

확장 오메가-케이 알고리즘을 기반한 곡선기하에서의 초고해상도 SAR 영상생성 연구

Ultra-High Resolution SAR Imaging for Curved Geometry Using the Extended Omega-K Algorithm

강 병 수 · 이 기 응

Byung-Soo Kang · Keewoong Lee

요 약

기존의 합성개구면레이다(synthetic aperture radar: SAR) 영상 생성에 대표적으로 활용되는 알고리즘들은 대부분 직선 기하에서의 hyperbolic-range-equation(HRE) 수학모델을 기반한다. 그러나 위성과 같이 곡선의 기하를 기반으로 운용되는 SAR 시스템의 경우, HRE 모델오차가 발생하게 되고, 이는 초고해상도의 SAR 영상 생성 시 HRE 모델 기반의 알고리즘들에 대한 심각한 품질 저하를 초래한다. 따라서 본 논문에서는 확장 오메가-케이 알고리즘(extended omega-K algorithm: EOKA)을 기반한 곡선기하에서의 SAR 영상생성 처리체계(processing chain)를 제안한다. 제안된 처리체계에서는 먼저 궤도보상과정을 통해 HRE 모델의 영향을 완화시킨 후 EOKA를 수행한다. 다음으로 다항식 기반의 방위압축과정을 수행함으로써 HRE 모델오차에 대한 SAR 영상의 품질 저하를 보상한다. 점표적을 이용한 시뮬레이션에서는 제안된 처리체계를 통해 곡선기하에서 초고해상도의 SAR 영상생성이 성공적으로 형성됨을 확인하였다.

Abstract

Conventional algorithms based on synthetic aperture radar(SAR) mainly assume that slant-range variations between the radar and target are represented by a hyperbolic-range-equation(HRE) model. However, this HRE model assumption is not valid for spaceborne SAR systems owing to their curved geometry; this significantly degrades performance of the conventional SAR-based algorithms, especially when requiring ultra-high resolution. Therefore, in this paper, we propose a SAR processing chain for curved-orbit geometry using the extended omega-K algorithm(EOKA). In the proposed method, orbit compensation is first applied to mitigate the effect of the HRE error, after which EOKA is performed. Next, azimuth compression is performed based on the polynomial range model, which compensates for the defocusing of SAR images caused by the HRE model error. Through simulations, we verified that the proposed method could provide focused SAR images for curved-orbit and ultra-high resolution cases.

Key words: Curved-Orbit, Omega-K Algorithm, Synthetic Aperture Radar(SAR), Spaceborne SAR, Ultra High Resolution

I. 서 론

합성개구면레이다(synthetic aperture radar: SAR)는 이동하는 레이더가 관심지역에 대한 전자기적 반사특성을 2

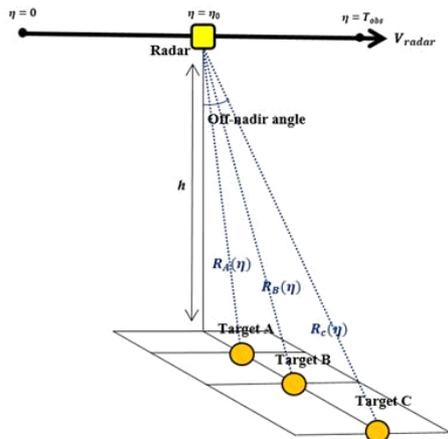
국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received February 20, 2020 ; Revised March 24, 2020 ; Accepted May 26, 2020. (ID No. 20200220-015)

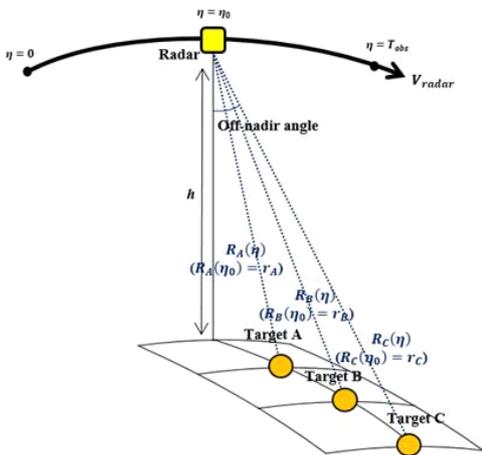
· Corresponding Author: Byung-Soo Kang (e-mail:qudtn109@add.re.kr)

차원의 형태로 영상화하는 시스템이다. SAR의 경우, 기존 광학 센서와는 달리 주야 및 전천후로 원거리 지역을 관측할 수 있기 때문에 국방 및 민간의 산업 분야에서 다양하게 활용되고 있다.

일반적으로 SAR는 레이더 탑재체의 형태에 따라 항공기 SAR와 위성 SAR로 구분된다. 항공기 SAR의 경우, 그림 1(a)와 같이 레이더가 직선으로 움직이며 대상지역을 관측하는 반면, 궤도상에서 이동하며 지구 표면을 관측하는 위성 SAR의 경우 그림 1(b)와 같이 곡선의 기하에서



(a) 직선기하
(a) Rectilinear geometry



(b) 곡선기하
(b) Curved geometry

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

레이더 반사신호를 획득하게 된다.

여기서 SAR 영상 생성을 위해 대표적으로 활용되는 거리-도플러 알고리즘(range-Doppler algorithm: RDA), 처프 스케일링 알고리즘(chirp-scaling algorithm: CSA), 오메가-케이 알고리즘(omega-K algorithm: OKA)들은 모두 그림 1(a) 내 직선기하에서의 hyperbolic-range equation (HRE) 수학 모델을 기반으로 한다^[1]. 따라서 항공기 SAR는 요동보상(motion compensation) 및 자동초점기법(autofocus)을 동반한 HRE 기반 알고리즘들을 통해 초점이 맞는 SAR 영상을 생성할 수 있다. 그러나 위성 SAR에서는 그림 1(b)의 곡선기하 특성으로 인해 HRE 모델 오차가 발생하게 된다. HRE 모델 오차는 상기 HRE 기반 알고리즘들의 성능 저하를 초래하며, 특히 이는 센티미터(centimeter) 단위의 초고해상도 SAR 영상 생성 시 심각한 품질 저하를 초래하므로 곡선 기하에서의 신호 특성 분석을 기반한 SAR 영상 생성에 대한 연구는 반드시 필요하다^{[2]~[5]}. 현재 국내에서는 SAR와 관련된 다양한 연구들이 진행 중에 있지만, 이들은 대부분 직선 기하에서의 항공기 SAR 영상 생성에 관한 것으로써^{[6]~[8]}, 곡선기하에서의 SAR 영상 생성을 위한 연구는 아직 미진한 상황이다.

본 논문에서는 곡선기하에서의 신호 특성 분석을 기반한 SAR 영상생성 처리체계(processing chain)를 제안하였다. 제안된 처리체계의 특징은 SAR 영상생성 전 궤도보상(orbit compensation)을 수행함으로써 HRE 모델 오차에 대한 영향을 완화(mitigation)시킨다는 점, 그리고 기존의 HRE 모델 대신 다항식 거리 모델(polynomial range equation mode) 기반의 방위방향압축을 수행한다는 점이다. 특히 곡선기하에서의 HRE 모델 오차가 방위영상으로의 심각한 품질 저하를 야기한다는 점에서 다항식 기반의 방위압축수행은 곡선기하에서 SAR 영상생성을 하는데 매우 중요한 요소이다.

여기서 상기 제안된 처리체계에서는 OKA의 개선 알고리즘인 확장 오메가 케이 알고리즘(extended omega-K algorithm: EOKA)을 사용한다^[9]. EOKA는 기존 OKA와는 달리 방위압축을 제외한 range cell migration compensation (RCMC) 그리고 secondary range compression(SRC) 과정만을 수행하기 때문에 HRE 기반 방위압축 대신 다항식 모델 기반의 방위압축 수행을 가능하게 한다. 또한 EOKA

의 경우, HRE 수학 모델에 대한 근사식을 기반하지 않기 때문에 CSA, RDA에 비해 초고해상 운용에서의 강인성(robustness)을 가진다. 제안된 처리체계의 성능을 검증하기 위해 점표적을 이용한 시뮬레이션을 수행하였으며, 이는 제안된 처리체계를 통해 곡선기하에서 초고해상도 SAR 영상이 성공적으로 생성됨을 확인하였다.

II. 곡선기하에서의 SAR 신호특성

본 논문에서는 곡선 기하에서의 SAR 신호특성 분석을 용이하게 하기 위해 그림 1(b)의 표적 $i = A, B, C$ 를 이용하여 그림 2와 같이 등가 직선 기하로의 변환을 수행하였다. 이때, 그림 1(b)의 각 표적은 레이더 가시선 방향(radar line of sight: RLOS)으로 분포해 있으며, 그림 2의 r_i 는 제로-도플러(zero-Doppler) 시간 η_0 에서 정의되는 각 표적의 최 근접 거리(closest distance)를 나타낸다. 그림 2의 등가 직선기하 모델에서 등가 레이더 속도 V_{eff} 는 레이더-표적 간 거리변화 $R_i(\eta)$ ($i = A, B, C$)의 HRE 모델 오차를 최소화하는 값으로써, 본 논문에서는 황금-분할 탐색기법(golden-section search)을 통해 식 (1)을 최소화하는 값을 추정함으로써 획득하였다.

$$C(V_{EFF}) = \sum_{i=A,B,C} \left[\int \| R_i(\eta) - \sqrt{r_i^2 + V_{EFF}^2(\eta - \eta_i)^2} \| d\eta \right]. \quad (1)$$

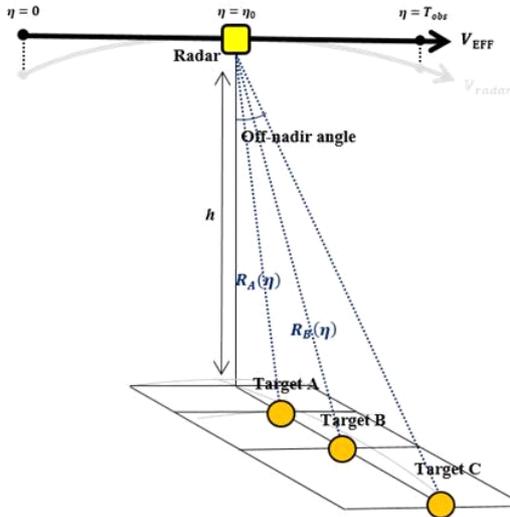


그림 2. 등가직선기하 SAR 영상생성 기하구조
Fig. 2. Equivalent rectilinear geometry for SAR imaging.

그림 1(b)에서 방위시간 η 에 따른 레이더-표적 간 거리 변화 $R_i(\eta)$ 는 그림 2에 대한 HRE 수학 모델을 이용하여 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R_i(\eta) = \sqrt{r_i^2 + V_{EFF}^2(\eta - \eta_i)^2} + \epsilon_i^{hyp}(\eta) = R_i^{hyp}(\eta) + \epsilon_i^{hyp}(\eta). \quad (2)$$

여기서

$$R_i^{hyp}(\eta) = \sqrt{r_i^2 + V_{EFF}^2(\eta - \eta_i)^2} \quad (3)$$

표적 $i = A, B, C$ 에 대한 HRE를 나타내며, V_{eff} 는 식 (1)의 최솟값인 등가 레이더 속도이다. 상기 식 (2)에서 $\epsilon_i^{hyp}(\eta)$ 는 등가 기하직선 모델 변환 과정에 따른 HRE 모델 오차이다.

표적 $i = A, B, C$ 의 처프(chirp) 레이더 수신신호에 대한 정합필터링(matched filtering)과정 후 이를 $f_\tau - \eta$ 영역에서 나타내면 식 (4)와 같다^[1].

$$E_s(f_\tau, \eta) = \sum_{i=A,B,C} \sigma_i \exp \left[-j \frac{4\pi}{c} (f_\tau + f_c) R_i(\eta) \right] = \sum_{i=A,B,C} \sigma_i \exp \left[-j \frac{4\pi}{c} (f_\tau + f_c) R_i^{hyp}(\eta) \right] \times \exp \left[-j \frac{4\pi}{c} (f_\tau + f_c) \epsilon_i^{hyp}(\eta) \right]. \quad (4)$$

여기서 σ_i 는 표적 $i = A, B, C$ 에 대한 레이더 반사계수, f_τ 는 거리시간(fast-time) τ 에 대한 주파수, c 는 빛의 속도, f_c 는 레이더 중심주파수를 나타낸다. 상기 식 (4)에서 HRE 모델 오차 $\epsilon_i^{hyp}(\eta)$ 는 HRE 기반 SAR 영상생성 알고리즘 적용 시 SAR 영상의 품질을 저하시키며, 특히 이는 방위방향으로의 심각한 영상 블러링을 초래한다.

III. 곡선기하에서의 SAR 영상생성 기법

본 절에서는 곡선기하에서의 SAR 영상생성을 위한 처리체계를 소개한다. 제안된 처리체계에서는 먼저 궤도보상과정을 통해 HRE 모델 오차 $\epsilon_i(\eta)$ 의 영향을 완화시킨 후(3.1절), EOKA 알고리즘을 수행한다(3.2절). 다음으로, 다항식 거리모델 기반의 방위압축 과정을 통해 $\epsilon_i(\eta)$ 에 대한 보상을 수행함으로써 곡선기하에서의 SAR 영상을 생성한다(3.3절).

3-1 궤도보상과정

궤도보상과정은 촬영영역 중심(swath center)에 위치한

기준표적 B의 HRE 모델오차를 보상하는 과정으로써 $f_\tau - \eta$ 영역에서의 레이더 신호 $E_s(f_\tau, \eta)$ 에 대하여 아래의 식 (5)와 같이 수행된다.

$$\begin{aligned} E'_s(f_\tau, \eta) &= E_s(f_\tau, \eta) \exp \left[j \frac{4\pi(f_\tau + f_c)}{c} \epsilon_B^{hyp}(\eta) \right] \\ &= \sum_{i=A,B,C} \sigma_i \exp \left[-j \frac{4\pi(f_\tau + f_c)}{c} R_{i,oco}(\eta) \right] \\ &= \sum_{i=A,B,C} \sigma_i \exp \left[-j \frac{4\pi(f_\tau + f_c)}{c} R_i^{hyp}(\eta) \right] \\ &\quad \times \exp \left[-j \frac{4\pi(f_\tau + f_c)}{c} \epsilon_{i,oco}^{hyp}(\eta) \right]. \end{aligned} \quad (5)$$

상기 식 (5)에서 $R_{i,oco}(\eta) = R_i(\eta) - \epsilon_B^{hyp}(\eta)$ 는 궤도보상 후 레이더-표적 간 거리변화이며, 이는 아래의 식 (6)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} R_{i,oco}(\eta) &= R_i^{hyp}(\eta) + [\epsilon_i^{hyp}(\eta) - \epsilon_B^{hyp}(\eta)] \\ &= R_i^{hyp}(\eta) + \epsilon_{i,oco}^{hyp}(\eta). \end{aligned} \quad (6)$$

식 (6)에서, $\epsilon_{i,oco}^{hyp}(\eta) = \epsilon_i^{hyp}(\eta) - \epsilon_B^{hyp}(\eta)$ 는 궤도보상 후의 각 표적별 HRE 모델오차이다. 궤도보상과정을 통해 표적 B에 대한 HRE 모델오차는 완전히 보상되지만 $[\epsilon_{B,oco}^{hyp}(\eta) = 0]$, 표적 A, C의 경우, 잔여 HRE 모델 오차가 존재하게 된다. 즉, 본 궤도보상과정은 HRE 모델 오차 성분의 영향성을 완화시키는 과정으로써 궤도보상 후의 잔여 HRE 모델 오차는 다항식 기반의 방위압축을 통해 보상하게 된다.

3-2 EOKA 과정

EOKA를 수행하기 위해서는 먼저 $E_s(f_\tau, \eta)$ 에 대한 η 방향으로의 푸리에 변환(Fourier transform)을 통해 2차원 주파수 영역에서의 레이더 신호 $E_s(f_\tau, f_\eta)$ 를 획득하여야 한다. 이때 f_η 는 방위시간 η 에 대한 도플러 주파수로서 정의된다. 고해상의 SAR 영상 형성에 있어 도플러 주파수의 대역폭이 펄스 반복 주파수(pulse repetition frequency: PRF)보다 작을 경우, 도플러 주파수 에일리어싱(aliasing) 왜곡이 발생하게 된다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 참고문헌 [5]에서의 방위방향 de-ramping 기법을 수행함으로써 도플러 에일리어싱에 대한 문제를 해결하였다.

방위방향 de-ramping 후 η 에 대한 푸리에 변환을 수행함으로써 식 (5)는 아래의 식 (7)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} E'_s(f_\tau, f_\eta) &= \sum_{i=A,B,C} \sigma_i \exp \left[-j \frac{4\pi(f_\tau + f_c)}{c} R_i^{hyp}(f_\eta) \right] \\ &\quad \times \exp \left[-j \frac{4\pi(f_\tau + f_c)}{c} \epsilon_{i,oco}^{hyp}(f_\eta) \right] \\ &= \sum_{i=A,B,C} \sigma_i \exp \left[-j r_i \Phi^{hyp}(f_\tau, f_\eta) \right] \\ &\quad \times \exp \left[-j \frac{4\pi(f_\tau + f_c)}{c} \epsilon_{i,oco}^{hyp}(f_\eta) \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)에서 HRE 모델의 2차원 주파수 위상으로써 정의되는 $4\pi(f_\tau + f_c)R_i^{hyp}(f_\eta)/c$ 는 정지위상 근사(stationary phase approximation)을 통해 구해지며, 그 결과는 식 (8-1)과 같이 r_i 와 $\Phi^{hyp}(f_\tau, f_\eta)$ 의 곱으로 표현될 수 있다. 이때 $\Phi^{hyp}(f_\tau, f_\eta)$ 는 아래의 식 (8-2)와 같이 정의된다[1].

$$\frac{4\pi(f_\tau + f_c)}{c} R_i^{hyp}(f_\eta) = r_i \Phi(f_\tau, f_\eta). \quad (8-1)$$

$$\Phi^{hyp}(f_\tau, f_\eta) = \frac{4\pi}{c} \sqrt{(f_\tau + f_c)^2 - \frac{c^2 f_\eta^2}{4v_{eff}^2}}. \quad (8-2)$$

EOKA는 상기 식 (7) 내 $r_i \Phi^{hyp}(f_\tau, f_\eta)$ 에서의 RCMC 및 SRC와 관련된 항을 보상하는 알고리즘으로써, modified-reference multiplication(M-RFM)과 modified stolt interpolation(M-SI)으로 나뉘어 수행된다. 여기서 M-RFM, 그리고 M-SI 모두 방위압축과 관련된 도플러 주파수 성분인 $\Phi^{hyp}(f_\tau = 0, f_\eta)$ 을 보존하며, 이는 EOKA 수행 후 거리-도플러 영역에서 방위압축을 독립적으로 수행 가능하게 한다. 또한 EOKA는 2차원 HRE 모델 주파수 위상[식 (8-2)]에 대하여 f_τ 에 대한 근사 모델을 사용하지 않기 때문에 CSA, RDA에 비해 초고해상 운용에서의 강인성을 가진다.

EOKA에서는 먼저 식 (9)에 정의된 M-RFM 필터를 이용하여 기준표적 B에 대한 RCMC 및 SRC를 아래의 식 (10)과 같이 수행한다.

$$\begin{aligned} h_{MRFM}(f_\tau, f_\eta) &= \exp \left\{ j r_B [\Phi^{hyp}(f_\tau, f_\eta) - \Phi^{hyp}(0, f_\eta)] \right\}. \end{aligned} \quad (9)$$

$$\begin{aligned} E'_{s,MRFM}(f_\tau, f_\eta) &= E'_s(f_\tau, f_\eta) h_{MRFM}(f_\tau, f_\eta) \\ &= \sum_{i=A,B,C} \sigma_i \exp \left[-j(r_i - r_B) \Phi^{hyp}(f_\tau, f_\eta) \right] \\ &\quad \times \exp \left[-j \frac{4\pi(f_\tau + f_c)}{c} \epsilon_{i,oco}^{hyp}(f_\eta) \right] \\ &\quad \times \exp \left[-j r_B \Phi^{hyp}(0, f_\eta) \right]. \end{aligned} \quad (10)$$

다음으로, M-SI를 통해 식 (11)을 만족하는 거리방향 주파수 f_τ^{MSI} 으로 식 (10)을 재정의함으로써 M-RFM 후 표적 A, C에 대한 잔여 RCM 보상 및 SRC를 수행하게 된다.

$$\Phi^{hyp}(f_\tau, f_\eta) = \frac{4\pi}{c} f_\tau^{MSI} + \Phi^{hyp}(0, f_\eta). \quad (11)$$

식 (10)에 대한 M-SI 수행결과는 아래의 식 (12)와 같다.

$$\begin{aligned} E'_{s, MRFM}(f_\tau^{MSI}, f_\eta) &= \sum_{i=A,B,C} \sigma_i \exp \left\{ -j \frac{4\pi}{c} [(r_i - r_B) + \Delta r_{\epsilon_i, oco}^{hyp}(f_\eta)] f_\tau^{MSI} \right\} \\ &\quad \times \exp \left\{ -j \left[r_i \Phi(0, f_\eta) + \frac{4\pi f_c}{c} \epsilon_{i, oco}^{hyp}(f_\eta) \right] \right\}. \end{aligned} \quad (12)$$

식 (12)에서 $\Delta r_{\epsilon_i, oco}^{hyp}(f_\eta)$ 는 HRE 모델 오차에 의한 잔여 RCMC 성분으로써 이는 거리방향으로의 영상 열화를 야기하지만, 본 논문 4장에 도시된 초고해상도 SAR 영상생성 시뮬레이션 결과에서는 $\Delta r_{\epsilon_i, oco}^{hyp}(f_\eta)$ 의 영향이 무시가능하다는 것을 확인할 수 있었다.

3.3 다항식 모델 기반 방위방향압축 과정

$E'_{s, MRFM}(f_\tau^{MSI}, f_\eta)$ [식 (12)]에 대한 f_τ^{MSI} 으로의 푸리에 변환을 통해 거리압축이 수행된 레이다 신호는 식 (13-1)과 같다.

$$\begin{aligned} H_{EOKA}(r, f_\eta) &\cong \sum_{i=A,B,C} \text{sinc}[r - (r_i - r_B)] \\ &\quad \times \exp \left\{ -j \left[r_i \Phi(0, f_\eta) + \frac{4\pi f_c}{c} \epsilon_{i, oco}^{hyp}(f_\eta) \right] \right\} \\ &= \sum_{i=A,B,C} \text{sinc}[r - (r_i - r_B)] \exp[-j \varphi_{i, oco}^{az}(f_\eta)]. \end{aligned} \quad (13-1)$$

$$\varphi_{i, oco}^{az}(f_\eta) = r_i \Phi(0, f_\eta) + \frac{4\pi f_c}{c} \epsilon_{i, oco}^{hyp}(f_\eta) = \frac{4\pi f_c}{c} R_{i, oco}(f_\eta). \quad (13-2)$$

식 (13-1)에 대하여 기존 HRE 도플러 위상 모델 $r_i \Phi^{hyp}(0, f_\eta)$ 을 이용하여 방위압축을 수행할 경우, 모델 오차 $\epsilon_{i, oco}^{hyp}(f_\eta)$ 에 의해 방위영상으로의 블러링이 발생하게 된다.

상기 문제를 해결하기 위해 본 논문에서는 $R_{i, oco}(\eta)$ [식

(6)]을 식 (14)와 같이 5차 다항식의 형태로 모델링하여 $R_{i, oco}(\eta)$ 에 대한 모델오차를 최소화한다^[3].

$$R_{i, oco}(\eta) = \sum_{p=0}^5 a_{i,p} \eta^p. \quad (14)$$

다음으로 식 (13-2)의 $\varphi_{i, oco}^{az}(f_\eta)$ 을 식 (14)의 다항식 모델을 기반으로 획득함으로써 $\epsilon_{i, oco}^{hyp}(f_\eta)$ 에 의한 방위영상 블러링을 보상한다. 여기서 식 (13-2)의 $\varphi_{i, oco}^{az}(f_\eta)$ 는 정지위상 근사에 의해 아래의 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다^[1].

$$\begin{aligned} \varphi_{i, oco}^{az}(f_\eta) &= \frac{4\pi f_c}{c} R_{i, oco}(f_\eta) = \frac{4\pi f_c}{c} R_{i, oco}[\eta^*(f_\eta)] - 2\pi f_\eta \eta^*(f_\eta). \end{aligned} \quad (15)$$

식 (15)에서 $\eta^*(f_\eta)$ 는 정지위상 근사 점(stationary phase point)으로써 아래의 식 (16)을 만족하는 방위시간이다.

$$\frac{d}{d\eta} \left[\frac{4\pi f_c}{c} R_{i, oco}(\eta) - 2\pi f_\eta \eta \right]_{\eta=\eta^*(f_\eta)} = 0. \quad (16)$$

식 (14)를 식 (16)에 대입하여 정리하면 아래의 식 (17)과 같이 표현된다.

$$f_\eta = \left(\frac{2f_c}{c} \right) \sum_{p=1}^5 p a_{i,p} [\eta^*(f_\eta)]^{(p-1)}. \quad (17)$$

식 (15)의 정지위상 근사점 $\eta^*(f_\eta)$ 는 식 (17)을 만족하는 4차 방정식의 해로써, 이는 대수적으로 해를 획득할 수 있는 일반 2차 혹은 3차 방정식과는 달리 수치적으로 해를 구하여야 한다. 본 논문에서는 참고문헌 [3]에서의 4차 방정식 해를 구하는 방법을 이용하여 식 (17)에 대한 $\eta^*(f_\eta)$ 를 획득하였다.

방위압축을 수행하기 위해서는 상기 식 (14)~(17)에 대한 과정을 모든 거리방향 r 에 대해 수행하여야 하며, 이를 위해서는 모든 r 에 대한 $R_{i, oco}(\eta; r)$ 의 5차 다항식 계수 $\{\alpha_p(r)\}_{p=0,1,2,3,4,5}$ 을 결정하여야 한다. 여기서, $\alpha_p(r)$ 는 r 에 따라 선형적으로 변하는 특성을 가지고^{[3],[5]}, 상기 특성은 거리 방향으로 분포된 표적 표본들(표적 $I=A, B, C$)의 각 차수별 다항식 계수 $\alpha_{i,p}$ [식 (14)]를 r 에 대해 선형회귀(linear regression) 혹은 선형보간(linear interpolation) 시킴으로써 $\alpha_p(r)$ 을 획득 가능하게 한다. 획득된 $\alpha_p(r)$ 을 이용하여 정의된 방위압축 필터는 아래의 식 (18)과

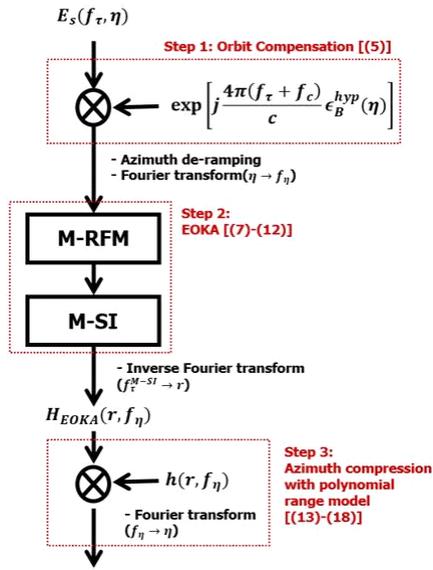


그림 3. 제안된 처리체계의 순차도
Fig. 3. Flow chart of proposed processing chain.

같이 정의된다.

$$h(r, f_\eta) = \exp [j\varphi_{oco}^{az}(r, f_\eta)]. \quad (18)$$

방위압축은 식 (18)의 방위압축 필터를 식 (13-1)에 적용한 후 도플러 주파수 방향으로의 역 푸리에 변환을 통해 수행되며, 이를 통해 최종적으로 곡선기하에 대한 SAR 영상을 획득할 수 있다. 여기서 초고해상도 SAR 신호 획득과정에서 데이터 용량이 증가할수록 방위압축 과정의 계산속도가 저하되게 되지만, 본 과정을 통해 HRE 모델 오차를 보상함으로써 곡선기하에서 초고해상도의 SAR영상을 성공적으로 획득 가능하게 한다.

그림 3은 제안된 처리체계의 순차도(flow-chart)를 도시한다.

IV. 시뮬레이션 결과

본 절에서는 제안된 처리체계의 성능을 검증하기 위해 점표적을 이용한 초고해상도 SAR 영상생성 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 1(b)에서의 레이다는 곡선의 궤도를 $V_{radar}=7,583$ m/s로 이동하며, 완전 구형의 지구표면(지구 반지름=6,371 km)에 위치한 표적 A, B, C를 7초 동안 관측하였다. 이 때, 표적 A, B, C는 각각 off-nadir angle

44.95°, 45°, 45.05°에 분포해 있으며, 레이다는 스포트라이트(spot-light) 모드로 운용된다. 본 시뮬레이션에서는 1 GHz의 레이다 운용 대역폭을 사용하며, 30.19 kHz의 넓은 도플러 대역폭을 확보함으로써 초고해상도의 SAR 신호를 획득하였다. 본 시뮬레이션에서 사용한 파라미터는 표 1에 정리되어 있다.

그림 1(b), 그리고 표 1의 시뮬레이션 파라미터를 사용하여 생성된 레이다 신호는 그림 4와 같다. 여기서, 제안된 처리체계의 성능을 비교검증하기 위해 본 논문에서는 HRE 기반 SAR 처리 알고리즘인 OKA를 사용하였다. OKA를 수행하기 위해 참고문헌 [5]의 방법을 이용하여 방위방향으로의 deramping과정을 수행하였으며, 등가 레

표 1. 시뮬레이션 파라미터
Table 1. Simulation parameters.

Satellite height	550 km
Off-nadir angles for A, B, C	44.95°, 45°, 45.05°
Satellite's velocity	7,583 m/s
Integration time	7 s
Carrier frequency	10 GHz
Radar bandwidth	1 GHz
Doppler bandwidth	30.19 kHz
Pulse repetition frequency	5 kHz
Pulse width	1 us

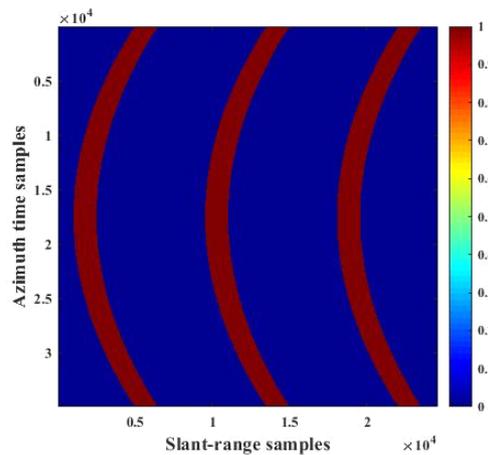
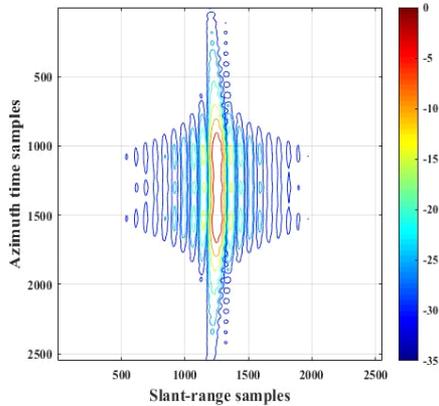
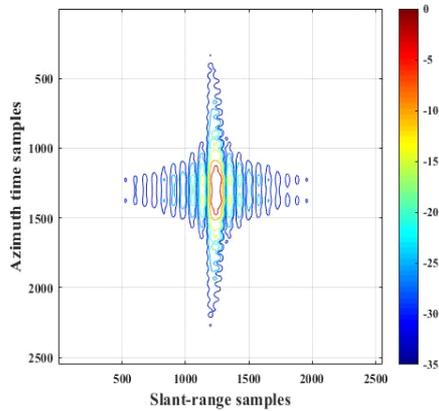


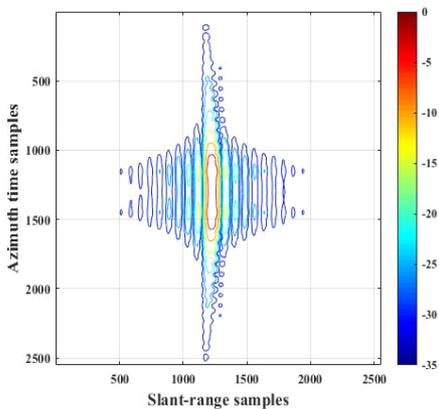
그림 4. SAR 수신신호
Fig. 4. SAR received signal.



(a) 표적 A에 대한 SAR 영상
(a) SAR image for target A



(b) 표적 B에 대한 SAR 영상
(b) SAR image for target B



(c) 표적 C에 대한 SAR 영상
(c) SAR image for target C

그림 5. OKA에 대한 SAR 영상 결과
Fig. 5. SAR imaging results using OKA.

표 2. 그림 5에 대한 영상품질 파라미터
Table 2. Image quality parameters in Fig. 5.

	PSLR(dB)	ISLR(dB)	IRW(m)
Target A	Rg.: -13.3731	Rg.: -10.3154	Rg.: 0.1340
	Az.: -8.4784	Az.: -15.8428	Az.: 2.1696
Target B	Rg.: -13.3056	Rg.: -10.1889	Rg.: 0.1340
	Az.: -4.5978	Az.: -10.1706	Az.: 0.7744
Target C	Rg.: -13.3628	Rg.: -10.2408	Rg.: 0.1340
	Az.: -8.5532	Az.: -15.3628	Az.: 1.5680

이다 속도 V_{eff} 는 식 (1)을 최소화하는 값을 찾음으로써 결정하였다. OKA의 적용결과는 그림 5에 도시되어 있으며, 이에 대한 품질 파라미터는 표 2에 정리되어 있다.

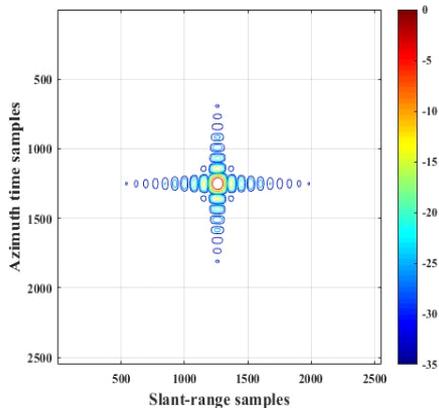
그림 5, 표 2의 결과에서 확인할 수 있는 바와 같이 OKA를 사용하여 곡선기하에서의 SAR 영상을 생성할 경우, HRE 모델오차 $\epsilon_{i,oco}^{hyp}(\eta)$ 에 의해 영상의 품질이 저하된다. 특히 상기 HRE 모델오차는 방위방향으로의 극심한 블러링을 초래하기 때문에 HRE 모델오차를 보상하는 SAR 생성 처리체계의 필요성을 본 결과를 통해 확인할 수 있었다.

반면에 그림 3의 제안된 처리체계를 사용할 경우, 곡선기하의 특성에서 기인된 HRE 모델오차를 적절히 보상함으로써 그림 6 그리고 표 3의 결과에서와 같이 표적 A, B, C 모두에 대해 초점이 맞는 SAR 영상이 형성됨을 확인할 수 있었다.

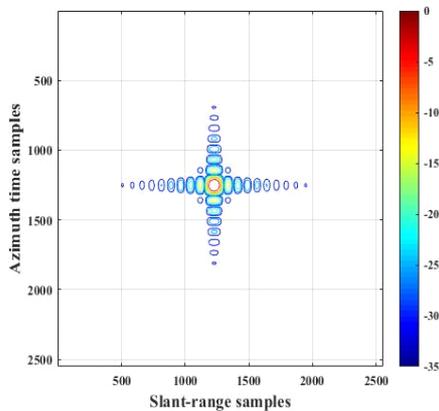
여기서 관측폭이 증가할 경우, 모델 추정 오차에 의한 약간의 품질 저하가 발생할 수 있으나, 본 시뮬레이션에서의 관측폭($\cong 2$ km)에서는 영상 품질의 저하 없이 SAR 영상이 성공적으로 형성됨을 확인할 수 있었다.

V. 결 론

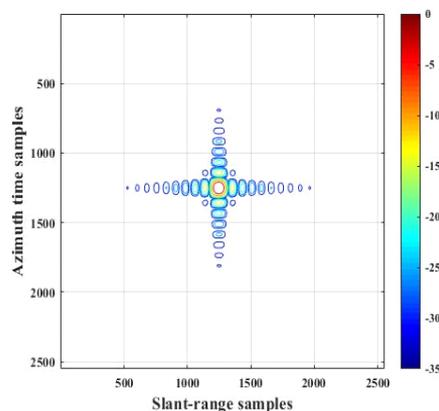
직선기하와는 달리 곡선기하에서의 경우, SAR 영상생성 시 레이더와 표적 간 거리변화가 HRE 수학적모델로 표현될 수 없으며, 이는 기존의 HRE 모델 기반의 SAR 영상생성 알고리즘들에 대한 심각한 품질 저하를 초래한다. 따라서 본 논문에서는 곡선기하에서의 SAR 신호 특성을 수학적으로 분석한 후 이를 기반으로 한 SAR 영상생성 처리체계를 제안하였다. 제안된 처리체계에서는 먼저 궤



(a) 표적 A에 대한 SAR 영상
(a) SAR image for target A



(b) 표적 B에 대한 SAR 영상
(b) SAR image for target B



(c) 표적 C에 대한 SAR 영상
(c) SAR image for target C

그림 6. 제안된 알고리즘을 이용한 SAR 영상 결과
Fig. 6. SAR imaging results using proposed method.

표 3. 그림 6에 대한 영상품질 파라미터
Table 3. Image quality parameters in Fig. 6.

	PSLR(dB)	ISLR(dB)	IRW(m)
Target A	Rg.: -13.2743	Rg.: -10.1635	Rg.: 0.1360
	Az.: -13.3292	Az.: -10.4318	Az.: 0.2112
Target B	Rg.: -13.2718	Rg.: -10.1591	Rg.: 0.1360
	Az.: -13.3274	Az.: -10.4267	Az.: 0.2112
Target C	Rg.: -13.3728	Rg.: -10.1513	Rg.: 0.1360
	Az.: -13.3331	Az.: -10.4352	Az.: 0.2112

도보상과정을 수행하여 HRE 모델 오차의 영향을 완화시킨 후 EOKA를 통해 RCMC 및 SRC를 수행하였다. 다음으로 다항식 모델 기반의 방위압축을 수행함으로써 곡선기하에서 HRE 모델오차에 의해 나타나는 방위영상의 블러링을 보상하였다. 점표적을 이용한 시뮬레이션에서는 제안된 처리체계를 통해 곡선기하에서의 초고해상도의 SAR 영상이 성공적으로 획득됨을 확인하였으며, 기존의 HRE 기반 SAR 영상생성 알고리즘과의 성능을 비교함으로써 제안된 처리체계의 효용성을 검증하였다.

References

- [1] I. G. Cumming, F. H. Wong, *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation*, Norwood, MA, Artech House, 2005.
- [2] 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, Jan. 1985.
- [3] 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.
- [4] P. Prats-Iraola, R. Scheiber, M. Rodriguez-Cassola, J. Mittermayer, S. Wollstadt, and F. De Zan, et al., "On the processing of very high-resolution spaceborne SAR data," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 52, no. 10, pp. 6003-6016, Oct. 2014.

- [5] Y. Qian, D. Zhu, "High-resolution spotlight spaceborne SAR focusing via midified-SVDS and deramping-based approach," *IET Radar, Sonar & Navigation*, vol. 13, no. 10, pp. 1826-1835, Aug. 2019.
- [6] 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.
- [7] J. Hwang, H. I. Shin, and W. W. Kim, "Modified WLS autofocus algorithm for a spotlight mode SAR image formation," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 28, no. 11, pp. 894-901, Nov. 2017.
- [8] 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.
- [9] A. Reigber, E. Alivizators, A. Potsis, and A. Moreira, "Extended wavenumber-domain synthetic aperture radar focusing with integrated motion compensation," in *IEE Proceedings-IET Radar, Sonar & Navigation*, Jun. 2006, vol. 153, no. 3, pp. 301-310.

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

박사후 연구원

2018년 5월~현재: 국방과학연구소 선임연구원

[주 관심분야] 레이더 신호처리, SAR/ISAR 이미징, SAR/ISAR Autofocus, SAR 검보정

이 기 응 [국방과학연구소/연구원]

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



2015년 8월: 한국항공대학교 전자 및 항공 전자공학과 (공학사)

2017년 2월: 한국항공대학교 항공전자정보공학과 (공학석사)

2017년 2월~현재: 국방과학연구소 연구원

[주 관심분야] SAR 신호처리, SAR 원격 탐사, SAR 검보정