

곡선기하에서의 SAR 영상품질 향상을 위한 후처리 알고리즘 연구

Quality Improvement of Synthetic Aperture Radar Images in Curved-Orbit Geometry Using a Post-Focusing Algorithm

강 병 수 · 이 기 웅

Byung-Soo Kang · Keewoong Lee

요 약

곡선 기하에서의 합성개구면레이다(synthetic aperture radar: SAR) 영상 생성 처리체계에서는 SAR 영상 생성 후 방위 분포 표적들에 대한 잔여 오차가 남게 된다. 특히 곡선기하의 고해상도 SAR 영상 생성 시 방위방향으로 분포된 표적들이 서로 다른 고도에 위치할 경우, 상기 잔여 오차의 영향성이 더욱 커지게 되고, 이는 방위 분포 표적들에 대한 SAR 영상의 블러링(blurring)을 초래하여 SAR 영상의 품질을 저하시킨다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 곡선기하에서의 SAR 영상생성 후 영상의 품질을 향상시키기 위한 후처리(post-focusing) 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘에서는 방위 블록(block) 단위로 방위 분포 표적들의 잔여 오차를 보정한 후, 잔여 오차 보상이 완료된 모든 방위 블록 영상들을 결합하여 SAR 영상을 복원시킨다. 점표적을 이용한 시뮬레이션에서는 제안된 후처리 알고리즘을 통해 방위 분포 표적들에 대한 SAR 영상의 품질이 향상됨을 확인하였다.

Abstract

Even after typical synthetic aperture radar(SAR) processing, targets distributed along the azimuth direction have residual errors. As these errors significantly degrade the image quality, particularly when the targets are positioned at different heights in the curved-orbit SAR geometry, further processing is required after curved-orbit SAR imaging. Accordingly, we propose a post-focusing algorithm for SAR images in the curved-orbit geometry. In the proposed method, azimuth block filtering, in which azimuth-dependent residual errors are compensated, is applied to the SAR images. This block compensation is repeated for every azimuth block, and the SAR images are reconstructed with block recombination. Through high-resolution curved-orbit SAR simulations using isolated point targets, we demonstrate that the proposed post-focusing algorithm can improve SAR image quality by compensating the azimuth-dependent residual errors.

Key words: Curved-Orbit, Post-Focusing, Synthetic Aperture Radar(SAR), Spaceborne SAR, High Resolution

I. 서 론

합성개구면레이다(synthetic aperture radar: SAR)는 레이

다를 항공기나 위성에 탑재하여 관심지역에 대한 전자기적 2차원 영상을 획득하는 시스템이다. 특히 SAR의 경우, 주야 및 전천후로 원거리 지역에 대한 영상을 획득할 수 있

국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received June 3, 2020 ; Revised July 1, 2020 ; Accepted July 3, 2020. (ID No. 20200603-048)

· Corresponding Author: Byung-Soo Kang (e-mail: qudm109@add.re.kr)

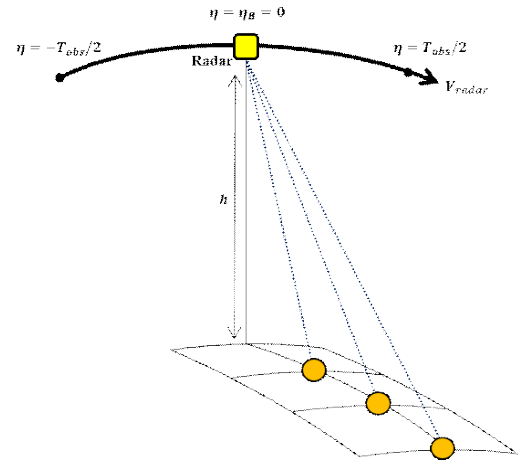
기 때문에 표적의 전술 정보 획득 및 원격 탐사를 수행함에 있어 기존 광학 영상보다 더 유용하게 활용될 수 있다.

일반적으로 SAR 영상 생성을 위해 대표적으로 활용되는 신호처리 알고리즘들은 거리-도플러 알고리즘(range-Doppler algorithm: RDA), 처프 스케일링 알고리즘(chirp-scaling algorithm: CSA), 그리고 오메가-케이 알고리즘(omega-K algorithm: OKA) 등이 있다^[1]. 여기서 상기의 알고리즘들은 모두 hyperbolic-range equation(HRE) 수학 모델을 기반하며, 이는 항공기 SAR와 같이 레이더가 직선으로 움직이며, 대상지역을 관측하는 경우에만 유효하다^{[2],[3]}.

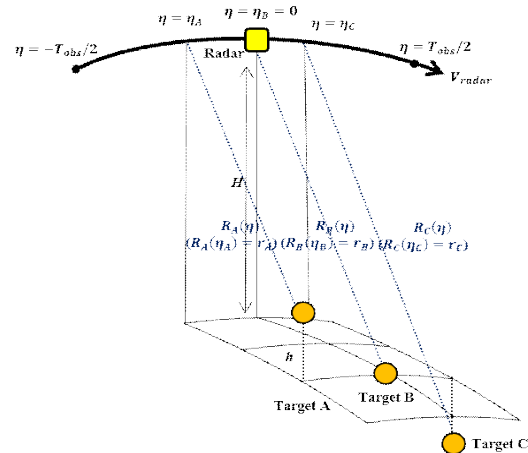
반면, 위성 SAR의 경우, 궤도상에서 이동하며 지구표면을 관측하는 곡선기하의 특성으로 인해 HRE 모델 오차가 발생하게 되고, 이는 기존의 HRE 기반 SAR 신호처리 알고리즘들에 대한 심각한 품질 저하를 초래한다^{[4],[5]}. 상기 문제를 해결하기 위해 참고문헌 [6]에서는 확장 오메가-케이 알고리즘(extended omega-K algorithm: EOKA)을 기반한 곡선기하에서의 SAR 영상 생성 처리체계를 제안하였다. 제안된 처리체계에서는 EOKA를 통해 range cell migration(RCMC) 및 secondary range compression(SRC) 과정을 수행한 후, 다항식 거리 모델(polynomial range equation model) 기반의 방위압축을 수행함으로써 HRE 모델 오차에 의한 SAR 영상의 품질 저하를 보상하였다.

참고문헌 [6]에서 제시된 방위압축과정의 경우, 그림 1(a)와 같이 동일한 방위위치 $\eta_B=0$ 을 기준으로 서로 다른 거리방향(slant-range)으로 분포된 표적들의 HRE 오차만을 보상할 수 있다. 이는 그림 1(b)와 같이 η_B 를 기준으로 방위방향으로 분포된 표적들에 대해서는 참고문헌 [6]의 과정을 수행하더라도 방위압축 후 잔여 오차가 남게 됨을 의미하며, 특히 그림 1(b) 내 표적들이 서로 다른 고도에 위치할 경우, 상기 잔여 오차가 더 커지게 되어 고해상도 SAR 영상 생성 시 심각한 품질 저하를 초래하게 된다. 즉, 참고문헌 [6]에서 제안된 과정만으로는 촬영 영역 전체에 대한 SAR 영상을 성공적으로 생성할 수 없으며, 이를 해결하기 위해서는 방위방향으로 분포된 표적들의 영상 품질을 향상시키는 추가 과정이 필요하다.

따라서 본 논문에서는 곡선기하에서 방위방향으로 분포된 표적들의 잔여 오차를 보상하는 후처리(post-focusing) 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘을 수행



(a) 거리(slant-range) 분포 표적
(a) Targets distributed along slant-range direction



(b) 방위(azimuth) 분포 표적
(b) Targets distributed along azimuth direction

그림 1. SAR 영상생성 기하구조
Fig. 1. Geometry for SAR imaging.

하기 위해서는 먼저 참고문헌 [6]에서의 과정으로 SAR 영상을 생성하여야 한다. 다음으로, 방위방향으로 분포된 표적 샘플들의 잔여 오차를 계산한 후, 이를 방위 블록(block) 단위로 보상함으로써 SAR 영상 전반에 대한 품질을 향상시킨다. 제안된 후처리 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 점표적을 이용한 시뮬레이션을 수행하였으며, 이를 통해 제안된 알고리즘이 방위 방향으로 분포된 표적들에 대한 SAR 영상의 품질을 향상시킨다는 것을 확인하였다.

II. 방위분포 표적에 대한 SAR 신호특성 분석

본 절에서는 그림 1(b)에서 방위방향으로 서로 다른 고도에 위치한 표적 $i = A, B, C$ 에 대한 SAR 신호특성을 분석하였다. 여기서, 각 표적은 서로 다른 제로-도플러(zero-Doppler) 시간 η_i 에서 최 근접 거리(closest distance) r_i 에 위치해 있으며, 방위시간 η 의 변화에 따른 각 표적별 레이다-표적 간 거리변화 $R_i(\eta; r_i; \eta_i)$ 는 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} R(\eta; r_i; \eta_i) &= \sqrt{r_i^2 + V_{EFF}^2(\eta - \eta_i)^2} + \epsilon_i^{hyp}(\eta; r_i; \eta_i) \\ &= R_i^{hyp}(\eta; r_i; \eta_i) + \epsilon_i^{hyp}(\eta; r_i; \eta_i). \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,

$$R(\eta; r_i; \eta_i) = \sqrt{r_i^2 + V_{EFF}^2(\eta - \eta_i)^2} \quad (2)$$

는 표적 샘플 $i = A, B, C$ 에 대한 HRE이며, V_{eff} 는 곡선기하를 등가 직선 기하로 변환한 결과인 등가 레이다 속도^[6], 그리고 $\epsilon^{hyp}(\eta; r_i; \eta_i)$ 는 각 방위분포 표적에 대한 HRE 오차이다.

참고문헌 [6]에서는 곡선기하에서의 SAR 영상 생성을 위해 먼저 촬영영역 중심(swath center)에 위치한 표적 B의 HRE 오차 $\epsilon^{hyp}(\eta; r_B; \eta_B)$ 를 보상한 후 EOKA과정을 통해 RCMC 및 SRC를 수행한다. 상기의 과정 후 거리-도플러 영역에서의 레이다 신호는 식 (3)과 같으며, 이에 대한 자세한 수학적 과정은 참고문헌 [6]에 기술되어 있다.

$$\begin{aligned} H_{EOKA}(r, f_\eta) &= \sum_{i=A, B, C} \text{sinc}(r - r_i) \\ &\quad \times \exp[-j\varphi_{oco}(f_\eta; r_i; \eta_i)]. \end{aligned} \quad (3)$$

여기서,

$$\begin{aligned} &\exp[-j\varphi_{oco}(f_\eta; r_i; \eta_i)] \\ &= FT_{\eta \rightarrow f_\eta} \left\{ \exp \left[-j \frac{4\pi f_c}{c} R_{oco}(\eta; r_i; \eta_i) \right] \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

는 $\exp[-j4\pi f_c R_{oco}(\eta; r_i; \eta_i)/c]$ 에 대한 푸리에 변환 결과이며, 이때 $R_{oco}(\eta; r_i; \eta_i)$ 는 표적 B의 HRE 오차 $[\epsilon^{hyp}(\eta; r_i; \eta_i)]$ 보상 후, 각 표적 $i = A, B, C$ 샘플에 대한 레이다-표적 간 거리변화이다.

참고문헌 [6] 내 방위압축 과정에서는 η_B 를 기준하여 r 변화에 따른 방위압축 필터를 식 (5)와 같이 정의한 후,

식 (6)과 같이 방위 압축을 수행한다.

$$\begin{aligned} &h_{AZC}(f_\eta; r; \eta_B) \\ &= \exp[j\varphi_{oco}(f_\eta; r; \eta_B)] = FT_{\eta \rightarrow f_\eta} \left\{ j \frac{4\pi f_c}{c} R_{oco}(\eta; r; \eta_B) \right\}. \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} H_{EOKA}'(r, f_\eta) &= H_{EOKA}(r, f_\eta) \times h_{AZC}(f_\eta; r; \eta_B) \\ &= \sum_{i=A, B, C} \text{sinc}(r - r_i) \exp[-j\Delta\varphi_i(f_\eta)]. \end{aligned} \quad (6)$$

식 (5)에서 $R_{oco}(\eta; r; \eta_B)$ 는 (r, η_B) 위치에서의 레이다-표적 간 거리 변화이며, 식 (6)에서 $\Delta\varphi_i(f_\eta)$ 는 방위압축 수행 후 표적 샘플 $i = A, B, C$ 에 대한 도플러 위상 함수이다. $\Delta\varphi_i(f_\eta)$ 는 식 (7)와 같이 정의될 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta\varphi_i(f_\eta) &= \varphi_{oco}(f_\eta; r_i; \eta_i) - \varphi_{oco}(f_\eta; r_i; \eta_B) \\ &= 2\pi f_\eta \Delta\eta_i + \Delta\epsilon(f_\eta; r_i; \eta_i). \end{aligned} \quad (7)$$

이때 $2\pi f_\eta \Delta\eta_i = 2\pi f_\eta (\eta_i - \eta_B)$ 는 $\Delta\varphi_i(f_\eta)$ 내 선형변화 항으로써, 이는 f_η 에 대한 역푸리에 변환을 통해 SAR 영상 생성 시 표적 A, B, C에 대한 방위위치를 결정짓는데 필요한 성분이다. 그러나 $\Delta\varphi_i(f_\eta)$ 내 비 선형변화 항 $\Delta\epsilon(f_\eta; r_i; \eta_i) = \epsilon(f_\eta; r_i; \eta_i) - \epsilon(f_\eta; r_i; \eta_B)$ 의 경우, 방위방향으로의 영상 블러링을 초래하는 잔여 오차 성분으로써, 특히 표적 A, B, C가 그림 1(b)와 같이 서로 다른 고도에 위치할 경우, 상기 잔여 오차의 영향이 커지게 되어 SAR 영상에 대한 심각한 품질 저하를 초래한다. 즉, 참고문헌 [6]에서의 과정만으로는 촬영 영역 전반에 대한 고품질 SAR 영상을 생성할 수 없게 되므로, 본 논문에서는 이를 개선하기 위한 후처리 알고리즘을 제안한다.

III. SAR 후처리 알고리즘

SAR 영상은 식 (6)에 역푸리에 변환을 수행하여 생성되며, 이에 대한 결과는 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned} I_{EOKA}'(r, \eta) &= IFT_{f_\eta \rightarrow \eta} [H_{EOKA}'(r, f_\eta)] \\ &= \sum_{i=A, B, C} \text{sinc}(r - r_i) PSF(\eta - \Delta\eta_i). \end{aligned} \quad (8)$$

식 (8)에서 $PSF(\eta - \Delta\eta_i)$ 는 i 번째 표적에 대한 점산란 강도함수(point spread function: PSF)로써 이는 식 (9)와 같이 정의된다.

$$PSF(\eta - \Delta\eta_i) = \text{sinc}(\eta - \Delta\eta_i) \otimes D_i(\eta). \quad (9)$$

식 (9)에서 i 번째 표적에 대한 방위 위치 $\Delta\eta_i = \eta_i - \eta_B$ 는 식 (6) 내 선형위상성분 $\exp(j2\pi f_\eta \Delta\eta_i)$ 에 의해 결정되며,

$$D_i(\eta) = IF T_{f_\eta \rightarrow \eta} \{ \exp[-j\epsilon(f_\eta; r_i; \eta_i)] \} \quad (10)$$

식 (10)은 비선형위상성분 $\exp[j\epsilon(f_\eta; r_i; \eta_i)]$ 의 역푸리에 변환 결과로써 방위 방향으로 분포된 표적 A, C에 블러링을 발생시켜 SAR 영상의 품질을 저하시킨다.

상기 영상의 품질 저하를 개선하기 위해 본 절에서는 SAR 영상의 품질을 향상시키기 위한 후처리 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘에서는 먼저 생성된 SAR 영상식 (8)에서 블락 필터링을 통해 방위 분포 표적 i 를 중심으로 SAR 블락 영상을 추출한 후, 추출된 블락 영상에서 잔여 오차 $\Delta\varphi_i(f_\eta)$ 를 보상한다(3-1절). 다음으로 상기 블락 단위의 보상 과정을 방위 분포 표적 샘플 모두들에 대해 반복적으로 수행한 후, 최종적으로 생성된 모든 블락 영상들을 결합하여 SAR 영상을 복원함으로써 SAR 영상의 품질을 향상시킨다(3-2 절).

3-1 방위 분포 표적에 대한 블락별 잔여 오차 보상

식 (8)에서 방위 분포 표적 $i = A, B, C$ 를 중심으로 SAR 영상을 추출하기 위한 블락 필터링은 식 (11)과 같이 수행된다.

$$I_{EOKA}'(r, \eta; \Delta\eta_i) = I_{EOKA}'(r, \eta) Y(\eta; \Delta\eta_i) = \text{sinc}(r - r_i) \text{PSF}(\eta - \Delta\eta_i). \quad (11)$$

식 (11)에서 $Y(\eta; \Delta\eta_i)$ 는 방위 블락 필터이며, 이는 식 (12)와 같이 정의된다.

$$Y(\eta; \Delta\eta_{i,B}) = \text{rect} \left\{ \frac{\eta - \Delta\eta_{i,B}}{L_{WVN}} \right\} = \begin{cases} 1, & \eta \leq \left| \Delta\eta_{i,B} - \frac{L_{WVN}}{2} \right| \\ 0, & \eta > \left| \Delta\eta_{i,B} - \frac{L_{WVN}}{2} \right| \end{cases}. \quad (12)$$

식 (12)에서 L_{WVN} 는 SAR 영상을 추출하기 위한 방위 블락의 길이를 의미한다.

식 (11)의 방위 블락 영상에 대한 잔여 오차 보상을 위해서는 먼저 식 (13)과 같이 $I_{EOKA}'(r, \eta; \Delta\eta_i)$ 에 대한 거리-도플러 영상 $H_{EOKA}'(r, f_\eta; \Delta\eta_i)$ 을 획득한다.

$$H_{EOKA}'(r, f_\eta; \Delta\eta_i) = FT_{\eta \rightarrow f_\eta} [I_{EOKA}'(r, \eta; \Delta\eta_i)] = \text{sinc}(r - r_i) \exp[-j\Delta\varphi_i(f_\eta)]. \quad (13)$$

다음으로 식 (13)의 거리-도플러 영상에서 표적 샘플 i 에 대한 도플러 위상 $\Delta\varphi_i(f_\eta)$ 에 대한 보상이 수행되며, 이를 위해서는 식 (7)에서의 $\varphi_{occ}(f_\eta; r_i; \eta_i)$ 와 $\varphi_{occ}(f_\eta; r_i; \eta_B)$ 을 각각 계산하여야 한다.

$\varphi_{occ}(f_\eta; r_i; \eta_i)$ 는 식 (4)의 결과에 대한 위상함수이며, 이는 $R_{occ}(\eta; r_i; \eta_i)$ 를 5차 다항식의 형태로 모델링한 후 식 (14)와 같이 정지위상 근사(stationary phase approximation)를 통해 계산할 수 있다^[6].

$$\varphi_{occ}(f_\eta; r_i; \eta_i) = \frac{4\pi f_c}{c} R_{occ}[\eta^*(f_\eta); r_i; \eta_i] - 2\pi f_\eta \eta^*(f_\eta). \quad (14)$$

식 (14)에서 $\eta^*(f_\eta)$ 는 정지위상 근사 점(stationary phase point)으로써 이는 식 (15)를 만족하는 방위시간이다.

$$\frac{d}{d\eta} \left[\frac{4\pi f_c}{c} R_{occ}(\eta; r_i; \eta_i) - 2\pi f_\eta \eta \right]_{\eta=\eta^*(f_\eta)} = 0. \quad (15)$$

유사하게, $\varphi_{occ}(f_\eta; r_i; \eta_B)$ 또한 식 (14)의 과정으로 계산할 수 있으며 $\varphi_{occ}(f_\eta; r_i; \eta_i)$ 와 $\varphi_{occ}(f_\eta; r_i; \eta_B)$ 을 통해 식 (7)을 계산함으로써 식 (16)과 같이 방위 블락 필터를 획득할 수 있다. 방위 블락 필터를 이용한 방위 블락 영상의 잔여오차 보상 결과는 식 (17)과 같다.

$$h_i(f_\eta) = \exp[j\Delta\varphi_i(f_\eta)]. \quad (16)$$

$$H_{EOKA}''(r, f_\eta; \Delta\eta_i) = H_{EOKA}'(r, f_\eta; \Delta\eta_i) \times h_i(f_\eta). \quad (17)$$

3-2 방위 블락 영상의 결합

잔여오차 보상 후의 방위 블락 영상은 식 (17)에 대한 역푸리에 변환을 통해 생성되며, 이에 대한 결과는 식 (18)과 같다.

$$I_{EOKA}''(r, \eta; \Delta\eta_i) = IF T_{f_\eta \rightarrow \eta} [H_{EOKA}'(r, f_\eta; \Delta\eta_i)] = \text{sinc}(r - r_i) \text{sinc}(\eta). \quad (18)$$

식 (18)에서 식 (9)의 영상 블러링 항 $D_i(\eta)$ 는 $\Delta\varphi_i(f_\eta)$ 내 비선형 변화항 $\Delta\epsilon(f_\eta; r_i; \eta_i)$ 의 보상을 통해 보상되는 것을 확인할 수 있다. 그러나 $\Delta\varphi_i(f_\eta)$ 의 보상 과정에서 비선형 변화 항 $\Delta\epsilon(f_\eta; r_i; \eta_i)$ 과 더불어 표적의 방위 위치

를 결정하는 $2\pi f_\eta \Delta\eta_i = 2\pi f_\eta (\eta_i - \eta_B)$ 도 함께 보상되므로, 방위 블록 영상의 중심은 본래의 위치 $\Delta\eta_i$ 가 아닌 표적 B의 기준위치 $\eta_B = 0$ 인 위치에 위치하게 된다. 따라서, 식 (18)에서 방위 블록 영상의 본래 위치인 $\Delta\eta_i$ 에 위치하도록 영상을 천이(shift)시켜야 하며, 방위 블록 영상에 대한 천이결과는 식 (19)와 같다.

$$I_{EOKA}''(r, \eta; \Delta\eta_i) = \text{sinc}(r - r_i) \text{sinc}(\eta - \Delta\eta_i). \quad (19)$$

식 (8)~식 (19)의 과정을 통해 방위 분포 표적 샘플별 잔여 오차 보상을 블록 영상 단위로 각각 수행한 후 잔여 오차가 보상된 모든 방위 블록 영상들 $[I_{EOKA}''(r, \eta; \Delta\eta_i)]$ 을 결합함으로써, 식 (20)과 같이 SAR 영상의 품질을 개선할 수 있다.

$$I_{EOKA}''(r, \eta) = \sum_{i=A, B, C} \text{sinc}(r - r_i) \text{sinc}(\eta - \Delta\eta_{i, B}). \quad (20)$$

그림 2는 제안된 후처리 알고리즘의 전체 과정을 도시한다.

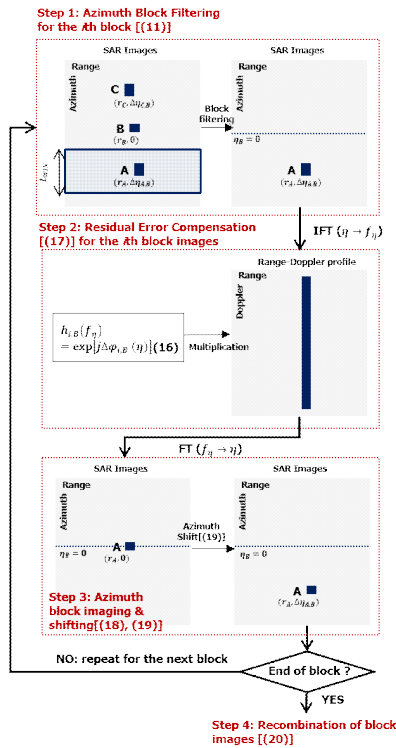


그림 2. 제안된 알고리즘의 흐름도
Fig. 2. Processing flow of proposed method.

IV. 시뮬레이션 결과

본 절에서는 제안된 후처리 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 점표적을 이용한 SAR 영상생성 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 1(b)에서의 레이다는 곡선의 궤도를 $V_{\text{radar}} = 7,584$ m/s의 속도로 이동하며, 방위 방향으로 분포한 표적 A, B, C를 5초 동안 스포트라이트(spot-light) 모드로 관측하였다. 이 때 표적 A, C는 완전 구형의 지구 표면(지구 반지름=6,3741 km)에 위치한 표적 B의 고도를 기준으로 50 m, 그리고 -50 m의 고도에 각각 위치한다. 본 시뮬레이션에서 사용된 파라미터는 표 1에 정리되어 있다.

그림 1(b), 그리고 표 1의 시뮬레이션 파라미터를 사용하여 생성된 레이다 신호는 그림 3과 같으며, 생성된 레

표 1. 시뮬레이션 파라미터
Table 1. Simulation parameters.

Satellite height	550 km
Height of A, B, C with respect to earth surface	50 m, 0 m, -50 m
Satellite's velocity	7,584 m/s
Integration time	5 s
Carrier frequency	10 GHz
Radar bandwidth	500 MHz
Doppler bandwidth	21.56 kHz
Pulse repetition frequency	5 kHz
Pulse width	2 us

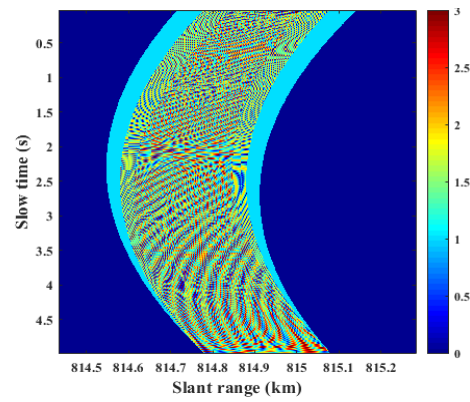


그림 3. SAR 수신신호
Fig. 3. SAR received signal.

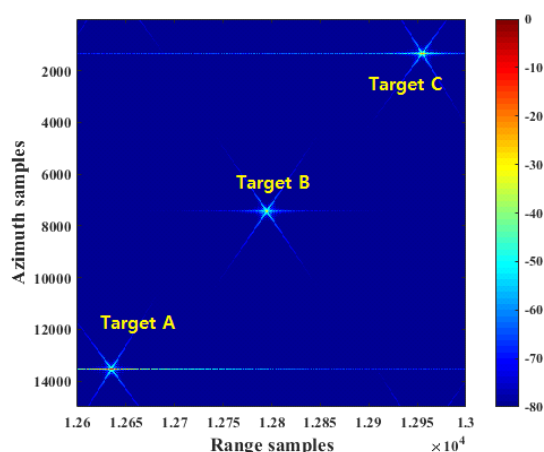
이다 신호를 이용하여 참고문헌 [6]의 방법을 통해 곡선 기하에서의 SAR 영상을 생성하였다. 생성된 SAR 영상에 대해 제안된 후처리 알고리즘을 수행하기 전, 후의 SAR 영상은 그림 4(a), 그림 4(b)에 각각 도시되어 있다.

그림 4(a) 내 표적 A, B, C의 점표적 영상은 그림 5와 같으며, 이에 대한 품질 파라미터는 표 2에 정리되어 있다. 그림 5(b)에서 확인할 수 있는 바와 같이 관측영역 중심에 위치한 표적 B의 경우, 참고문헌 [6]에서의 방위압축 결과로 초점이 맞는 SAR 영상이 형성되는 반면, 표적

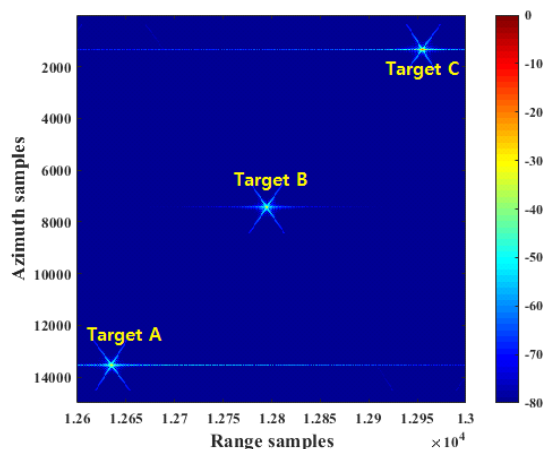
표 2. 그림 5에 대한 영상품질 파라미터

Table 2. Image quality parameters in Fig. 5.

	PSLR(dB)	ISLR(dB)	IRW(samples)
Target A	Rg.: -13.2565	Rg.: -10.1848	Rg.: 68
	Az.: -12.5087	Az.: -9.3893	Az.: 94
Target B	Rg.: -13.2661	Rg.: -10.1842	Rg.: 68
	Az.: -13.2753	Az.: -10.2371	Az.: 93
Target C	Rg.: -13.2443	Rg.: -10.1698	Rg.: 67
	Az.: -12.3991	Az.: -9.2610	Az.: 94



(a) 제안된 알고리즘 수행 전
(a) Before proposed method



(b) 제안된 알고리즘 수행 후
(b) After proposed method

그림 4. SAR 영상

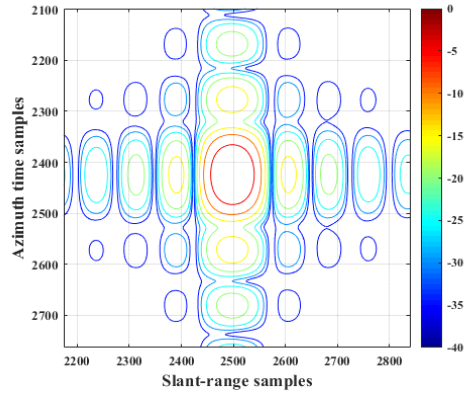
Fig. 4. SAR images.

A, C의 경우 방위 위치의 변화에 따른 고도 차이로 인해 그림 5(a), 그리고 그림 5(c)와 같이 SAR 영상이 방위방향으로 블러링 됨을 확인할 수 있다. 본 결과는 참고문헌 [6]에서 제안된 방법만으로는 방위방향으로 분포된 표적의 잔여오차를 보상할 수 없다는 것을 의미하며, 이를 해결하기 위한 추가 후처리 과정이 필요함을 보여준다.

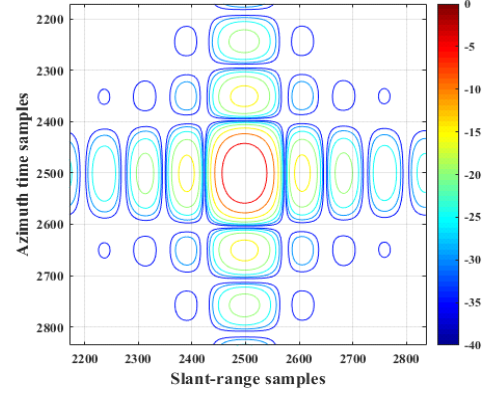
그림 4(a)에 제안된 후처리 알고리즘을 적용한 결과는 그림 4(b)와 같다. 여기서, 본 시뮬레이션에서는 제안된 알고리즘(그림 2)을 수행하기 위해 표적 샘플 A, B, C의 방위 위치를 중심으로 3개의 방위 블락 영상을 형성하여 잔여 오차를 보상하였으며, 그림 6 그리고 표 3은 그림 4(b) 내 표적 A, B, C에 대한 점표적 SAR 영상 및 품질 파라미터를 도시한다. 그림 5와 그림 6 내 표적 A, C의 영상을 비교해 보았을 때, 제안된 알고리즘 적용 후 SAR 영상의 품질, 특히 방위 방향으로의 영상 품질이 개선됨을 확인할 수 있으며 이는 제안된 알고리즘이 방위 분포의 잔여 오차를 성공적으로 보상함으로써 SAR 영상의 품질을 향상시킴을 확인시켜 준다.

V. 결과 고찰

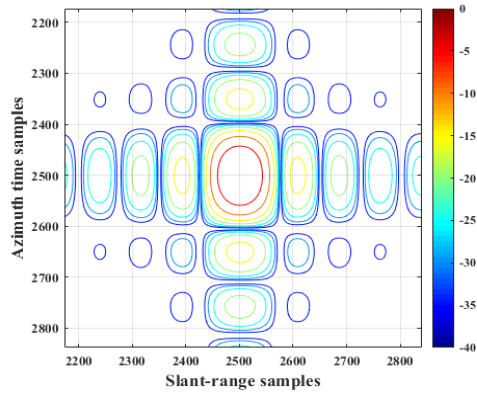
실제 SAR 영상의 경우, 이산(discrete) 형태의 점표적이 아닌 연속(continuous)적으로 분포한 지형/지물을 촬영하게 된다. 이때 실제 상황에서 제안된 알고리즘을 수행하기 위해서는 후처리 알고리즘을 적용하기 위한 블락 영상의 중심 및 크기(L_{WIN}), 그리고 방위 블락 영상 간 간격을 적절히 설정하는 것을 고려해야 하지만^[7], 본 논문에서는 제안된 알고리즘의 실행가능성(feasibility) 확인을



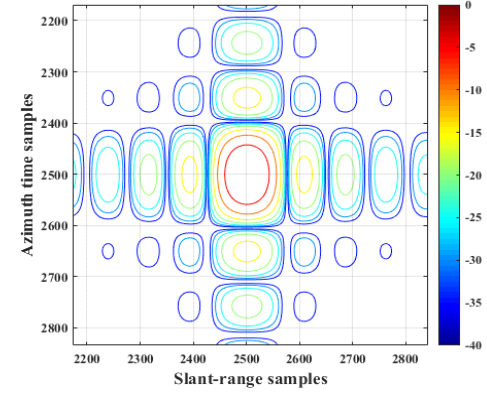
(a) 표적 A
(a) Target A



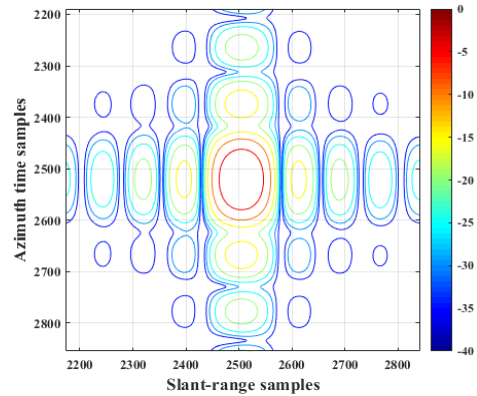
(a) 표적 A
(a) Target A



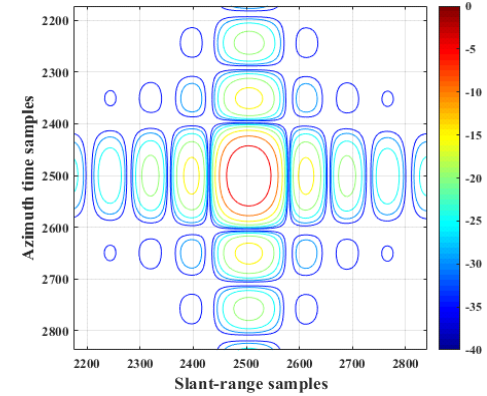
(b) 표적 B
(b) Target B



(b) 표적 B
(b) Target B



(c) 표적 C
(c) Target C



(c) 표적 C
(c) Target C

그림 5. 그림 4(a) 내 표적들에 대한 SAR 영상
Fig. 5. SAR images for targets in Fig. 4(a).

그림 6. 그림 4(b) 내 표적들에 대한 SAR 영상
Fig. 6. SAR images for targets in Fig. 4(b).

표 3. 그림 6에 대한 영상품질 파라미터

Table 3. Image quality parameters in Fig. 6.

	PSLR(dB)	ISLR(dB)	IRW(samples)
Target A	Rg.: -13.2670	Rg.: -10.1845	Rg.: 68
	Az.: -13.2753	Az.: -10.2389	Az.: 93
Target B	Rg.: -13.2669	Rg.: -10.1842	Rg.: 68
	Az.: -13.2763	Az.: -10.2383	Az.: 93
Target C	Rg.: -13.2653	Rg.: -10.1699	Rg.: 67
	Az.: -13.2743	Az.: -10.2380	Az.: 93

주 목적으로 방위 방향으로 분포한 3개의 점표적 샘플들에 대한 영상 품질 개선만을 확인하였다. 즉, 제안된 알고리즘의 실효성(practicality)을 검증하기 위해서는 방위 블록 영상 크기 및 블록 영상 간 간격 설정에 대한 부분을 면밀히 분석해야 하며, 이에 대한 연구는 향후 추가적으로 수행할 예정이다.

VI. 결 론

본 논문에서는 곡선기하에서 방위방향으로 분포된 표적들의 잔여 오차를 보상하는 후처리 알고리즘을 제안하였다. 제안된 후처리 알고리즘을 수행하기 위해 먼저 생성된 SAR 영상에 대한 방위 블록 필터링을 수행한 후, 해당 블록 영상에 대한 잔여 오차를 계산하여 보상하였다. 이때 상기 블록 단위의 잔여 오차 보상과정을 모든 방위 분포 표적 샘플들에 대해 반복하여 수행하였으며, 최종적으로 잔여 오차 보상이 완료된 방위 블록 영상들을 결합함으로써 SAR 영상의 품질을 향상시킬 수 있었다. 제안된 후처리 알고리즘의 효용성을 검증하기 위해 점표적을 이용한 시뮬레이션을 수행하였으며, 시뮬레이션 결과를 통해 제안된 후처리 알고리즘이 방위 분포 표적 샘플들의 잔여 오차를 성공적으로 보상하여 SAR 영상의 품질을 향상시킨다는 것을 확인할 수 있었다.

References

- [1] I. G. Cumming, F. H. C. Wong, *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation*, Norwood, MA, Artech House, 2005.
- [2] D. H. Kim, S. H. Park, and K. T. Kim, "SAR motion compensation using GPS/IMU," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 22, no. 1, pp. 16-23, Jan. 2011.
- [3] S. H. Park, I. S. Choi, and B. L. Cho, "A study on the azimuth direction extrapolation for SAR image using ω - κ algorithm," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 23, no. 8, pp. 1014-1017, Aug. 2012.
- [4] F. K. Li, D. N. Held, J. C. Curlander, and C. Wu, "Doppler parameter estimation for spaceborne synthetic aperture radar," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. GE-23, no. 1, pp. 47-56, May 1997.
- [5] K. Eldhuset, "High-resolution spaceborne SAR processing using the decomposed transfer function," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 53, no. 5, pp. 2187-2198, Oct. 2017.
- [6] B. S. Kang, K. Lee, "A study on ultra high resolution SAR imaging for curved orbit geometry using extended omega-K algorithm," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 31, no. 5, pp. 437-445, May. 2020.
- [7] K. A. C. de Macedo, R. Scheiber, "Precise topography- and aperture-dependent motion compensation for airborne SAR," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 2, no. 2, pp. 172-176, Apr. 2005.

강 병 수 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-0377-1321>



2012년 2월: 영남대학교 전자공학과 (공학사)

2014년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)

2018년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)

2018년 3월~2018년 4월: 포항공과대학교

박사 후 연구원

2018년 5월~현재: 국방과학연구소 선임연구원

[주 관심분야] 레이더 신호처리, ISAR 영상처리, SAR 영상처리, SAR 검보정

이 기 웅 [국방과학연구소/연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-3968-2822>



2015년 8월: 한국항공대학교 전자 및 항공전자공학과 (공학사)

2017년 2월: 한국항공대학교 항공전자정보공학과 (공학석사)

2017년 2월~현재: 국방과학연구소 연구원

[주 관심분야] SAR 신호처리, SAR 원격탐사, SAR 검보정