$s_r(\tau, \eta) = A_{\text{target}} A_{\text{ant,tx}} A_{\text{ant,rx}} \text{rect}\left(\frac{\tau - \tau_d(\eta)}{T}\right) \cdot \exp(j2\pi f_c (\tau - \tau_d(\eta)) + j\pi k_r (\tau - \tau_d(\eta))^2) \quad (2)$$

식 (2)에서 τ_d 는 표적에 대한 시간 지연, A_{target} 은 거리

에 의한 신호 손실과 표적의 반사도 등을 포함하는 계수이며, A_{ant} 는 표적 위치에 따른 송/수신 안테나 방사 패턴의 크기이다. 시간 지연 τ_d 는 표적과의 거리에 대하여 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\tau_d(\eta) = \frac{R_{tx}(\eta) + R_{rx}(\eta)}{c} \quad (3)$$

식 (3)에서 $R_{tx}(\eta)$ 는 표적과 송신기 사이의 거리이고, $R_{rx}(\eta)$ 는 표적과 수신기 사이의 거리, η 는 슬로우 타임 (slow time)이다.

2-2 표적 반사도 모델

표적의 반사도는 표적의 물성과 형태, 그리고 신호의 입사각 등의 요소에 의하여 구할 수 있으며, 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\sigma_0 = \gamma_0 \sqrt{\cos(\psi_{tx}) \cos(\psi_{rx})} \quad (4)$$

식 (4)에서 γ_0 는 normalized reflectivity parameter이고, ψ_{tx} 와 ψ_{rx} 는 각각 표적에 대한 송/수신 빔의 입사각이다 [11],[12]. 식 (4)의 $\cos(\psi_{tx})$ 와 $\cos(\psi_{rx})$ 는 각각 식 (5)와 식 (6)과 같이 구할 수 있다.

$$\cos(\psi_{tx}) = \frac{\vec{n} \cdot (P_{tx} - P_0)}{|\vec{n}| |P_{tx} - P_0|} \quad (5)$$

$$\cos(\psi_{rx}) = \frac{\vec{n} \cdot (P_{rx} - P_0)}{|\vec{n}| |P_{rx} - P_0|} \quad (6)$$

식 (5)와 식 (6)에서 P_{tx} 는 송신 안테나의 위치이고, P_{rx} 는 수신 안테나 위치, P_0 는 표적의 위치이며, \vec{n} 은 표적의 기울기에 대한 법선 벡터이다. 식 (5)와 식 (6)을 구하기 위한 바이스테틱 SAR 송/수신기와 표적의 기하구조는 그림 1과 같다.

그림 1에서 Δx 는 표적들의 x 축 간격, Δy 는 표적들의 y 축 간격이다. 표적의 기울기에 대한 법선 벡터 \vec{n} 은 목표 표적 주변의 표적들을 활용하여 계산할 수 있다. 목표 표적의 $+x$, $-x$, $+y$, $-y$ 방향 각각에 대하여 가장 가까운 표적들로부터 서로 교차하는 두 개의 벡터를 구하고, 두 벡터의 외적을 통하여 식 (7)과 같이 구할 수 있다.

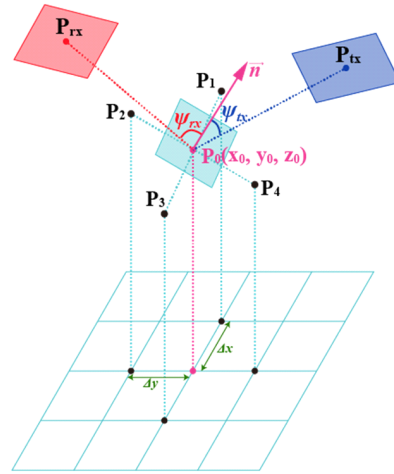


그림 1. 바이스테틱 SAR 기하 구조

Fig. 1. Bistatic SAR geometrical structure.

$$\begin{aligned} \vec{n} &= \overrightarrow{P_1 P_3} \times \overrightarrow{P_2 P_4} \\ &= \begin{bmatrix} x_0 + \Delta x \\ y_0 \\ P_{3,z} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_0 - \Delta x \\ y_0 \\ P_{1,z} \end{bmatrix} \\ &\quad \times \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 + \Delta y \\ P_{4,z} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} x_0 \\ y_0 - \Delta y \\ P_{2,z} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} 2\Delta x \\ 0 \\ P_{3,z} - P_{1,z} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} 0 \\ 2\Delta y \\ P_{4,z} - P_{2,z} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} -2\Delta y(P_{3,z} - P_{1,z}) \\ -2\Delta x(P_{4,z} - P_{2,z}) \\ 4\Delta x \Delta y \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (7)$$

III. 바이스테틱 SAR 반사도 시뮬레이션 및 영상합성

3-1 시뮬레이션 파라미터

바이스테틱 SAR 시뮬레이션을 위하여 사용한 레이다 신호 및 탑재체에 대한 파라미터를 표 1에 정리하였다.

레이다 파라미터는 참고문헌 [13] 및 참고문헌 [14]와 유사하도록 X 밴드 캐리어 주파수, 75MHz 대역폭, 25°입사각 및 탑재체의 고도 등을 설정했다.

표적 데이터는 각 해상도 셀 내에 최소 하나 이상의 표적이 위치하도록 DEM 데이터의 크기를 조절하여 생성하였다. 원본 및 조절한 DEM 데이터의 사이즈를 표 2에 정

표 1. 시뮬레이션 파라미터

Table. 1. Radar parameters.

Parameters	Values
Center frequency	9.65 GHz
Bandwidth	75 MHz
PRF	1,200 Hz
Pulse width	8 usec
Tx position at beamcenter crossing	(0, -233.15 km, 500 km)
Rx position at beamcenter crossing	(-50 km, -233.15 km, 500 km)
Tx velocity	(7600, 0, 0) m/s
Rx velocity	(7600, 0, 0) m/s
Tx antenna size	4.2 m × 2.1 m
Rx antenna size	4.2 m × 2.1 m
Simulation time	2 sec

리하였다. 또한 표 2에 따라 크기가 조절된 DEM 표적 데이터는 그림 2 및 그림 3과 같다.

본 논문에서 사용한 DEM은 NASA Earthdata 사이트에서 제공하는 미국 로키산맥의 DEM 데이터를 사용하였다^[15]. 본 논문에서 식 (2)의 A_{target} 은 식 (4)를 통하여 계산한 표적의 반사도에 대해서만 고려한다. 또한 식 (4)에서 γ_0 는 모든 표적에 대하여 같은 값을 갖는다고 가정함으로써 반사도에 대한 물성의 영향을 고려하지 않고 입사각에 대한 영향만을 다루었다.

그림 4는 DEM과 송/수신기의 위치를 함께 나타낸 그림이다. DEM의 중심을 원점 (0, 0, 0)으로 설정하여 시뮬레이션을 진행하였다.

표 2. DEM의 원본 및 조정 후 크기

Table. 2. Original and adjusted DEM size.

Original size		Changed size	
Parameters	Values	Parameters	Values
X length	21.5 km	X length	1.26 km
Y length	12.1 km	Y length	0.99 km
X sample interval	30.8 m	X sample interval	1.8 m
Y sample interval	22 m	Y sample interval	1.8 m
The number of samples		386,251	

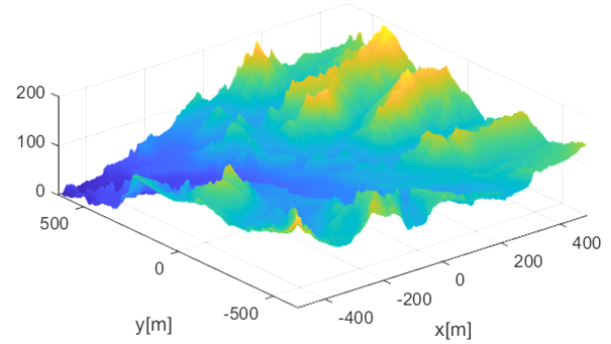


그림 2. 시뮬레이션에 사용한 DEM의 3D 영상

Fig. 2. 3D image of the DEM for the numerical simulation.

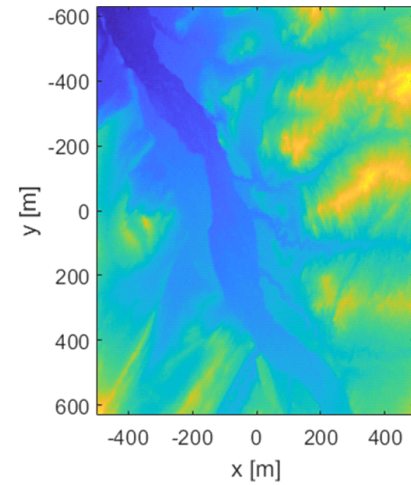


그림 3. 시뮬레이션에 사용한 DEM의 2D 이미지

Fig. 3. 2D image of the DEM for the numerical simulation.

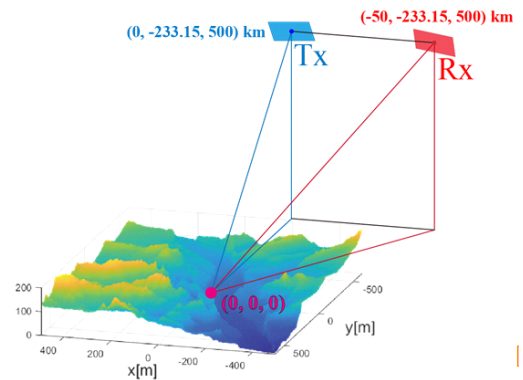


그림 4. 시뮬레이션 기하 구조

Fig. 4. Geometry of simulation.

3-2 시뮬레이션 데이터 생성

식 (4)를 이용하여 그림 4의 기하 구조하에서 DEM 데이터와 표 1의 레이더 파라미터를 바탕으로 표적 반사도를 계산하였으며, 표적 반사도 지도는 그림 5와 같다.

그림 5와 그림 2~그림 4를 통하여 송/수신기의 위치와 표적의 위치, 기울기 등과 같은 기하적 특징이 표적의 반사도에 영향을 주는 것을 확인할 수 있다. 특히, 송/수신기와 정면으로 마주 보는 표적은 반사도가 높게 계산되었으나, 등지고 있는 표적은 반사도가 낮은 것을 확인할 수 있다.

그림 5의 표적 반사도 정보를 활용하여 수신 데이터 생성 시뮬레이션을 진행하였다. 수신 데이터는 TBT 방식으로 송/수신 빔 footprint 영역 내부의 모든 표적에 대한 수신 신호를 각각 모델링한 후 모두 합하는 방식으로 모델링하였다. M개의 점 표적에 대하여 모델링한 수신 신호는 식 (8)과 같이 표현할 수 있다^[16].

$$s_r(\tau, \eta) = \sum_{m=1}^M A_{target}(m) A_{ant,tx}(m) \cdot A_{ant,rx}(m) \text{rect}\left(\frac{\tau - \tau_d(\eta, m)}{T}\right) \cdot \exp(j2\pi f_c(\tau - \tau_d(\eta, m)) + j\pi k_r(\tau - \tau_d(\eta, m))^2) \quad (8)$$

식 (8)에서 $A_{target}(m)$ 은 식 (4)를 이용하여 계산한 m번째 표적의 반사도이다.

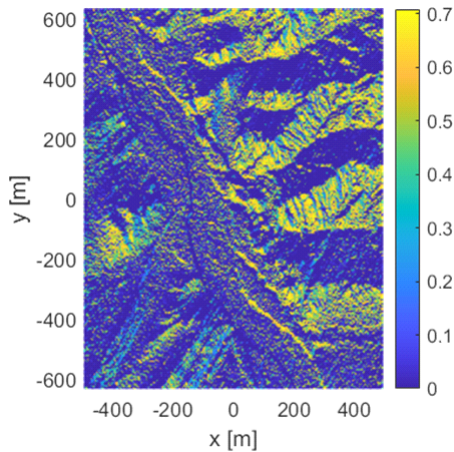


그림 5. DEM으로부터 계산된 반사도 분포
Fig. 5. Reflectivity distribution calculated using the DEM.

3-3 영상합성 시뮬레이션

본 논문에서는 고속 영상합성이 가능하고 일반적인 바이스테틱 기하 전반에 대하여 영상 형성 능력을 확보한 바이스테틱 PFA(polar format algorithm)를 사용하여 영상합성을 진행하였다. 바이스테틱 PFA는 바이스테틱 기하에 따른 공간주파수 분포를 바탕으로 polar format을 적용하여 데이터의 migration을 해소한다. PFA는 2D IFT (inverse fourier transform)만으로 최종 영상합성이 가능하며 CPI(coherent processing interval)가 짧은 경우에 적합하다^{[17],[18]}.

주어진 바이스테틱 기하에 대하여 신호가 점유하는 3차원 공간주파수의 표현은 식 (9)와 같다.

$$\begin{aligned} k_x &= \frac{2\pi}{c} f \cdot (\sin \theta_{tx}(\eta) \cos \phi_{tx}(\eta) + \sin \theta_{rx}(\eta) \cos \phi_{rx}(\eta)) \\ k_y &= \frac{2\pi}{c} f \cdot (\sin \theta_{tx}(\eta) \sin \phi_{tx}(\eta) + \sin \theta_{rx}(\eta) \sin \phi_{rx}(\eta)) \\ k_z &= \frac{2\pi}{c} f \cdot (\cos \phi_{tx}(\eta) + \cos \phi_{rx}(\eta)) \end{aligned} \quad (9)$$

식 (9)에서 k 는 각각 x, y, z 방향으로의 공간주파수이고, θ 는 squint angle, ϕ 는 look angle이다. 바이스테틱 PFA는 거리 압축, RCMC(range cell migration correction), Polar Formatting의 순서로 이루어지며, 그 과정을 그림 6에 나타내었다.

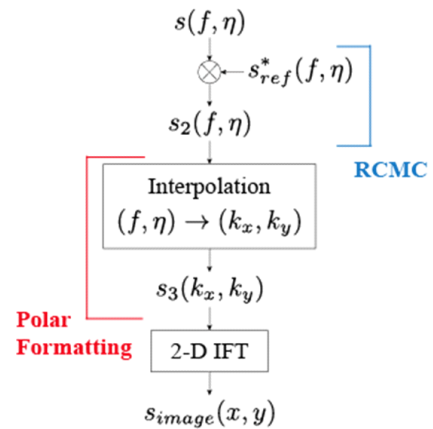


그림 6. 바이스테틱 PFA 신호처리 흐름도
Fig. 6. Diagram of the bistatic PFA signal processing.

상기 그림 6에서 $s(f, \eta)$ 는 수신 신호 $s_r(\tau, \eta)$ 를 τ 에 대하여 푸리에 변환한 신호이다. $s_{ref}(f, \eta)$ 는 RCMC를 위해 사용되는 영상 중심에 대한 레퍼런스 신호이며, 식 (10)과 같이 표현된다.

$$s_{ref}(f, \eta) = \exp \left[-j \frac{2\pi}{c} f (r_{0,tx}(\eta) + r_{0,rx}(\eta)) \right] \quad (10)$$

$r_{0,tx}$ 는 원점으로부터 송신기까지의 거리이고, $r_{0,rx}$ 는 원점으로부터 수신기까지의 거리이다. 거리 압축과 RCMC를 수행한 후의 바이스테틱 SAR 신호는 식 (11)과 같이 표현할 수 있다.

$$s_2(f, \eta) = \sum_m \exp \left[j \frac{2\pi}{c} f (k_x x_m + k_y y_m + k_z z_m) \right] \quad (11)$$

이때, 식 (9)의 관계를 이용하여 식 (11)을 $s_2(k_x, k_y)$ 로 보간함으로써 푸리에 변환 또는 역변환을 통해 SAR 영상을 형성할 수 있다. 식 (8)을 통해 모델링한 수신 신호 데이터로부터 영상합성을 진행하였으며, 영상합성 결과는 그림 7과 같다.

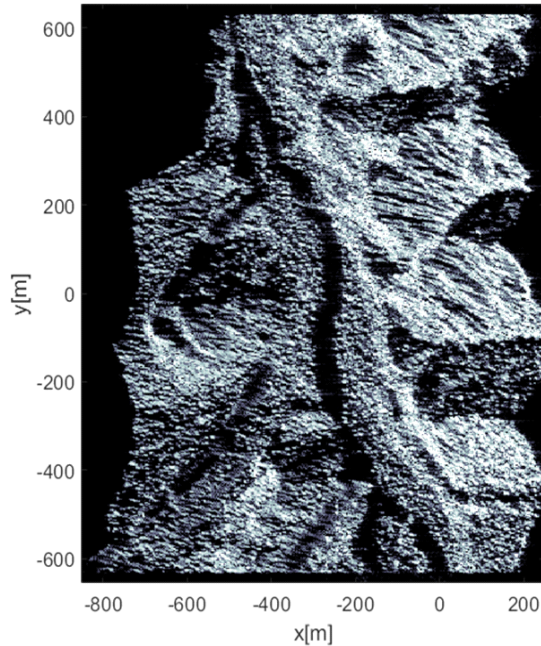


그림 7. DEM을 통하여 생성한 표적 데이터를 활용한 바이스테틱 SAR 영상

Fig. 7. Bistatic SAR image with DEM target data.

합성된 영상인 그림 7과 그림 4 및 그림 5를 비교했을 때 그림 4에서 레이더 빔 조향 방향과 정면으로 마주하는 영역은 그림 5에서 반사도가 높게 나오며, 그림 7에서는 밝게 빛나는 점들이 상대적으로 밀집되어 분포함을 확인할 수 있다. 반면, 그림 4에서 레이더 빔을 등지고 있는 표적들은 shadow 현상으로 인하여 그림 5에서 낮은 반사도를 보이며, 그림 7에서는 밝은 점들의 밀집도가 낮은 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과로부터 SAR 시뮬레이션에서 DEM을 사용하여 표적 정보를 생성하는 것은 현실과 유사한 환경에서의 시뮬레이션을 가능하게 한다는 이점이 있음을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 바이스테틱 SAR 시스템에서 송/수신기와 표적의 기하학적 구조를 활용하여 표적의 반사도를 계산하는 기법을 제안하였다. 목표 표적 주변 샘플을 활용하여 표적의 기울기에 대한 법선 벡터를 구하고, 송/수신기에서 표적을 향하는 벡터와 법선 벡터 사이의 각을 통해 표적의 반사도를 구할 수 있음을 보였다.

본 논문에서 제시한 기법을 통해 로키산맥의 DEM으로부터 반사도 계산과 표적 데이터 생성 시뮬레이션을 수행하였고, 생성된 표적 정보를 이용하여 수신 신호 데이터 획득 및 영상합성 시뮬레이션을 진행하였다.

최종적으로 합성된 바이스테틱 SAR 영상과 반사도 분포, 그리고 DEM 데이터를 비교하였다. 본 논문에서 기술한 방식을 통한 바이스테틱 SAR 시뮬레이션은 기존의 점 표적을 사용한 시뮬레이션과 달리 DEM을 사용하여 실제 지형을 모사한 표적 정보를 생성함으로써 현실과 유사한 환경에서의 시뮬레이션이 가능함을 보였다.

본 연구 내용을 바탕으로 향후 사실성이 향상된 표적 데이터 생성과 원시 데이터 획득 및 영상합성 시뮬레이션과 관련된 연구를 진행할 예정이다.

References

- [1] C. Chung, S. Kim, J. Kim, U. Lee, B. Lee, and M. H. Ka, "Analysis on the impact of constellation configuration

- over multistatic SAR images," in *2021 IEEE 7th Asia-Pacific Conference on Synthetic Aperture Radar (APSAR)*, Bali, Nov. 2021.
- [2] B. H. Ryu, B. S. Kang, M. J. Lee, and K. T. Kim, "Bistatic synthetic aperture radar imaging using a monostatic equivalent model," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 29, no. 9, pp. 693-700, Sep. 2018.
- [3] O. Loffeld, H. Nies, V. Peters, and S. Knedlik, "Models and useful relations for bistatic SAR processing," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 42, no. 10, pp. 2031-2038, Oct. 2004.
- [4] I. Walterscheid, J. H. G. Ender, A. R. Brenner, and O. Loffeld, "Bistatic SAR processing and experiments," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 44, no. 10, pp. 2710-2717, Oct. 2006.
- [5] X. Qiu, C. Ding, and D. Hu, *Bistatic SAR Data Processing Algorithms*, Somerset, John Wiley & Sons, 2013.
- [6] X. Wang, D. Zhu, X. Mao, and Z. Zhu, "Space-variant filtering for wavefront curvature correction in polar formatted bistatic SAR image," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 48, no. 2, pp. 940-950, Apr. 2012.
- [7] Y. L. Neo, F. Wong, and I. G. Cumming, "A two-dimensional spectrum for bistatic SAR processing using series reversion," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 4, no. 1, pp. 93-96, Jan. 2007.
- [8] X. Wang, Y. Yu, Y. Chen, J. Xiao, and M. Zhu, "Bistatic SAR raw data simulation for ocean," in *2007 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Barcelona, Jul. 2007, pp. 871-874.
- [9] A. Arnold-Bos, A. Khenchaf, and A. Martin, "Bistatic radar imaging of the marine environment—Part II: Simulation and results analysis," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 45, no. 11, pp. 3384-3396, Nov. 2007.
- [10] T. Lee, S. Jeon, J. Han, V. Skvortsov, K. Nikitin, and M. Ka, "A simplified technique for distance and velocity measurements of multiple moving objects using a linear frequency modulated signal," *IEEE Sensors Journal*, vol. 16, no. 15, pp. 5912-5920, Aug. 2016.
- [11] M. Pola, P. Bezousek, and J. Pidanic, "Model comparison of bistatic radar clutter," in *2013 Conference on Microwave Techniques (COMITE)*, Pardubice, Apr. 2013, pp. 182-185.
- [12] D. K. Barton, "Land clutter models for radar design and analysis," *Proceedings of the IEEE*, vol. 73, no. 2, pp. 198-204, Feb. 1985.
- [13] H. W. Ha, S. C. Kwon, D. Park, and H. U. Oh, "Structure conceptual design of micro-satellite through the integration of bus system," in *2020 KSAS Fall Conference*, Jeju, 2020, pp. 401-402.
- [14] H. Kim, K. H. Lee, T. Kim, H. Lee, J. Son, and S. C. Song, et al., "Analysis of FoM and operational concept for small SAR satellite," in *2020 KSAS Fall Conference*, Jeju, 2020, pp. 392-393.
- [15] NASA, "Eathdsata CMR search, earthexplorer", Available: <https://earthexplorer.usgs.gov/>
- [16] S. Kim, M. H. Ka, "Forward-looking electromagnetic wave imaging using a radial scanning multichannel radar," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 19, pp. 1-5, May. 2022.
- [17] B. D. Rigling, R. L. Moses, "Polar format algorithm for bistatic SAR," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 40, no. 4, pp. 1147-1159, Oct. 2004.
- [18] W. Dower, M. Yeary, "Bistatic SAR: Forecasting spatial resolution," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 55, no. 4, pp. 1584-1595, Aug. 2019.

이 병 두 [연세대학교/석사과정]

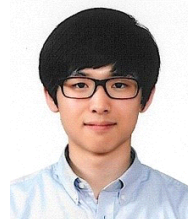
<https://orcid.org/0000-0001-5576-5391>



2020년 8월: 숭실대학교 전자정보공학부 (공학사)
2020년 9월~현재: 연세대학교 글로벌융합공학과 석사과정
[주 관심분야] 레이더 영상, 레이더 신호처리

김 수 민 [연세대학교/석·박사통합과정]

<https://orcid.org/0000-0002-4389-0221>



2016년 8월: 연세대학교 글로벌융합공학부 (공학사)
2016년 9월~현재: 연세대학교 글로벌융합공학과 석·박사통합과정
[주 관심분야] 바이스태틱 SAR, 레이더 영상, 레이더 신호처리

김 석 [한화시스템/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-6986-3785>



1998년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학사)
2000년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학석사)
2019년 2월: 연세대학교 글로벌융합공학과 (공학박사)
2006년 11월~현재: 한화시스템 항공·우주연구소 수석연구원

[주 관심분야] 레이더 영상, 레이더 신호처리

김 정 배 [연세대학교/석·박사통합과정]

<https://orcid.org/0000-0002-4478-6979>



2017년 2월: 연세대학교 글로벌융합공학부 (공학사)
2017년 3월~현재: 연세대학교 글로벌융합공학과 석·박사통합과정
[주 관심분야] 영상레이더(SAR), 멀티스태틱 SAR, 레이더 원격 탐사

송 성 찬 [한화시스템/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-0965-2091>



2001년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학사)
2003년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학석사)
2002년 11월~현재: 한화시스템 항공·우주연구소 수석연구원, 팀장
[주 관심분야] 위성 SAR 시스템, 위성 SAR 안테나, 레이더 송수신기

이 의 민 [연세대학교/석·박사통합과정]

<https://orcid.org/0000-0001-5762-5181>



2019년 2월: 연세대학교 글로벌융합공학부 (공학사)
2019년 3월~현재: 연세대학교 글로벌융합공학과 석·박사통합과정
[주 관심분야] 딥러닝, 실시간 레이더 신호처리, 영상레이더(SAR)

정 채 린 [연세대학교/석·박사통합과정]

<https://orcid.org/0000-0001-7173-5600>



2020년 2월: 연세대학교 글로벌융합공학부 (공학사)

2020년 3월~현재: 연세대학교 글로벌융합공학과 석·박사통합과정

[주 관심분야] 영상레이다(SAR), 바이스테틱 SAR

가 민 호 [연세대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-1327-3481>



1989년: 연세대학교 전자공학과 (공학사)

1991년: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)

1997년: 모스크바에너지공대 전자전파공학과 (공학박사)

1997년~2000년: 국방과학연구소 선임연구원

2002년~2011년: 한국산업기술대학교 전자공학과 교수

2011년~현재: 연세대학교 글로벌융합공학부 교수

[주 관심분야] 레이더 시스템 설계, 영상레이다(SAR) 등