

다항식 기반 오메가-케이 알고리즘을 이용한 곡선기하에서의 고해상도 바이스테틱 SAR 영상생성에 대한 연구

Study on High-Resolution Bistatic-SAR Imaging for Curved-Path Geometry Using Polynomial-Omega-K Algorithm

강 병 수 · 이 기 웅

Byung-Soo Kang · Kiwoong Lee

요 약

본 논문에서는 공간적으로 분리되어 분포된 송·수신 레이다가 곡선의 기하에서 이동하며 고해상도 합성개구면레이다(synthetic aperture radar: SAR) 영상을 생성하는 바이스테틱 SAR(bistatic-SAR: B-SAR) 영상 생성 기법을 제안한다. 이를 위해 먼저 다항식 모델을 이용하여 곡선 B-SAR 기하에서의 레이다 수신신호를 모델링한 후, 이에 대한 주파수 위상신호를 도출한다. 다음으로 상기 다항식 기반의 레이다 신호에 적합한 처리를 수행하기 위해 기존 오메가-케이 알고리즘(omega-K algorithm: OKA)의 개념을 확장한 다항식 기반의 OKA(polynomial-OKA: P-OKA)를 제안함으로써 곡선 기하에서의 B-SAR 영상 생성을 수행한다. 점표적을 이용한 시뮬레이션에서는 제안된 기법을 통해 곡선 기하에서의 B-SAR 영상이 성공적으로 형성됨을 확인하였다.

Abstract

In this study, we propose a high-resolution synthetic aperture radar (SAR) imaging method for curved-orbit geometry in bistatic configurations with spatially separated transmitter and receiver. To accommodate large curved-path and bistatic configuration properties, we first formulate a B-SAR signal using a polynomial range model and derive its two-dimensional (2D) phase spectrum. Next, we extend the basic concept of the typical omega-K algorithm (OKA) for B-SAR by focusing on the polynomial range model, referred to as polynomial-OKA (P-OKA), enabling us to provide focused SAR images in curved-path and bistatic configurations. Using point target simulations, we verified the efficacy of the proposed P-OKA, where fully focused high-resolution B-SAR images were obtained in various curved-path scenarios.

Key words: Bistatic, Omega-K Algorithm, Synthetic Aperture Radar (SAR), Spaceborne SAR, High-Resolution.

I. 서 론

합성개구면레이다(synthetic aperture radar: SAR)는 이동

하는 레이다가 관심지역에 대한 전자기적 반사특성을 2차원의 형태로 영상화 하는 시스템이다. SAR의 경우, 기존 광학 센서와는 달리 주야 및 전천후로 원거리 지역을

국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received January 10, 2022 ; Revised February 10, 2022 ; Accepted March 2, 2022. (ID No. 20220110-003)

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

관측할 수 있기 때문에 국방 및 민간의 산업 분야에서 다양하게 활용되고 있다.

현재까지의 SAR 영상생성에 대한 연구는 송/수신 레이다가 동일 위치에 위치한 모노스테틱 SAR(monostatic-SAR: M-SAR) 시스템을 중심으로 진행되어 왔다^{[1]~[5]}. 그러나 M-SAR의 경우, 동일 위치에서 레이다 송/수신이 이루어지는 특성으로 인해 운용 시나리오가 제한적이며 전자기 공격(jamming)에 취약한 단점이 있다. 또한 M-SAR 시스템에서는 촬영 지형 및 관심 표적에 대하여 다양한 산란(scattering) 메커니즘을 확보하는데 어려움이 있기 때문에 획득된 영상을 활용하는데 있어 그 한계가 있다.

상기의 문제점들을 보완하기 위해 최근 송/수신 레이다를 공간적으로 분리시켜 운영하는 바이스테틱 SAR(bistatic-SAR: B-SAR) 시스템에 대한 관심이 높아지고 있다^{[6]~[8],[11],[12]}. B-SAR 시스템은 서로 다른 위치에 위치한 송/수신 레이다가 이동하며 영상을 생성하는 구조로써 이는 전자기 공격에 강인함과 동시에 관측 지형에 대한 다양한 산란 정보를 확보 가능하게 한다. 특히 최근 우주산업 분야에서는 곡선으로 이동하는 다수의 위성들에 레이다를 탑재하여 군집으로 운용하는 멀티스테틱(multistatic) SAR 시스템이 핵심 산업으로써 자리매김하고 있는 가운데^{[9],[10]}, 위성 기하에서의 B-SAR 영상생성에 대한 연구는 상기 멀티스테틱 SAR 영상생성에 있어 선행적으로 이루어져야 하는 핵심 연구이므로 그 중요도가 매우 높은 상황이다.

B-SAR 시스템의 경우, M-SAR 시스템과는 다른 레이다 반사 신호 특성을 가지게 되므로 기존 M-SAR 시스템에서 사용되던 영상생성 기법들^{[1]~[5]}을 B-SAR 시스템에 직접 적용할 수 없다. 여기서 B-SAR 영상생성 연구의 핵심은 B-SAR 기하구조에서의 레이다 반사 신호를 모델링(modeling)한 후, 이에 적합한 신호처리 기법을 개발하는 것으로써 독일, 중국, 이탈리아 등의 항공우주 선진국에서는 관련 연구가 활발히 진행되고 있지만, 국내에서는 아직 미진한 상황이다. 국내에서 수행된 연구 중 참고문헌 [11]과 참고문헌 [12]에서는 공간적으로 분리된 송·수신 레이다가 직선으로 이동하며 영상을 생성하는 연구가 수행되었다. 그러나 직선으로 이동하는 송·수신 레이다의 기하특성은 항공기 B-SAR 시스템에 국한된 것으로

써 이는 위성과 같이 플랫폼이 곡선으로 이동하는 상황에서는 활용이 제한된다. 특히 최근 국내에서 넓은 지역을 고해상도로 감시·관측하기 위한 위성용 SAR 시스템의 연구개발이 활발히 이루어지고 있음을 고려했을 때^{[4],[5]}, 위성의 곡선기하를 고려한 B-SAR 영상생성 기술은 향후 위성 운용에서의 다양한 시나리오를 구상하기 위한 핵심 기술임에도 불구하고, 국내에서 관련 연구는 전무한 상황이다.

본 논문에서는 송·수신 레이다가 곡선으로 이동하는 B-SAR 시스템에서의 영상 생성을 위한 연구를 수행하였다. 이 때 기존 M-SAR에서 활용되던 알고리즘들의 경우, 대부분 하이퍼볼릭(hyperbolic) 수학 모델을 기반한 것으로써 이는 곡선의 B-SAR 운용 기하에서는 큰 모델오차를 야기하여 그 활용이 제한된다. 상기 문제점을 해결하기 위해 본 논문에서는 곡선으로 이동하는 송·수신 레이다의 기하특성을 반영하기 위해 다항식(polynomial)으로 레이다 신호를 일반화시켜 모델링(modeling)한 후 이에 대한 주파수 위상신호를 도출하였다. 다음으로 기존 M-SAR 시스템에서 활용되던 오메가-케이 알고리즘(omega-K algorithm: OKA)의 개념을 확장하여 다항식 모델 기반으로한 OKA(polynomial-OKA: P-OKA)를 제안함으로써 곡선기하에서의 B-SAR 영상생성 기법을 확립하였다. 본 논문에서 수행된 연구의 실효성을 검증하기 위해 점표적을 이용한 시뮬레이션을 수행하였으며, 이를 통해 제안된 기법이 곡선기하에서의 B-SAR 영상을 성공적으로 생성함을 확인할 수 있었다.

II. 곡선기하에서의 B-SAR 신호모델

그림 1은 곡선기하에서의 B-SAR 시스템에 대한 기하구조를 도시한다. 그림 1에서 x , y , 그리고 z 는 각각 레이다 수직진행방향(cross-track), 레이다 진행방향(along-track), 그리고 지표고도 방향을 나타내며, 송/수신 레이다 S_{TX} 와 S_{RX} 는 동일 기준고도 $z=0$ 에 위치한 임의의 표적 $P_p = [x_p, y_p, 0]^T$ 을 관측한다. 이때 S_{TX} 와 S_{RX} 간 시간 동기화는 완벽히 된 것으로 가정한다.

그림 1의 기하에서 S_{TX} 가 스포트라이트(spotlight) 촬영 모드로 처프(chirp) 신호를 방사한다고 가정했을 때, 정합

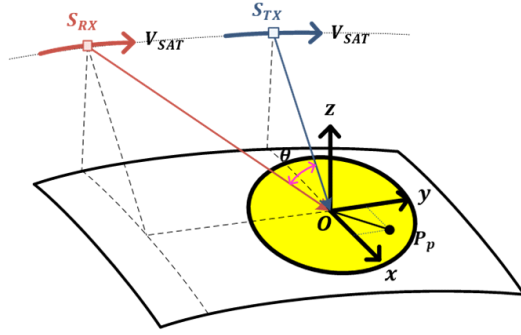


그림 1. 곡선 궤적에서의 B-SAR 영상생성 기하구조
Fig. 1. Geometry for B-SAR imaging in curved-path.

필터링(matched filtering) 수행 후 임의표적 P_p 에 대한 거리주파수(f_r)-방위시간(η) 영역(domain)에서의 레이더 신호는 식 (1)과 같이 정의된다.

$$Ss_{BI}(f_r, \eta; P_p) = W_r(f_r) w_a(\eta - \eta_c) \times \exp \left[j\pi \frac{2\pi(f_r + f_c)}{c} R_{BI}(\eta; P_p) \right]. \quad (1)$$

이때 c 는 빛의 속도, f_c 는 레이더 중심주파수, η_c 는 촬영시간에서의 중심시점, f_r 는 거리주파수(range frequency), η 는 방위시간(azimuth time), $W_r(\cdot)$ 는 f_r 방향으로의 포락선(envelop), 그리고 $w_a(\cdot)$ 는 η 방향으로의 포락선을 나타낸다. 상기 식 (1)에서 $R_{BI}(\eta; P_p)$ 는 η 의 변화에 따른 송/수신 레이더와 P_p 간 거리로써

$$R_{BI}(\eta; P_p) = R_{TX}(\eta; P_p) + R_{RX}(\eta; P_p) \quad (2)$$

으로 정의되며, $R_{TX}(\eta; P_p)$ 는 S_{TX} 와 P_p 간 거리, 그리고 $R_{RX}(\eta; P_p)$ 는 S_{RX} 와 P_p 간 거리를 나타낸다. 이때 SAR 분야에 널리 활용되는 하이퍼볼릭(hyperbolic) 신호모델의 경우, 식 (2)에 대한 큰 모델오차를 야기하기 때문에 곡선기하에서의 B-SAR 영상생성 활용에 제한점이 있다. 이에 본 논문에서는 $R_{BI}(\eta; P_p)$ 를 아래와 같이 5차 다항식의 형태로 모델링하여 일반화 하였다.

$$R_{BI}(\eta; P_p) = \sum_{i=0}^5 k_{i,p} (\eta - \eta_c)^i. \quad (3)$$

식 (3)에서 $k_{i,p}$ ($i=0,1,2,3,4,5$)는 P_p 에 대한 5차 다항식 계수를 나타낸다. 이때 식 (3)에서의 다항식 차수는 운용시나리오 및 처리 특성에 따라 조정될 수 있지만, 본 논

문에서는 참고문헌 [6], 참고문헌 [7], 참고문헌 [13]의 연구결과를 참고하여 고차 다항식으로 레이더 신호를 표현함으로써 다양한 운용시나리오에서 및 처리특성에 따른 강인성을 확보하였다.

표적 P_p 에 대한 2차원 주파수 스펙트럼(spectrum)은 식 (4)와 같이 $Ss_{BI}(f_r, \eta; P_p)$ 에 대한 η 방향으로의 푸리에 변환(Fourier transform: FT)을 통해 획득할 수 있다.

$$SS_{BI}(f_r, f_\eta; P_p) = \int_{\eta} Ss_{BI}(f_r, \eta) \exp(-j2\pi f_\eta \eta) d\eta = W_r(f_r) W_a(f_a) \exp[j\Phi_{BI}(f_r, f_\eta; P_p)]. \quad (4)$$

이때 식 (4) 내 위상함수 $\Phi(f_r, f_\eta; P_p)$ 는 정지위상 근사법(stationary phase approximation)을 통해 아래와 같이 계산된다.

$$\Phi_{BI}(f_r, f_\eta; P_p) = \frac{2\pi(f_c + f_r)}{c} R_{BI}[\eta^*(f_\eta); P_p] - 2\pi f_\eta \eta^*(f_\eta). \quad (5)$$

식 (5)에서 $\eta^*(f_\eta)$ 는 정지위상 근사점(stationary phase point)으로써 식 (6)을 만족하는 방위시간이며, 이는 식 (7)과 같이 정리된다.

$$\frac{d}{d\eta} \left[\frac{2\pi(f_c + f_r)}{c} R_{BI}(\eta; P_p) - 2\pi f_\eta \eta \right]_{\eta=\eta^*(f_\eta)} = 0. \quad (6)$$

$$\sum_{i=2}^5 a_{i,p} [\eta^*(f_\eta) - \eta_c]^{i-1} = \frac{c}{(f_c + f_r)} f_\eta - a_{1,p}. \quad (7)$$

여기서 $a_{i,p} = i k_{i,p}$ ($i=1,2,3,4,5$)는 식 (3)에 대한 미분 계수이다. 이때 식 (7)과 같은 방정식 형태에서의 미지수 $\eta^*(f_\eta)$ 는 series reversion(SR) 기법^{[7],[8]}을 통해 구할 수 있으며, 그 결과는 식 (8)과 같다.

$$\eta^*(f_\eta) = \sum_{l=1}^4 A_{l,p} Y^l - \eta_c. \quad (8)$$

여기서, $Y = cf_\eta / (f_c + f_r) - a_{1,p}$ 이며, SR기법을 통해 구한 계수 $A_{l,p}$ ($l=1,2,3,4$)는 식 (9)와 같이 정의된다^[8].

$$A_{1,p} = \frac{1}{a_{1,p}}, A_{2,p} = -\frac{a_{2,p}}{a_{1,p}^3}, A_{3,p} = \frac{(2a_{2,p}^2 - a_{1,p}a_{3,p})}{a_{1,p}^5}, A_{4,p} = \frac{(5a_{1,p}a_{2,p}a_{3,p} - a_{1,p}^2a_{4,p} - 5a_{2,p}^3)}{a_{1,p}^7}. \quad (9)$$

식 (5)~식 (9)과정을 통해 5차 다항식 $R_{BI}(\eta; P_p)$ 에 대한 2차원 주파수 스펙트럼을 모델링함으로써 곡선 기하에서 B-SAR 영상 생성을 위한 주파수 신호를 일반화시킬 수 있다. 이때 식 (5)는 촬영영역 내 표적의 위치 $P_p = [x_p, y_p, 0]^T$ 에 대한 함수로써, 곡선 기하에서의 SAR 영상 생성에 있어 가장 중요한 부분은 촬영 전역 내에서 표적 위치에 따라 변하는 주파수 신호특성을 고려하여 영상 품질 저해 요소를 보상하는 것이다. 이를 위해 본 논문에서는 다항식 주파수 위상함수 식 (5)를 기반으로 한 P-OKA 알고리즘 제시하였으며, 이는 다음 절에 기술되어 있다.

III. P-OKA를 이용한 곡선기하에서의 B-SAR 영상생성

본 논문에서 제안하는 P-OKA의 가장 큰 특징은 일반화된 다항식 신호모델 기반으로 수행된다는 점이다. 이때 고해상 SAR 운용 시나리오에서 획득되는 신호의 경우, 도플러 주파수 대역폭이 펄스 반복 주파수(pulse repetition frequency: PRF)보다 큰 특성을 가지게 되고, 이는 도플러 방향으로의 신호 에일리어싱(aliasing)을 야기하여 식 (4)의 왜곡을 초래한다. 더불어 바이스태틱 운용각이 커질 경우, 레이더-표적 간 거리함수의 선형 성분이 증가하게 되는데, 이는 f_r 의 변화에 따른 도플러 중심주파수의 이동을 초래함으로써 추가 에일리어싱을 발생시킨다^{[7],[8],[14]}. 상기 문제점들을 해결하기 위해 본 논문에서는 먼저 서브-구간(sub-aperture) 단위로 신호를 분할한 후^{[7],[8]}, 각 서브-구간 별로 참고문헌 [14]에서의 주파수 확장(spectral extension) 기법 및 제안된 P-OKA를 수행함으로써 상기 도플러 신호의 왜곡 문제를 해결하였다.

각 서브-구간에서의 P-OKA 수행 과정에서는 먼저 식 (10)과 같이 촬영영역 내 중심 표적 $P_{ref} = [0, 0, 0]^T$ 에 대한 기준점 보상(reference function multiplication: RFM)이 수행된다.

$$\begin{aligned} SS_{BI,RFM}(f_\tau, f_\eta; P_p) \\ = SS_{BI}(f_\tau, f_\eta; P_p) \text{conj}[SS_{BI}(f_\tau, f_\eta; P_{ref})] \\ = W_r(f_\tau) W_a(f_\eta) \exp[j\Delta\Phi_{BI,RFM}(f_\tau, f_\eta; P_p)]. \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 $\Delta\Phi_{BI,RFM}(f_\tau, f_\eta; P_p)$ 은 RFM 수행 후의 잔여 위

상으로써 이는 식 (11)과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \Delta\Phi_{BI,RFM}(f_\tau, f_\eta; P_p) \\ = \Phi_{BI}(f_\tau, f_\eta; P_p) - \Phi_{BI}(f_\tau, f_\eta; P_{ref}). \end{aligned} \quad (11)$$

식 (11)에서 확인할 수 있는 바와 같이 $\Delta\Phi_{BI,RFM}(f_\tau, f_\eta; P_p)$ 은 촬영영역 내 표적 $P_p = [x_p, y_p, 0]^T$ 의 위치 (x_p, y_p) 에 대한 함수나 수 킬로미터 정도의 좁은 영역을 관측하는 고해상도 SAR의 운용 특성상 레이더 진행방향 (y)로의 위상변화는 매우 작다. 이에 식 (11)은 식 (12)와 같이 근사될 수 있다.

$$\Delta\Phi_{BI,RFM}(f_\tau, f_\eta; P_p) \cong \Delta\Phi_{BI,RFM}(f_\tau, f_\eta; P_p(x)). \quad (12)$$

$P_p(x) = [x_p, 0, 0]^T$ 는 레이더 수직진행방향(x)으로 분포한 표적을 나타낸다. 여기서, 2차원 주파수영역에서 수행되는 오메가-케이 계열의 방식들에서는 상기 식 (12)를 식 (13)과 같이 공간변위(spatial-variant) 항 $\nu_{BI}[f_\eta; P_p(x)]$ 와 비변위(spatial-invariant) 항 $u_{BI}(f_\tau, f_\eta)$ 으로 분리(decomposition)한 후 공간 비변위 항 $u_{BI}(f_\tau, f_\eta)$ 에 대한 스톨트-내삽법(stolt-interpolation)을 수행함으로써 잔여위상오차를 보상한다.

$$\Delta\Phi_{BI,RFM}(f_\tau, f_\eta; P_p(x)) = \nu_{BI}[f_\eta; P_p(x)] u_{BI}(f_\tau, f_\eta). \quad (13)$$

이때 하이퍼볼릭 신호모델을 기반하는 일반 OKA에서는 수학적 전개를 통해 식 (12)를 식 (13)의 형태로 간단하게 분리하여 표현할 수 있지만, 본 논문에서의 일반화된 다항식 신호모델을 이용할 경우, 2차원 주파수 위상의 복잡한 형태로 인해 수학적 기반으로 위상신호를 분리하는데 어려움이 있다.

이를 해결하기 위해 본 논문에서는 최소자승법 기반의 분해법(least-squares fitting based decomposition: LSD)을 이용하여 $\Delta\Phi_{BI,RFM}(f_\tau, f_\eta; P_p)$ 을 식 (13)의 형태로 분리한다. LSD를 수행하기 위해서는 먼저 공간변위 위상 항 $\nu_{BI}[f_\eta; P_p(x)]$ 을 $k_{0,Pp} - k_{0,Pref}$ 으로 가정함으로써 $u_{BI}(f_\tau, f_\eta)$ 을 (14)와 같이 나타낸다.

$$u_{BI}(f_\tau, f_\eta) = \frac{\Delta\Phi_{BI,RFM}(f_\tau, f_\eta; P_p(x))}{k_{0,Pp} - k_{0,Pref}}. \quad (14)$$

다음으로 상기 $u_{BI}(f_\tau, f_\eta)$ 의 각 f_η 별로 최소자승기법을 적용함으로써 식 (14)를 식 (15)와 같이 f_τ 에 대한 3차

다항식의 형태로 나타낸다.

$$\hat{u}_{BI}(f_\tau, f_\eta) = \alpha_0(f_\eta) + \alpha_1(f_\eta)(f_\tau + f_c) + \alpha_2(f_\eta)(f_\tau + f_c)^2 + \alpha_3(f_\eta)(f_\tau + f_c)^3. \quad (15)$$

이때 $\alpha_l(f_\eta) (l=0,1,2,3)$ 는 $\hat{u}_{BI}(f_\tau, f_\eta)$ 에 대한 다항식 계수이며, 이는 식 (16)을 최소화하는 해를 찾음으로써 획득할 수 있다.

$$\epsilon = \int |u_{BI}(f_\tau, f_\eta) - \hat{u}_{BI}(f_\tau, f_\eta)| df_\tau. \quad (16)$$

LSD 과정을 통해 획득한 공간비변위 함수 $\hat{u}_{BI}(f_\tau, f_\eta)$ 는 식 (17)과 같이 스톨트-내삽법(Stolat-interpolation)을 위한 새로운 거리-주파수 f_{BI}^{STOLT} 로 정의된다.

$$f_{BI}^{STOLT} = \hat{u}_{BI}(f_\tau, f_\eta) - f_c \quad (17)$$

정의된 f_{BI}^{STOLT} 을 이용하여 식 (10)의 $SS_{BI}(f_\tau, f_\eta; P_p)$ 에 스톨트-내삽법을 적용한 결과는 식 (18)과 같다.

$$SS_{BI,RFM,SI}(f_\tau^{STOLT}, f_\eta; P_p) = W_r(f_\tau^{STOLT}) W_a(f_\eta)(k_{0,Pp} - k_{0,Pre f}) f_\tau^{STOLT}. \quad (18)$$

상기 식 (18)에서와 같이 LSD 기반의 스톨트-내삽법을 통해 RFM 수행 후 잔여위상오차 성분이 보상됨을 확인할 수 있으며, 이에 대한 결과로 식 (18)에 2차원 푸리에 변환을 적용함으로써 곡선기하에서의 B-SAR 영상을 성공적으로 획득할 수 있다.

그림 2는 제안된 P-OKA 기법의 순차도(flow-chart)를 도시한다.

IV. 시뮬레이션 결과

본 절에서는 점표적을 이용한 B-SAR 영상생성 시뮬레이션 결과를 기술한다. 시뮬레이션에서는 공간적으로 분리되어 이동하는 Tx와 Rx가 그림 1의 기하에서 $V_{SAT} = 7,583$ m/s의 속도로 곡선 궤도를 이동하며, 완전 구형의 지구표면(지구 반지름=6,371 km)에 위치한 9개의 점표적에 대한 촬영을 수행하였다. 이때 점표적은 그림 3과 같이 촬영영역 $5 \text{ km} \times 2 \text{ km}$ 촬영영역 내 분포되어 있으며, Tx와 Rx는 처프신호 기반의 스포트라이트(spotlight) 모드로 운용된다.

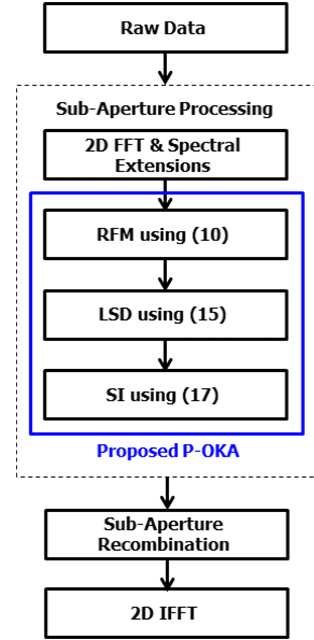


그림 2. 제안된 기법의 순차도
Fig. 2. Overall flow chart for proposed method.

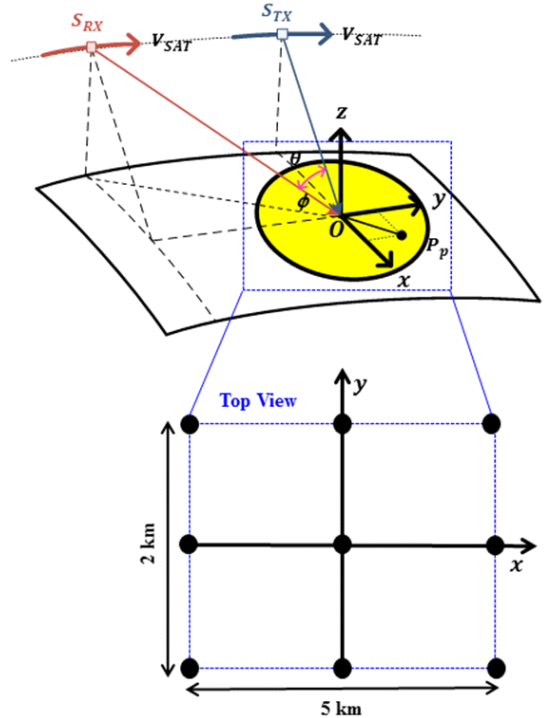


그림 3. 시뮬레이션을 위한 표적 배치도
Fig. 3. Target deployments for simulations.

표 1. 시뮬레이션 파라미터

Table 1. Simulation parameters.

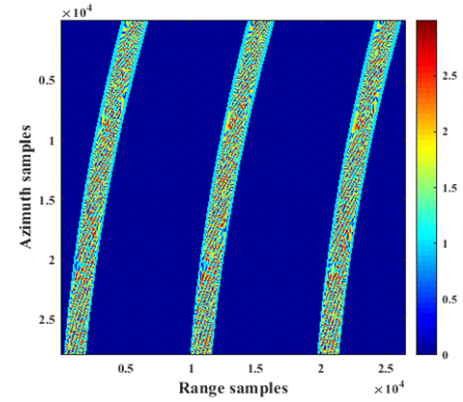
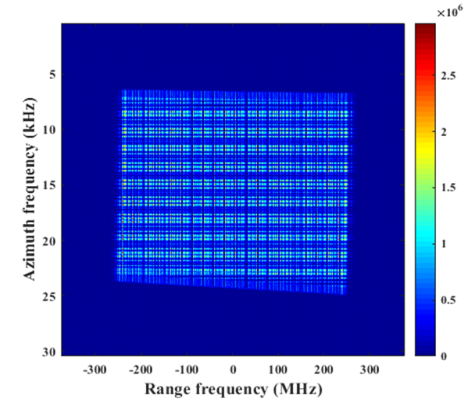
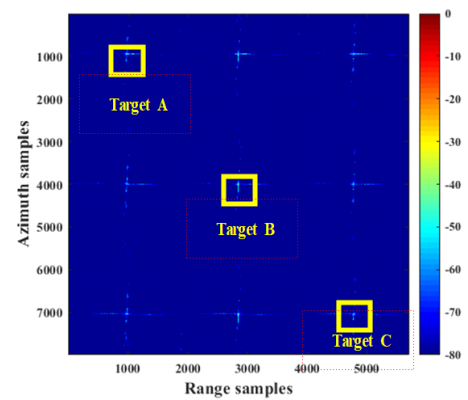
Basic parameters	Tx and Rx heights	550 km
	Tx and Rx velocity	7,583 m/s
	Observation time	4 s
	Carrier frequency	10 GHz
	Radar bandwidth	500 MHz
	Pulse repetition frequency	7 kHz
	Pulse width	2 μ s
Simulation 1	Bistatic angle(θ)	6.68°
	Incident angle(ϕ)	55.76°
	Tx and Rx distance	170 km
Simulation 2	Bistatic angle(θ)	22.73°
	Incident angle(ϕ)	58.87°
	Tx and Rx distance	370 km

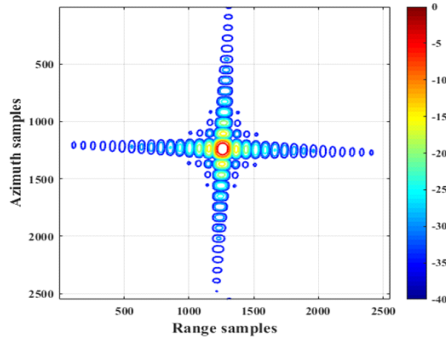
본 논문에서는 다양한 B-SAR 운용기하에서 제안된 기법의 효용성(effectiveness)을 검증하기 위해 바이스테틱 각도 $\theta = 6.68^\circ$ 와 $\theta = 22.73^\circ$ 에 대한 시뮬레이션을 각각 수행하였으며, 이에 사용된 주요 파라미터는 표 1에 정리되어 있다.

4.1 시뮬레이션1: $\theta = 6.68^\circ$

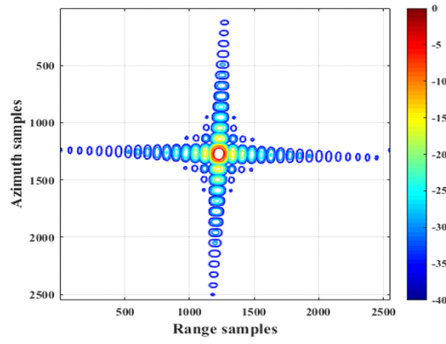
본 절에서는 제안된 B-SAR 영상생성 기법을 검증하기 위해 바이스테틱 각도 $\theta = 6.68^\circ$ 인 운용기하에서의 시뮬레이션을 수행하였다. 이 때 Tx와 Rx는 170 km 떨어진 거리에서 곡선으로 이동하며 표적을 관측하였으며, 관측 과정에서 획득된 신호는 그림 4와 같다.

그림 4의 획득된 신호는 고해상 운용 특성으로 인해 도플러 스펙트럼이 PRF보다 작아 위상왜곡이 발생하게 된다. 이에 본 논문에서는 참고문헌 [2], 참고문헌 [14]을 참조하여 서브-구간단위로 처리 및 스펙트럼 확장 하에 제안된 P-OKA를 수행하였으며, 그 결과로 그림 5(a)와 같이 신호왜곡 없는 P-OKA 주파수 스펙트럼 결과를 획득하였다. 획득된 스펙트럼에 대한 2차원 FT를 수행한 결과인 B-SAR 영상은 그림 5(b)와 같다. 여기서 품질결과를 보다 더 정밀하게 분석하기 위해 그림 5(b) 내 노란색으로 표시된 A, B, C의 확대영상을 그림 6과 같이 생성하였으며,

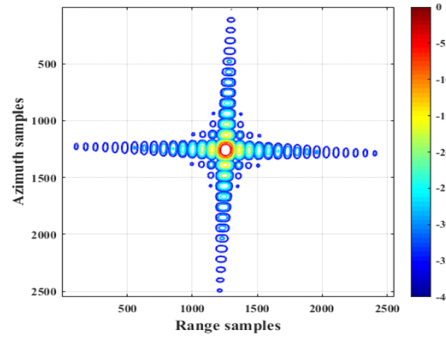
그림 4. B-SAR 수신신호($\theta = 6.68^\circ$)Fig. 4. B-SAR received signal($\theta = 6.68^\circ$).(a) P-OKA 수행 후 2차원 주파수 스펙트럼
(a) 2D frequency spectrum after P-OKA(b) P-OKA 수행 후 B-SAR 영상
(b) B-SAR images after P-OKA그림 5. P-OKA 수행결과($\theta = 6.68^\circ$)Fig. 5. Results for P-OKA($\theta = 6.68^\circ$).



(a) 표적 A
(a) Target A



(b) 표적 B
(b) Target B



(c) 표적 C
(c) Target C

그림 6. 그림 5(b) 내 표적 확대영상
Fig. 6. Enlarged target imaes in Fig. 5(b).

이에 대한 품질지표는 표 2에 정리되어 있다. 그림 6과 표 2의 결과에서와 같이 $\theta=6.68^\circ$ 인 운용기하에서 제안된 처리과정을 통해 촬영영역 전역에 대한 B-SAR 영상이 성공적으로 생성됨을 확인할 수 있었다.

표 2. 그림 6에 대한 영상품질 파라미터
Table 2. Image quality parameters in Fig. 6.

	PSLR(dB)	ISLR(dB)	IRW(m)
Target A	Range.: -13.23	Range: -10.18	Range: 0.38
	Azimuth.: -13.27	Azimuth: -10.25	Azimuth: 0.40
Target B	Range.: -13.25	Range: -10.16	Range: 0.38
	Azimuth.: -13.27	Azimuth: -10.24	Azimuth: 0.40
Target C	Range: -13.25	Range: -10.19	Range: 0.38
	Azimuth: -13.28	Azimuth: -10.25	Azimuth: 0.40

4-2 시뮬레이션1: $\theta=22.27^\circ$

본 절에서는 상기 절에서의 시뮬레이션 환경 대비 바이스테틱 각도가 상대적으로 큰 운용기하에서 제안된 B-SAR 영상생성 기법을 검증하였다. 이때 Tx와 Rx는 370 km으로 멀리 떨어져 있으며, 바이스테틱 운용각도는 $\theta=22.73^\circ$ 이다.

그림 7은 $\theta=22.73^\circ$ 에서 획득된 B-SAR 반사신호를 도시하며, 서브-구간 합성법 기반의 P-OKA 수행 결과는 그림 8과 같다. 이때 본 시뮬레이션에서는 바이스테틱 운용기하 특성으로 인해 고 스윙트(squint)기하에서와 유사하게 레이더-표적 간 거리함수의 선형성분이 주요하게 된다^[6]. 이는 그림 8(a)에서와 같이 비틀어진(skew) 형태의 2차원 주파수 스펙트럼을 만들어내게 되고, 그 결과로 획득된 B-SAR 영상의 점산란강도함수(impulse response function: IRF)는 그림 8(b)와 같이 회전된 형태로 나타나

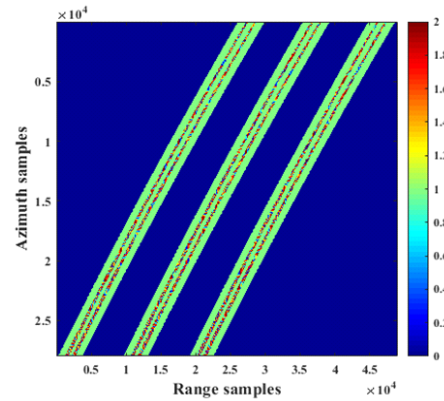
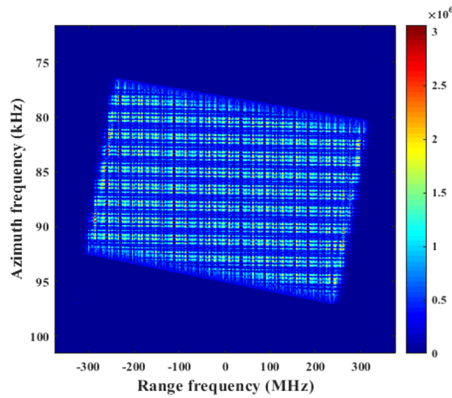
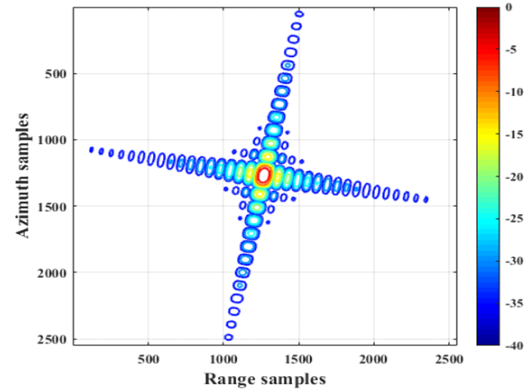


그림 7. B-SAR 수신신호($\theta=22.73^\circ$)

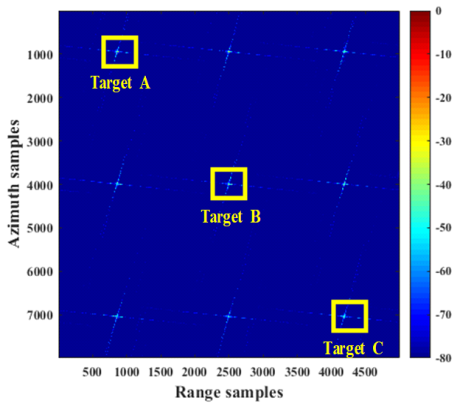
Fig. 7. B-SAR received signal($\theta=22.73^\circ$).



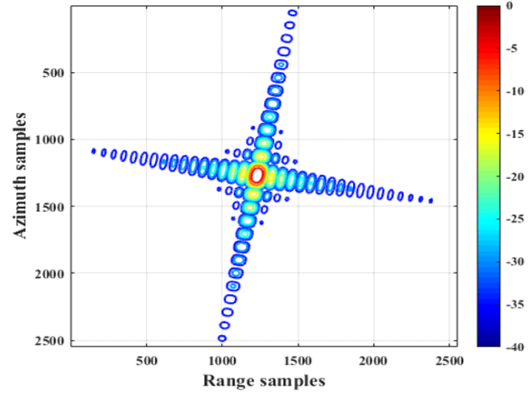
(a) P-OKA 수행 후 2차원 주파수 스펙트럼
(a) 2D frequency spectrum after P-OKA



(a) 표적 A
(a) Target A



(b) P-OKA 수행 후 B-SAR 영상
(b) B-SAR images after P-OKA



(b) 표적 B
(b) Target B

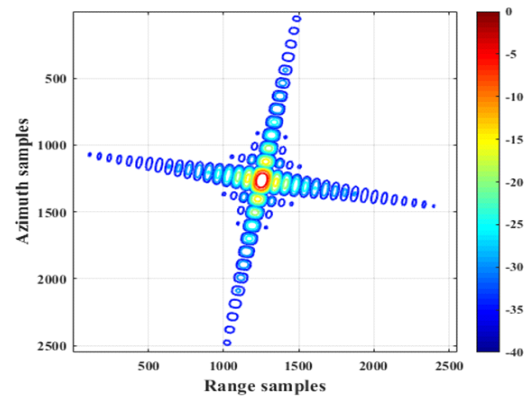
그림 8. P-OKA 수행결과($\theta=22.73^\circ$)
Fig. 8. Results for P-OKA($\theta=22.73^\circ$).

게 된다.

그림 8(b) 내 표적 A, B, C에 대한 확대영상 및 품질지표를 그림 9와 표 3에 나타내었으며, 이를 통해 제안된 기법을 이용할 경우 바이스테틱 각도가 큰 운용환경에서도 성공적으로 B-SAR 영상이 생성됨을 확인할 수 있었다.

V. 결 론

본 논문에서는 곡선기하에서의 B-SAR 영상 생성기법에 대한 연구를 수행하였다. 이를 위해 먼저 곡선으로 이동하는 송/수신 레이더의 운용 특성을 고려하여 기존 M-SAR 분야에서 일반적으로 활용되는 하이퍼볼릭 수학



(c) 표적 C
(c) Target C

그림 9. 그림 8(b) 내 표적 확대영상
Fig. 9. Enlarged target images in Fig. 8(b).

표 3. 그림 9에 대한 영상품질 파라미터
Table 3. Image quality parameters in Fig. 9.

	PSLR(dB)	ISLR(dB)	IRW(m)
Target A	Range: -13.27	Range: -10.24	Range: 0.35
	Azimuth: -13.28	Azimuth: -10.40	Azimuth: 0.44
Target B	Range: -13.26	Range: -10.24	Range: 0.35
	Azimuth: -13.28	Azimuth: -10.41	Azimuth: 0.44
Target C	Range: -13.27	Range: -10.25	Range: 0.35
	Azimuth: -13.28	Azimuth: -10.40	Azimuth: 0.43

모델이 아닌 5차 다항식의 모델로 레이다 신호를 일반화하였으며 이에 대한 주파수 위상신호를 수학적으로 도출하였다. 다음으로 상기 일반화된 다항식 신호모델에 적합한 영상처리를 위해 기존 OKA의 개념을 확장한 P-OKA를 제안함으로써 곡선 기하에서의 B-SAR 영상 생성을 수행하였다. 제안된 기법의 효용성을 검증하기 위해 서로 다른 바이스테틱 운용 각도에서의 점포적 생성 시뮬레이션을 수행하였으며, 이를 통해 제안된 기법이 다양한 운용 시나리오에서 B-SAR 영상을 성공적으로 만들어냄을 확인하였다.

References

- [1] I. G. Cumming, F. H. Wong, *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data-Algorithms and Implementation*, Norwood, MA, Artech House, 2005.
- [2] P. Prats-Iraola, R. Scheiber, M. Rodriguez-Cassola, J. Mittermayer, S. Wollstadt, and F. D. 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.
- [3] P. Wang, W. Liu, J. Chen, M. Niu, and W. Yang, "A high-order imaging algorithm for high-resolution spaceborne SAR based on a modified equivalent range model," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 53, no. 3, pp. 1225-1235, Mar. 2015.
- [4] B. S. Kang, K. Lee, "Ultra-high resolution SAR imaging for curved geometry using the extended omega-K algorithm," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 31, no. 5, pp. 437-445, May. 2020.
- [5] B. S. Kang, K. Lee, "Quality improvement of synthetic aperture radar images in curved-orbit geometry," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 31, no. 8, pp. 729-737, Aug. 2020.
- [6] K. Eldhuset, "Spaceborne bistatic SAR processing using the ETEF4 algorithm," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 6, no. 2, pp. 194-198, Apr. 2009.
- [7] Y. L. Neo, F. H. 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] Y. L. Neo, F. H. Wong, and I. G. Cumming, "A comparison of point target spectra derived for bistatic SAR processing," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 46, no. 9, pp. 2481-2492, Sep. 2008.
- [9] N. Sakar, M. Rodriguez-Cassola, P. Prats-Iraola, A. Reigber, and A. Moreira, "Analysis of geometrical approximations in signal reconstruction methods for multistatic SAR constellations with large along-track baseline," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 15, no. 6, pp. 892-896, Jun. 2018.
- [10] N. Sakar, M. Rodriguez-Cassola, P. Prats-Iraola, and A. Moreira, "Azimuth reconstruction algorithm for multistatic SAR formations with large along-track baselines," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 58, no. 3, pp. 1931-1940, Mar. 2020.
- [11] B. L. Cho, S. G. Sun, J. S. Lee, G. C. Park, and J. S. Ha, "A study on bistatic SAR imaging using bistatic-to-monostatic conversion in wavenumber domain," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 24, no. 2, pp. 207-213, Feb. 2013.
- [12] 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.

- [13] 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.

- [14] G. W. Davidson, I. Cumming, "Signal properties of spaceborne squint-mode SAR," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 35, no. 3, pp. 611-617, May 1997.

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, SAR/ISAR 이미징, SAR 검보정, SAR 영상정합 및 변화탐지

이 기 응 [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 원격

탐사, SAR 검보정