

보간법 기반 가변 PRF 스쿼트 Spotlight SAR 처리 기법

Interpolation-Based Variable PRF SAR Squinted Spotlight Data Processing

이 기 응

Kee-Woong Lee

요 약

Spotlight SAR의 스쿼트 운용 각이 증가하면 브로드사이드 운용에서는 획득할 수 없는 영역에 대한 고해상도 SAR 영상을 사전에 획득할 수 있다. 하지만 RCM(Range Cell Migration)의 증가로 획득되는 원시데이터의 용량이 증가하며 송신신호 Nadir 반사 신호에 의한 간섭을 회피하기 시스템변수를 조정하는 경우, 시스템의 성능이 저하될 수 있다. 최근에는 가변 PRF, ASRW(Adaptive Sliding Range Window)를 적용하여 스쿼트 SAR 데이터를 효과적으로 획득하고 처리하는 기법들이 연구되고 있다. 본 연구에서는 보간법을 기반으로 가변 PRF에 의한 원시데이터의 왜곡을 보상하는 과정과 스쿼트 Spotlight SAR 처리를 위한 신호처리 기법이 효과적으로 결합된 처리 기법을 제시한다. 가변 PRF SAR 점포적 시물레이션을 수행하였으며, 본 연구에서 제시하는 처리기법 성능을 분석한다.

Abstract

The squinted spotlight SAR(Synthetic Aperture Radar) is an effective imaging mode for obtaining high-resolution SAR imagery in advance. However, a large-range cell migration heavily burdens the storage equipment, and the SAR system should consider its high risk for blind range and Nadir interference. Recently, the PRF(Pulse Repetition Frequency) variation and ASRW(Adaptive Sliding Range Window) have been proposed as effective techniques for squinted SAR image acquisition. This paper presents a signal processing algorithm for the squinted variable PRF spotlight-SAR. The algorithm is a two-step focusing algorithm combined with the interpolation method for compensating distortions due to PRF variation. The simulated variable PRF SAR raw data and processing results demonstrate the validity of the proposed approach.

Key words: SAR(Synthetic Aperture Radar), Variable PRF, Spotlight SAR, SAR Processing

I. 서 론

1 m 이하의 고해상도 SAR 영상이 상용화 되면서 군사, 재난재해, 국토관리, 농림, 산림 등의 다양한 분야에서 SAR 영상의 활용도가 높아지고 있다. Spotlight 모드는 고해상도 SAR 영상을 획득하기 위해 개발된 촬영 모드로

위성 SAR, 항공기 SAR 등에 적용되어 고해상도 SAR 영상의 상용화에 기여하고 있다.

Spotlight 모드는 공간해상도(Spatial resolution)를 향상시킬 수 있지만, 시간해상도(Temporal resolution)는 저하될 수밖에 없다^[1]. 안테나 빔을 관심영역에 지속적으로 조사하여 획득되는 영상의 해상도는 향상되지만, 획득할

국방과학연구소(Agency of Defense Development)

· Manuscript received December 30, 2019 ; Revised January 30, 2020 ; Accepted February 24, 2020. (ID No. 20191230-141)

· Corresponding Author: Kee-Woong Lee (e-mail: kiwglee@gmail.com)

수 있는 영상의 크기는 빔이 조사되는 영역으로 제한되기 때문이다. Sliding Spotlight 모드는 Spotlight 모드보다 획득되는 영상의 크기를 증가시킬 수 있는 촬영모드로 제안되었다. 안테나 빔의 조사영역을 조절하여 영상의 크기를 증가시킬 수 있지만, 해상도는 Spotlight 모드보다 저하될 수밖에 없다^[2].

고해상도 SAR 영상의 시간해상도 성능 향상을 위한 스캔트 각 운용범위 확대에도 관심이 증가하고 있다. Spotlight 모드의 스캔트 운용이 가능하면 브로드사이드 운용으로 획득할 수 없는 영역에 대한 고해상도 SAR 영상을 사전에 확보할 수 있기 때문이다^[3]. 하지만 스캔트 운용에 의해 발생하는 RCM(Range Cell Migration)의 증가는 SAR 시스템 설계과정과 데이터 처리과정에서 주요 변수로 고려되어야 한다. SAR 영상 데이터의 용량이 증가하게 되어 고용량의 저장장치가 필요하며, 신속한 영상생성을 위한 신호처리가 필요하다. 또한 송신신호와 Nadir 반사 신호에 의한 간섭을 회피하기 위해 SAR 시스템의 설계변수를 조정하는 과정에서 해상도, 영상 폭 등이 저하될 수도 있다.

최근에는 ASRW(Adaptive Sliding Receiving Window)을 이용하여 스캔트 Spotlight SAR 데이터를 효과적으로 획득하고 처리하는 기법이 제안되었다. 스캔트 각 증가에 의한 원시데이터의 용량 증가를 최소화 할 수 있으며, RCM 왜곡을 보상하는 사전처리가 적용되면 Spotlight SAR 처리기법으로 영상 형성이 가능하다^[4]. 하지만 ASRW 기법은 송신신호, Nadir 반사 신호에 의한 간섭을 회피할 수 없는 한계가 있다.

가변 PRF(Pulse Repetition Frequency) 기법은 SAR 영상 획득시간동안 PRF를 조정하는 기법으로 스캔트 각 증가에 따른 원시데이터의 용량 증가를 최소화할 뿐만 아니라, PRF 조절을 통해 송신신호, Nadir 반사 신호에 의해 발생하는 간섭 영향성을 최소화 할 수 있다. 고속의 플랫폼에 탑재되는 SAR 시스템에서 스캔트 데이터를 효과적으로 획득하기 위한 기법으로 제안되었으며^{[3],[5]}, 스캔트 Spotlight SAR 데이터를 효과적으로 획득을 위한 기법으로도 고려될 수 있다. 가변 PRF가 적용되어 획득된 SAR 원시데이터를 영상으로 형성하기 위해서는 RCM 왜곡의 보상뿐만 아니라, 방위 방향의 비균일 샘플링을 균일 샘플링으로 변환하는 처리과정이 적용되어야 한다. RCM

왜곡은 주파수 필터를 기반으로 보상될 수 있으며, 비균일 샘플링 데이터는 보간법을 기반으로 균일 샘플링으로 변환할 수 있다^{[5],[6]}.

Spotlight SAR 데이터를 영상으로 형성하기 위해서는 도플러 스펙트럼의 앨리어싱 현상을 고려한 신호처리가 수행되어야 한다. 이를 위한 다수의 알고리즘들이 제안되어 왔으며, 일반적으로 Sub-aperture 기반 기법과 Deramping 기반 기법으로 분류할 수 있다. Sub-aperture 기반의 Spotlight SAR 처리 기법은 획득된 원시데이터를 방위방향으로 분할하여 RCMC(Range Cell Migration Compensation)를 수행하고, SPECAN(SPECTral ANalysis) 기법을 이용하여 방위압축을 수행하는 기법이다^[1]. Sliding Spotlight 데이터를 처리하는 경우에는 사이드로브 감쇠를 위한 방위 방향의 윈도우 적용과 영상의 폴딩 왜곡을 방지하기 위해 BAS(Baseband Azimuth Scaling) 기반의 방위압축 기법이 적용된다^[7]. Deramping 기반 기법은 컨볼루션을 기반으로 원시데이터를 오버 샘플링된 형태로 변환하는 사전처리가 적용된다. 사전처리를 통해 도플러 스펙트럼의 앨리어싱 현상이 보상되면 주파수 영역에서 처리되는 SAR 포커싱 알고리즘을 기반으로 영상을 형성할 수 있다^{[8],[9]}.

가변 PRF가 적용된 스캔트 Stripmap 데이터는 가변 PRF에 의한 왜곡을 보상하고, OKA(Omega-K Algorithm) 기반의 포커싱 처리기법을 적용하여 영상을 형성할 수 있다^[5]. 하지만 가변 PRF가 적용된 스캔트 Spotlight SAR 데이터를 처리하기 위해서는 가변 PRF에 의한 왜곡 보상 과정과 도플러 스펙트럼의 앨리어싱 현상을 보상하는 처리과정이 결합된 처리기법이 필요하다.

본 논문에서는 보간법 기반의 가변 PRF 왜곡 보상기법과 Two-Step 알고리즘이 결합된 처리기법을 제시한다. Two-Step 알고리즘은 Deramping 기반의 대표적인 Spotlight SAR 처리 알고리즘으로 가변 PRF 왜곡 보상기법과 효과적으로 결합될 수 있다. SAR 점표적 시뮬레이션을 통해 실험영상을 생성하였으며, 품질분석을 통해 본 논문에서 제시하는 알고리즘의 성능을 검증하였다.

II. 가변 PRF 스캔트 Spotlight SAR 신호 모델

2-1 스캔트 Spotlight SAR의 RCM

그림 1은 직교좌표계에서의 스캔트 Spotlight SAR 기하

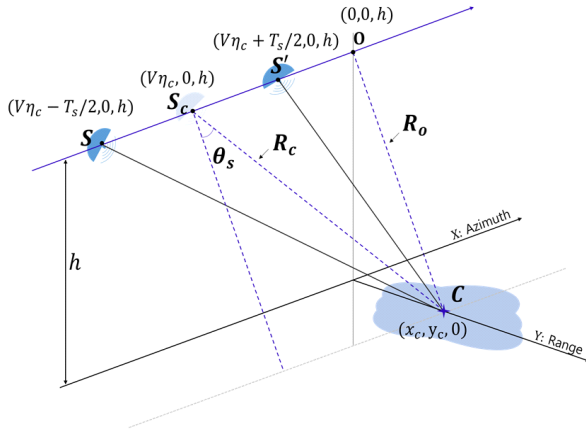


그림 1. 스퀘인트 spotlight SAR 기하구조
Fig. 1. Squinted spotlight SAR geometry.

구조를 나타낸다. SAR는 영상획득시간(T_s) 동안 등속도(V)로 이동하며, 안테나의 빔을 영상 중심(C)에 지속적으로 조사하여 영상을 획득한다. R_o 는 SAR와 영상 중심(C)의 최소 근접거리를 의미하고, R_c 는 합성개구면의 중심(S_c)으로부터 영상의 중심까지의 거리를 의미한다. Spotlight SAR의 스퀘인트 각(θ_s)은 $\overrightarrow{S_cC}$ 와 \overrightarrow{OC} 가 이루는 각으로 그림 1의 기하구조에서 합성개구면의 중심과 영상의 중심을 이용하여 정의할 수 있다.

영상획득시간 동안 영상의 중심에 위치하는 표적과 SAR와의 거리변화는 Taylor 급수를 이용하여 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다^[3]. η 는 방위방향의 시간을 의미하며, η_c 는 SAR가 합성개구면의 중심에 위치하는 시점을 의미한다.

$$R(\eta; R_o) = \sqrt{R_o^2 + V^2(\eta - \eta_c)^2} \\ = R_c - V \sin(\theta_s)(\eta - \eta_c) + \frac{1}{2} \frac{V^2 \cos^2(\theta_s)}{R_c} (\eta - \eta_c)^2 + \dots \quad (1)$$

RCM(Range Cell Migration)은 R_c 를 기준으로 영상획득 동안 변화하는 거리성분이며, 1차 성분인 LRW(Linear Range Walk)과 2차 성분인 RC(Range Curvature)로 분류할 수 있다. 그림 2는 위성 SAR의 기하특성을 기반으로 스퀘인트 Spotlight SAR의 RCM을 분석한 결과이다. LRW는 스퀘인트 각이 증가할수록 $\sin(\theta_s)$ 에 비례하여 증가하고, RC는 $\cos^2(\theta_s)$ 에 비례하여 감소한다. RC의 감소량에 비하여 LRW의 증가량이 크므로 스퀘인트 각이 증가할수록

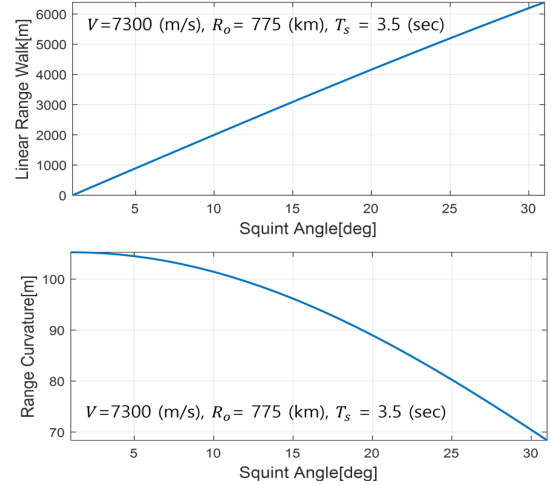


그림 2. 스퀘인트 spotlight SAR의 LRW, RC
Fig. 2. LRW and RC of squinted spotlight SAR.

전체 RCM은 증가하게 된다. RCM이 증가하면 SAR에서 획득되는 원시데이터의 용량이 증가하므로 고용량의 저장장치가 필요하고, 영상형성을 위한 처리시간도 증가할 수밖에 없다.

2.2 가변 PRF SAR 원시데이터 송·수신모델

ASRW(Adaptive Sliding Receiving Window)와 가변 PRF 기법은 스퀘인트 SAR 데이터를 효과적으로 획득하기 위한 기법이다^[4]. 본 연구에서는 SAR 신호의 송·수신 모델을 이용하여 ASRW 기법과 가변 PRF SAR의 특성을 분석하였다. 그림 3(a)는 일반적인 SAR 송·수신 모델로 고정된 PRF와 SWST(Sampling Windowing Start Time)가 적용된다. PRI(Pulse Repetition Interval)는 SAR 신호의 송신주기를 의미하며, SWST는 SAR 신호가 송신된 후, 반사 신호를 수신받기 시작하는 시점까지의 대기시간을 의미한다.

그림 3(b)는 ASRW 기법이 적용된 SAR 송·수신 모델로 가변 SWST를 기반으로 RW(Receiving Window)의 위치가 변화됨을 확인할 수 있다. RW의 위치조절이 가능하면 데이터 획득을 위한 RW의 길이를 단축시킬 수 있으며, 획득되는 원시데이터의 용량을 감소시킬 수 있다. 하지만 ASRW 기법은 스퀘인트 각 증가에 의해 발생하는 송신 신호, Nadir 반사 신호의 간섭을 원천적으로 회피할 수 없다^[5]. 간섭회피를 위해 시스템의 설계변수가 조정되

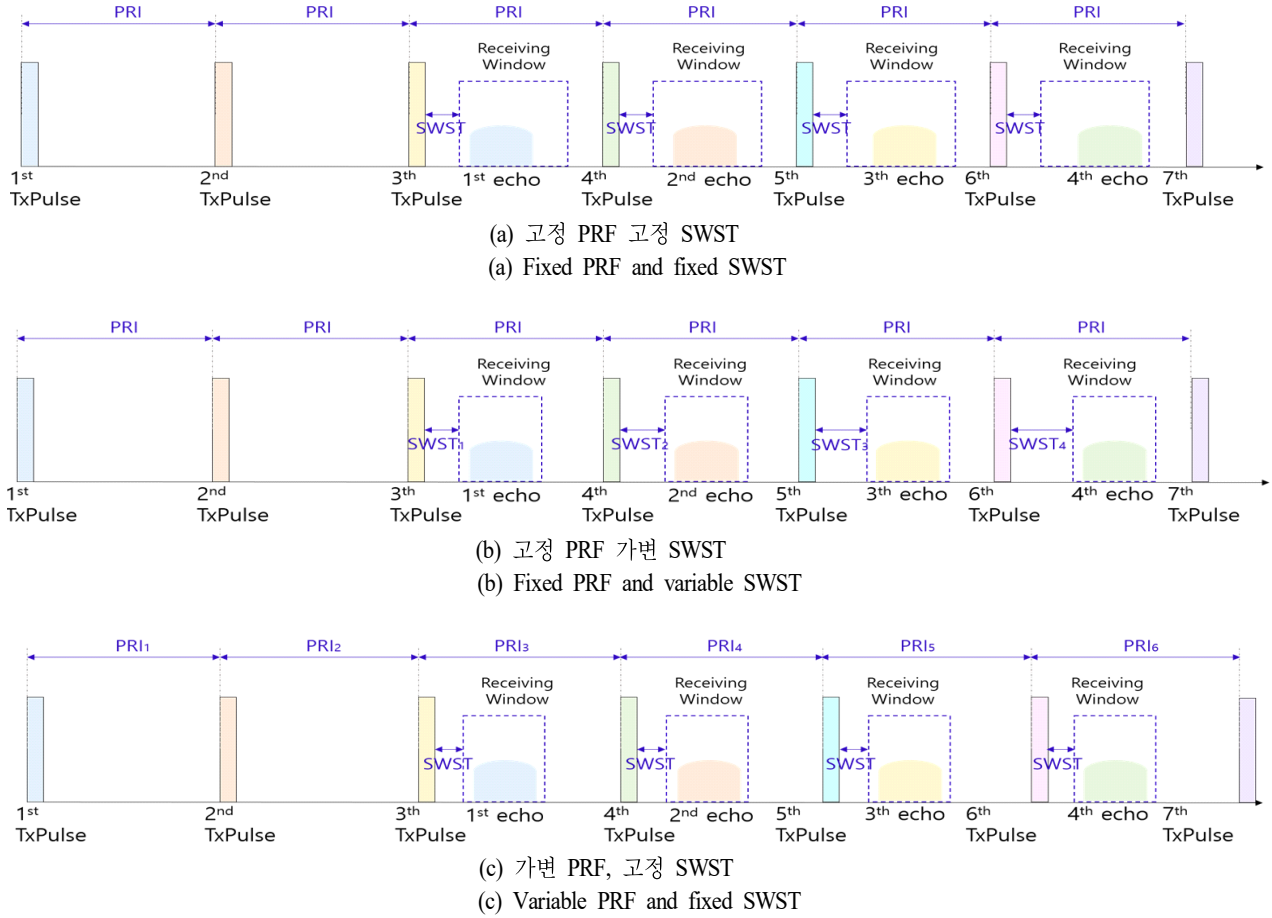


그림 3. SAR 신호 송·수신 모델

Fig. 3. SAR echo migration model.

는 과정에서 SAR 시스템의 성능이 저하될 수 있다.

그림 3(c)는 가변 PRF 기법이 적용된 SAR 송·수신 모델로 PRF를 증가 또는 감소시키며, 영상을 획득한다. 가변 PRF 기법이 적용되면 고정 SWST가 적용되더라도 데이터 획득을 위한 RW의 길이를 단축시킬 수 있으며, 원시데이터의 용량을 감소시킬 수 있다^[5]. 가변 PRF 기법은 ASRW 기법보다 시스템 구현을 위한 기술적 난이도가 높지만, PRF 조절을 통해 스캔트 각 증가에 의해 발생될 수 있는 송신 신호, Nadir 반사 신호에 의한 간섭을 효과적으로 회피할 수 있다.

식 (2)를 기반으로 LRW를 최소화 하는 가변 PRF의 설계가 가능하며, 기저대역의 SAR 원시데이터는 식 (3)으로 표현할 수 있다.

$$\frac{1}{PRF_{i+1}} = \frac{1}{PRF_i} \left(1 - \frac{2V \sin(\theta_s)}{c} \right), PRI_i = \frac{1}{PRF_i} \quad (2)$$

$$S_o(\tau, \eta_i) = w_r \left([\tau - \Delta\tau(\eta_i)] - \frac{2R(\eta_i)}{c} \right) w_a(\eta_i - \eta_c) \cdot \exp \left\{ -j\pi K_r \left[[\tau - \Delta\tau(\eta_i)] - \frac{2R(\eta_i)}{c} \right] \right\} \cdot \exp \left\{ -j\frac{4\pi f_o R(\eta_i)}{c} \right\} \quad (3)$$

$$\eta_i = \sum_{n=1}^{n=i-1} \frac{1}{PRF_i}, i \geq 2; \eta_1 = \eta_c - T_s/2 \quad (4)$$

τ 는 거리방향의 시간이고, w_r 와 w_a 는 거리방향과 방위방향의 안테나 패턴을 의미한다. 첫 번째 $\exp\{\cdot\}$ 항은 K_r 의 선형 주파수 변조율을 갖는 Chirp 신호이며, 두

번째 $\exp\{\cdot\}$ 항은 표적과 SAR의 거리변화에 따른 위상을 나타낸다. 표적의 산란특성은 수학모델의 간략화를 위하여 생략하였다. $\Delta\tau(\eta_i)$ 는 RWST(Receiving Window Start Time)로 SAR 신호를 송신하는 시점을 기준으로 반사 신호를 수신하는 RW의 시작시점을 의미한다. 일반적인 SAR 시스템에서는 RWST가 일정하지만, 가변 PRF SAR의 RWST는 방위시간에 따라 변하게 된다. RWST는 식 (5)와 같이 표현할 수 있으며, $Rank$ 는 반사 신호가 수신될 때까지 SAR 신호가 송신되는 횟수를 의미한다.

$$\Delta\tau(\eta_i) = \sum_{n=1}^{Rank} \frac{1}{PRF_{i+n-rank}} + SWST \quad (5)$$

일반적으로 SAR의 PRF는 획득되는 원시데이터의 방위방향 샘플링 주파수이다. 고정 PRF가 적용되는 일반적인 SAR 시스템에서는 획득되는 원시데이터의 방위샘플링이 균일하지만, 가변 PRF SAR의 원시데이터의 방위샘플링은 비균일한 특성을 나타낸다.

III. 가변 PRF 스포트라이트 Spotlight SAR 처리기법

3-1 보간법 기반 가변 PRF 왜곡보상 처리과정

가변 PRF SAR 원시데이터를 영상으로 형성하기 위해서는 RCM 왜곡과 비균일 샘플링을 보상하기 위한 처리과정이 적용되어야 한다.

그림 4는 보간법을 기반으로 가변 PRF에 의한 왜곡을 보상하는 처리과정이다^[5]. RWST에 의한 RCM 왜곡은 식 (6)을 기반으로 거리주파수(f_r) - 방위시간(η_i) 영역에서 보상되며, 원시데이터의 방위 비균일 샘플링은 보간법을 기반으로 균일샘플링으로 변환된다.

보간법에 사용되는 커널함수들은 저대역통과 필터의 특성을 나타낸다. 따라서 보간법을 적용하기 전에 획득되는 데이터를 기저대역으로 변환하는 과정이 선행되어야 하며, Spotlight SAR 데이터의 도플러 스펙트럼 앨리어싱 현상을 보상하는 처리과정이 적용되어야 한다. 식 (7)은 SAR 데이터의 방위방향 1차 위상 성분을 제거하는 Deskew 필터이며, 식 (8)은 Deramping 필터로 2차 위상 성분을 제거하는 필터이다.

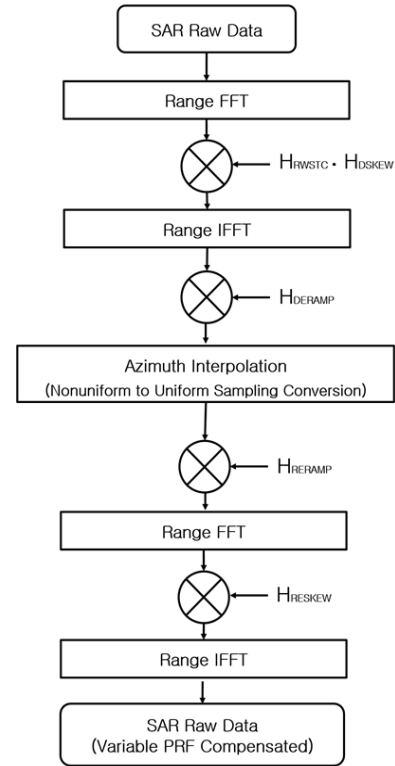


그림 4. 보간법 기반 PRF 왜곡보상 과정

Fig. 4. Interpolation based processing flows for compensating distortion of variable PRF SAR.

$$H_{RWSTC}(\eta_i, f_r) = \exp\{-j2\pi f_r \Delta\tau(\eta_i)\} \quad (6)$$

$$H_{DESKEW}(\eta_i, f_r) = \exp\left\{-j \frac{4\pi f_r V \sin(\theta_s)}{c} \eta_i\right\} \quad (7)$$

$$H_{DERAMP}(\eta_i) = \exp\left\{-j \frac{2V^2 \cos^3(\theta_s)}{\lambda R_{ref}} \eta_i^2\right\} \quad (8)$$

Deskew 필터는 식 (6)의 RCM 왜곡 보상과정과 동일한 영역에서 수행되며, Deramping 필터는 방위시간 영역에서 적용된다. Deskew 필터와 Deramping 필터가 적용되면, 데이터는 기저대역으로 변환되고, 앨리어싱 현상도 제거할 수 있다. 보간법은 Sinc, Spline, Lagrange 등의 커널함수를 기반으로 적용할 수 있으며, 방위방향 샘플링을 균일 샘플링으로 변환하는 기능을 수행한다. η 는 균일 샘플링으로 변환된 방위시간을 의미한다.

균일한 샘플링으로 복원된 SAR 원시데이터는 식 (7)과

식 (8)의 필터로 제거된 위상을 복원하는 과정이 수행된다. 식 (9)는 Reskew 필터로 Deskew 필터로 제거한 1차 위상성분을 복원하며, 식 (10)은 Reramping 필터로 Deramping 필터로 제거한 2차 위상성분을 복원하는 기능을 수행한다.

$$H_{RSKEW}(\eta, f_r) = \exp \left\{ j \frac{4\pi f_r V \sin(\theta_s)}{c} \eta \right\} \quad (9)$$

$$H_{RERAMP}(\eta) = \exp \left\{ j \frac{2V^2 \cos^3(\theta_s)}{\lambda R_o} (\eta - \eta_c)^2 \right\} \quad (10)$$

그림 4의 처리과정을 통해 가변 PRF에 의한 왜곡이 보상된 Spotlight SAR 원시데이터는 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$S_o(\eta, \tau) = w_r \left(\tau - \frac{2R(\eta)}{c} \right) w_a(\eta - \eta_c) \cdot \exp \left\{ -j\pi K_r \left[\tau - \frac{2R(\eta)}{c} \right] \right\} \exp \left\{ -j \frac{4\pi f_o R(\eta)}{c} \right\} \quad (11)$$

3-2 Deramping 기반 Spotlight SAR 사전처리 기법

가변 PRF의 왜곡이 보상되면, 일반적인 Spotlight SAR 처리 기법을 기반으로 영상형성이 가능하다^{[8],[9]}.

그림 5는 Two-Step 알고리즘으로 대표적인 Deramping 기반 Spotlight SAR 처리 알고리즘이다. Deramping 필터와 원시데이터의 방위방향 컨볼루션을 통해 도플러 엘리어싱을 보상하는 사전처리가 적용된다. Deramping 필터와의 컨볼루션은 시간-주파수 관계를 이용하여 FFT(Fast Fourier Transform)를 기반으로 구현될 수 있으며, 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다. 식 (13)의 K_w 는 기준 표적로부터 획득되는 신호의 도플러 변조율이며, K_r 은 각 표적으로부터 획득되는 신호의 도플러 변조율을 의미한다. 일반적으로 K_w 는 획득되는 영상의 중앙에 존재하는 표적에 대한 도플러 변조율이 적용된다.

$$\begin{aligned} S_A(\eta'; R_o) &= \exp \left\{ -j \frac{4\pi f_o R(\eta)}{c} \right\} \\ &\otimes \exp \left\{ -j \frac{2V^2 \cos^3(\theta_s)}{\lambda R_{ref}} (\eta - \eta_c)^2 \right\} \\ &\cong \exp \left\{ -j K_r (\eta - \eta_c)^2 \right\} \otimes \exp \left\{ -j K_w \eta'^2 \right\} \end{aligned}$$

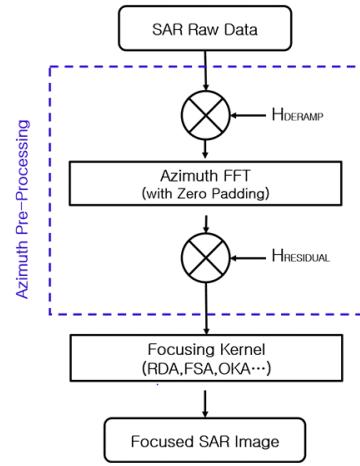


그림 5. Deramping 기반 spotlight SAR 처리기법
Fig. 5. Deramping based spotlight SAR processing.

$$\begin{aligned} &= \underbrace{\exp \{ j\pi K_w \eta'^2 \}}_{H_{RESIDUAL}} \int \exp \{ -j\pi K_r (\eta - \eta_c)^2 \} \\ &\quad \cdot \exp \{ -j\pi K_w \eta'^2 \} \exp \{ -j2\pi K_w \eta' \eta \} d\eta \\ &= \exp \{ -j\pi K_w \eta'^2 \} \underbrace{\int \exp \{ -j\pi K_r (\eta - \eta_c)^2 \} \exp \{ j\pi K_w \eta'^2 \} d\eta}_{\text{Fourier Transform Kernel}} \\ &= \exp \{ -j\pi K_w \eta'^2 \} \cdot \text{FFT} \left[\exp \{ -j\pi K_r (\eta - \eta_c)^2 \} \exp \{ j\pi K_w \eta'^2 \} \right] \quad (12) \end{aligned}$$

$$K_w = \frac{2V^2 \cos^3(\theta_s)}{\lambda R_{ref}}, \quad K_r = \frac{2V^2 \cos^3(\theta_s)}{\lambda R_o} \quad (13)$$

η' 는 주파수 변환 후, 시간-주파수 관계를 이용하여 재정의되는 방위방향의 시간을 의미하며, 식 (14)의 관계식을 이용하면 η' 영역에서의 PRF' 를 정의할 수 있다. PRF' 는 FFT에 적용되는 Zero Padding 과정을 통해 조정 가능하며, 도플러 대역폭보다 높게 설정하여 스펙트럼의 엘리어싱 현상을 보상할 수 있다. N_{FFT} 는 Zero Padding을 포함한 방위방향의 데이터 샘플 개수로 영상의 Warming 현상을 방지하기 위해 획득되는 SAR 영상의 크기를 고려하여 선정된다.

$$PRF' = |K_w| \frac{N_{FFT}}{PRF} \quad (14)$$

Deramping 기반의 사전처리를 기반으로 도플러 스펙트럼의 엘리어싱 현상을 보상하면, RDA (Range Doppler

Algorithm), CSA(Chirp Scaling Algorithm), OKA(Omega-K Algorithm) 등의 일반적인 Stripmap 데이터 처리기법을 이용하여 SAR 영상을 형성할 수 있다.

3-3 가변 PRF 스퀀트 Spotlight SAR 처리 알고리즘

가변 PRF 왜곡 보상기법과 Spotlight SAR 처리를 위한 알고리즘을 순차적으로 적용하면, 가변 PRF Spotlight SAR 데이터의 처리가 가능하다. 하지만 신속한 영상 형성을 위해서는 가변 PRF 왜곡 보상과 Spotlight SAR의 도플러 엘리머싱을 보상하는 과정이 효과적으로 결합될 필요가 있다.

그림 6은 보간법 기반의 가변 PRF 왜곡 보상과정과 스퀀트 Spotlight SAR 처리를 위한 Two-Step 알고리즘이 결합된 처리과정이다. 보간법에 의한 왜곡을 최소화 하기 위하여 Deramping 필터가 적용된 후, Reramping 필터를 적용하지 않고, 방위방향 주파수 변환을 수행함으로써 두 처리과정이 효과적으로 결합될 수 있다. SAR 포커싱을 위한 신호처리 알고리즘은 EOKA(Extended Omega-K Algorithm)를 적용하였다. EOKA는 스퀀트 SAR 처리를 위한 최적의 알고리즘 중 하나이며, MRFM(Modified Reference Multiplication), Modified Stolt-Mapping, 방위압축 처리과정으로 구성된다^{[10],[11]}.

그림 6의 방위방향 사전처리가 수행되면 주파수 영역에서의 SAR 신호는 식 (15)로 나타낼 수 있다.

$$S_1(f_\eta, f_\tau) = \exp \left\{ -j \frac{4\pi R_o}{c} \sqrt{(f_o + f_\tau)^2 - \left(\frac{cf_\eta}{2V} \right)^2} \right\} \cdot \exp \left\{ j\pi \frac{f_\eta^2}{K_w} \right\} \quad (15)$$

식 (16)의 MRFM(Modified Reference Function Multiplication) 필터는 기준거리(R_{ref})에 존재하는 표적들에 대한 RCMC(Range Cell Migration Compensation)와 고차 위상을 보상하는 역할을 수행한다.

MRFM 필터링이 수행되면, 식 (15)는 식 (17)로 나타낼

$$H_{MRFM}(f_\eta, f_\tau) = \exp \left[j \frac{4\pi R_{ref}}{c} \left(\sqrt{(f_o + f_\tau)^2 - \left(\frac{cf_\eta}{2V} \right)^2} - \sqrt{f_o^2 - \left(\frac{cf_\eta}{2V} \right)^2} \right) \right] \quad (16)$$

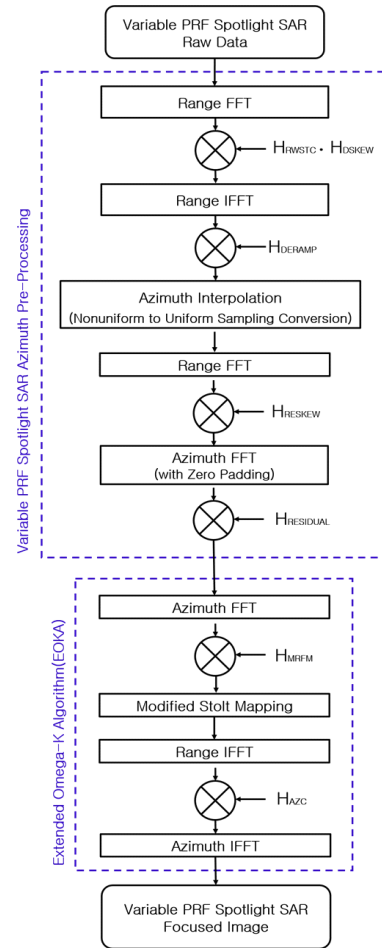


그림 6. Variable PRF 스퀀트 spotlight SAR 처리를 위한 신호처리 알고리즘 처리과정

Fig. 6. Interpolation based processing flows for compensating distortion of variable PRF SAR.

수 있다. Modified Stolt Mapping은 식 (16)의 관계식을 이용하여 기준거리에 위치하지 않는 표적들의 RCMC와 고차 위상을 보상하는 과정이다. f_τ' 은 Stolt Mapping을 통해 재정의되는 거리방향 주파수를 의미한다.

$$S_2(f_\eta, f_\tau) = S_1(f_\eta, f_\tau) \cdot H_{MRFM}(f_\eta, f_\tau) = \exp \left\{ j\pi \frac{f_\eta^2}{K_w} \right\} \exp \left[-j \frac{4\pi(R_o - R_{ref})}{c} \sqrt{(f_o + f_\tau)^2 - \left(\frac{cf_\eta}{2V} \right)^2} - j \frac{4\pi R_{ref}}{c} \sqrt{f_o^2 - \left(\frac{cf_\eta}{2V} \right)^2} \right] \quad (17)$$

$$f_{\tau}' = \sqrt{(f_o + f_{\tau})^2 - \frac{c^2 f_{\eta}^2}{4V^2}} - \sqrt{f_o^2 - \frac{c^2 f_{\eta}^2}{4V^2}} \quad (18)$$

Modified Stolt Mapping 과정이 수행되면, 거리-도플러 영역에서 식 (19)의 방위압축 필터를 적용하여 영상형성이 가능하다.

$$H_{AZC}(f_{\eta}, \tau') = \exp\left\{-j\pi \frac{f_{\eta}^2}{K_w}\right\} \exp\left[j\frac{4\pi R_o}{c}\left(\sqrt{f_o^2 - \left(\frac{cf_{\eta}}{2V}\right)^2}\right)\right] \quad (19)$$

IV. SAR 점표적 시뮬레이션 및 분석

본 연구에서는 가변 PRF 스캔트 Spotlight SAR 원시데이터의 모델링을 수행하였으며, 점표적 시뮬레이션을 통해 알고리즘의 성능을 분석하였다.

표 1은 가변 PRF Spotlight SAR 점표적 시뮬레이션을 위한 시뮬레이션 변수들이다. 0.5 m급 SAR 영상을 획득할 수 있는 X대역 위성 SAR의 시스템 변수들을 적용하였다. 직교기하의 스캔트 Spotlight SAR 기하구조를 가정하였으며, Stop-and-Go 가정^[12]을 적용하였다.

그림 7은 스캔트 Spotlight SAR 2차원 기하구조를 나타낸다. 스캔트 각은 15도를 적용하였으며, 9개의 점표적을 배치하였다. 송신 신호의 대역폭은 300 MHz를 적용하였으며, 약 3.7초 동안 안테나의 빔을 회전하여 Spotlight SAR 데이터를 획득하는 상황을 가정하였다. SAR 안테나 패턴은 방위방향 패턴만 고려하였으며, 3 dB 안테나 빔폭을 기준으로 펄스 형태를 적용하였다.

그림 8은 시뮬레이션에 적용되는 가변 PRF를 나타낸다. 가변 PRF는 식 (2)을 이용하여 구성하였으며, 3.7초 동안 3,000 Hz부터 3,026 Hz 까지 15단계로 증가한다.

그림 9는 시뮬레이션을 통해 생성한 가변 PRF Spotlight SAR 점표적 원시데이터이다. 가변 PRF에 의해 획득되는 원시데이터에 RCM 특성이 왜곡되어 나타남을 확인할 수 있다. 그림 10은 동일한 시뮬레이션 변수를 적용하여 생성한 고정 PRF Spotlight SAR의 점표적 원시데이터 생성 결과이다. 시뮬레이션 과정에서 송신 신호, Nadir 반사 신호에 대한 간섭은 고려하지 않았다. 동일한 샘플링 주파수가 적용된 시스템에서 가변 PRF SAR 원시데이터의

표 1. SAR 점표적 시뮬레이션 시스템 변수

Table 1. System parameters for SAR point target simulation.

Parameter	Value
Center frequency	9.8 GHz, X-band
Effective velocity	7,300 m/s
Altitude	570 km
Incidence angle	45 deg
Tx bandwidth	300 MHz
Azimuth beamwidth	0.3 deg
Squint angle	15 deg
Acquisition time	3.7 sec
PRF	3,000~3,026 Hz

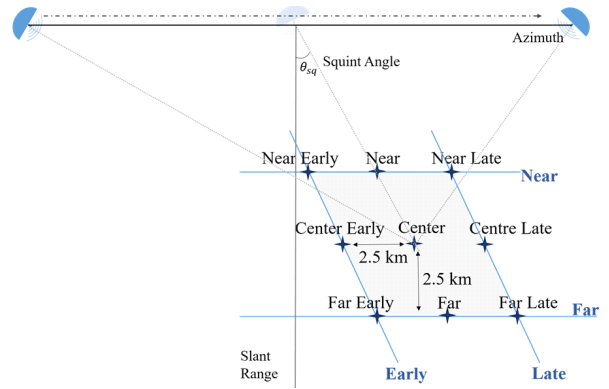


그림 7. 스캔트 spotlight SAR 2D 기하구조 및 표적 배치도

Fig. 7. Squinted spotlight SAR 2D geometry and target layer.

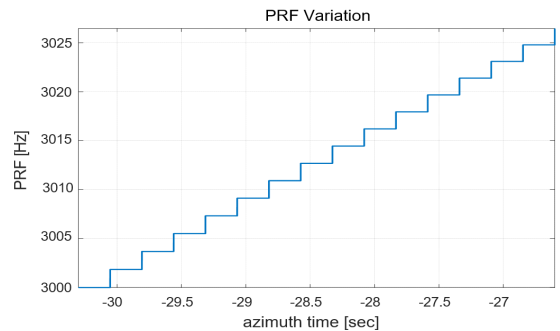


그림 8. 가변 PRF 프로파일

Fig. 8. Variable PRF profile.

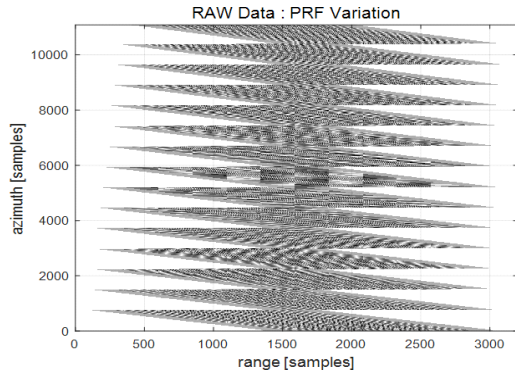


그림 9. 가변 PRF 스캔트 spotlight SAR 점표적 원시데이터

Fig. 9. Raw data simulation results for the variable PRF squinted spotlight SAR.

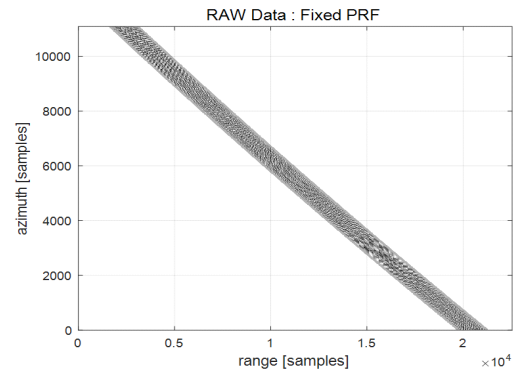


그림 10. 고정 PRF 스캔트 spotlight SAR 점표적 원시데이터

Fig. 10. Raw data simulation results for the fixed PRF squinted spotlight SAR.

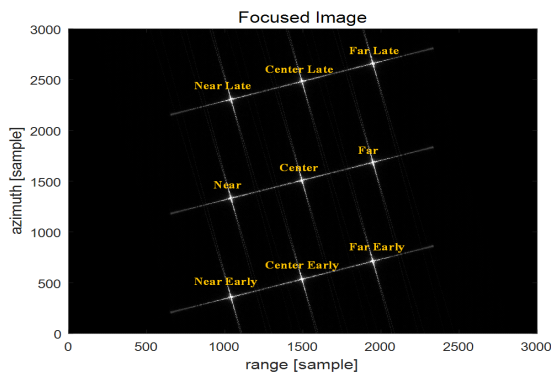


그림 11. 가변 PRF spotlight SAR 포커싱 영상

Fig. 11. Variable PRF spotlight SAR focused image.

거리방향 샘플은 3,200개이며, 고정 PRF SAR 원시데이터의 거리방향 샘플은 22,000개이다. 가변 PRF 기법을 적용하면 RCM 왜곡이 발생되지만, 획득되는 데이터의 용량을 감소시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

그림 11은 시뮬레이션을 통해 생성한 가변 PRF 스캔트 Spotlight SAR 원시데이터에 본 논문에서 제시하고 있는 처리과정을 적용한 결과이며, 9개의 표적이 영상으로 형성됨을 확인할 수 있다. 가변 PRF 왜곡 보상을 위한 보간법에는 Sinc 커널함수가 적용되었다.

그림 12는 Near Late, Far Early, Center 위치에 존재하는 각 표적들의 Contour 영상을 나타내며, 표 2는 품질분석 결과이다. 영상의 품질은 해상도, PSLR(Peak Sidelobe Ratio), ISLR(Integrated Side Lobe Ratio)을 기반으로 분석을 수행하였다. PSLR과 ISLR의 이상적인 값은 안테나 패턴과 별도의 가중치 필터가 적용되지 않은 상태를 기준으로 약 -13.26 dB와 -10.15 dB이며, 본 논문에서 제시하는 처리과정으로 생성된 점표적 영상들의 품질은 이상적인 품질의 ± 0.1 dB 이내로 확보되었음을 확인하였다.

V. 결 론

Spotlight SAR는 획득되는 영상의 작은 크기로 인하여 시간해상도가 낮을 수밖에 없지만, 스캔트 운용을 통해 성능을 보완할 수 있다. 하지만 스캔트 운용에 의해 발생하는 RCM의 증가는 SAR 시스템 설계과정과 데이터 처리과정에서 주요한 변수로 작용할 수 있다. SAR 영상 데이터의 용량이 증가할 뿐만 아니라, 시스템의 성능에도 영향을 미칠 수 있기 때문이다.

가변 PRF 기법은 Spotlight 모드의 스캔트 운용에 의해 발생하는 문제들을 극복하는 효과적인 기법 중 하나이다. 본 연구에서는 SAR 송·수신 모델을 통해 가변 PRF에 의해 발생하는 RCM 왜곡과 방위방향의 비균일 샘플링 특성을 확인하고, 보간법 기반의 보상과정을 분석하였다.

가변 PRF 스캔트 Spotlight SAR 데이터를 효과적으로 처리하기 위해서는 가변 PRF에 의한 왜곡을 보상하는 과정과 스캔트 Spotlight SAR를 처리하는 과정이 결합된 처리과정이 필요하다. 본 연구에서는 보간법 기반의 가변 PRF의 왜곡 보상과정과 Deramping 기반의 Spotlight

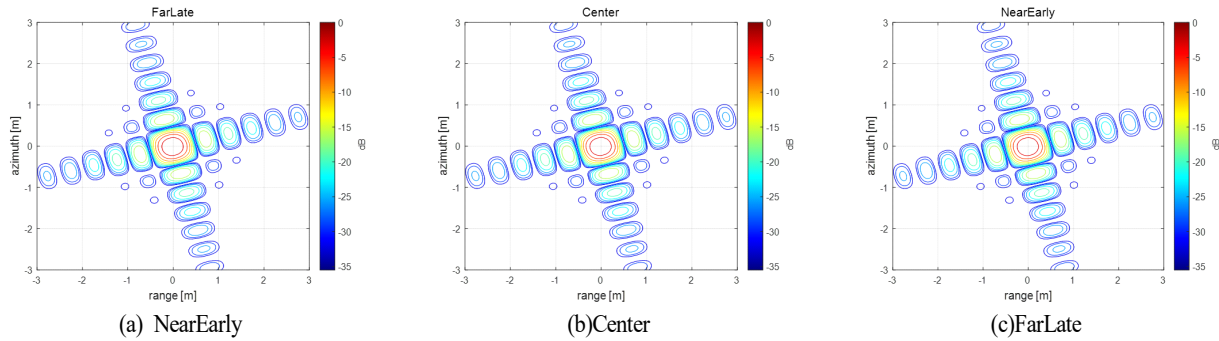


그림 12. 가변 PRF spotlight SAR 점표적 contour 영상

Fig. 12. Contour images of variable PRF spotlight SAR point spread function.

표 2. SAR 점표적 영상 품질분석표

Table 2. Quality analysis results for SAR point target image.

	Range(slant)			Azimuth		
	Resolution(m)	PSLR(dB)	ISLR(dB)	Resolution	PSLR(dB)	ISLR(dB)
NearLate	0.47	-13.27	-10.14	0.43	-13.27	-10.19
Near	0.46	-13.27	-10.14	0.42	-13.27	-10.19
NearEarly	0.47	-13.27	-10.14	0.42	-13.27	-10.19
CenterLate	0.46	-13.27	-10.14	0.43	-13.27	-10.19
Center	0.46	-13.27	-10.15	0.43	-13.27	-10.19
CenteRearly	0.46	-13.26	-10.14	0.42	-13.27	-10.19
FarLate	0.46	-13.25	-10.14	0.43	-13.26	-10.18
Far	0.46	-13.24	-10.14	0.42	-13.26	-10.18
FarEarly	0.46	-13.25	-10.14	0.42	-13.26	-10.18

SAR 처리 알고리즘이 결합된 처리기법을 제시하였다. 또한 점표적 시뮬레이션 영상의 품질분석을 통해 본 연구에서 제시하는 처리기법이 가변 PRF 스캔트 Spotlight SAR 데이터에 적용 가능성을 확인하였다. 향후에는 실제 획득되는 가변 PRF SAR 데이터를 기반으로 실질적인 검증이 수행되어야 할 것이다.

References

- [1] J. Mittermayer, A. Moreira, and O. Loffeld, "Spotlight SAR data processing using the frequency scaling algorithm," *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 37, no. 5, pp. 2198-2214, Sep. 1998.
- [2] R. Lanari, S. Zoffoli, E. Sansosti, G. Fornaro, and F. Serafino, "New approach for hybrid strip-map/spotlight SAR data focusing," *IEEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, vol. 148, no. 6, pp. 363-372, Dec. 2001.
- [3] H. Xu, J. Gao, and J. Li, "A variable PRF imaging method for high squint diving SAR," *Progress in Electromagnetics Research(PIER)*, vol. 135, pp. 215-229, 2013.
- [4] W. Yang, H. C. Zeng, J. Chen, and P. B. Wang, "Fast image-formation algorithm for ultrahigh-resolution airborne-squint spotlight synthetic aperture radar based on

- adaptive sliding receive-window technique," *Journal of Applied Remote Sensing*, vol. 8, no. 1, pp. 215-229, Jun. 2014.
- [5] H. C. Zeng, J. Chen, W. Liu, and W. Yang, "Modified omega-k algorithm for high speed platform highly-squinted staggered SAR based on azimuth non-uniform interpolation," *Sensors*, vol. 15, no. 2, pp. 3750-3765, Feb. 2015.
- [6] M. Villano, G. Krieger, and A. Moreira, "A novel processing strategy for staggered SAR," *IEEE Transaction on Remote Sensing Letter*, vol. 11, no. 11, pp. 1891-1895, Nov. 2014.
- [7] P. Prats, R. Scheiber, J. Mittermayer, A. Meta, and A. Moreira, "Processing of sliding spotlight and TOPS SAR data using baseband azimuth scaling," *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 48, no. 2, pp. 770-780, Feb. 2010.
- [8] R. Lanari, M. Tesauro, and E. Sansosti, "Spotlight SAR data focusing based on a two-step processing approach," *IEEE Transaction on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 39, no. 9, pp. 1993-2004, Sep. 2001.
- [9] D. M. Guo, H. P. Xu, and J. W. Li, "Extended wavenumber domain algorithm for highly squinted sliding spotlight SAR data processing," *Progress in Electromagnetics Research(PIER)*, vol. 114, pp. 17-32, 2011.
- [10] W. Pu, W. Li, Y. Lv, and Z. Wang, "An extended omega-K algorithm with integrated motion compensation for bistatic forward-looking SAR," in *2015 IEEE Radar Conference(RadarCon)*, Arlington, VA, 2015, pp. 1291-1295.
- [11] A. Reigber, E. Alivizatos, A. Potsis, and A. Moreira, "Extended wavenumber-domain synthetic aperture radar focusing with integrated motion compensation," *IEEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, vol. 153, no. 3, pp. 301-310, Jun. 2006.
- [12] R. Lorusso, G. Milillo, "Stop-and-go approximation effects on Cosmo-Skymed spotlight SAR data," in *2015 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium(IGARSS)*, Milan, 2015, pp. 1797-1800.

이 기 응 [국방과학연구소/연구원]

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



2015년 8월: 한국항공대학교 전자 및 항공
전자공학과 (공학사)

2017년 2월: 한국항공대학교 항공전자정
보공학 (공학석사)

2017년 2월~현재: 국방과학연구소 연구
원

[주 관심분야] SAR 신호처리, SAR 원격

탐사