

SAR-ATI를 이용한 효율적인 지상 이동 표적 보상 알고리즘

Efficient Motion Compensation Algorithm for Ground Moving Targets Based on SAR-ATI System

유보현 · 강병수 · 임병균* · 오태봉* · 김경태

Bo-Hyun Ryu · Byung-Soo Kang · Byoung-Gyun Lim* · Tae-Bong Oh* · Kyung-Tae Kim

요 약

본 논문에서는 지상 이동 표적의 SAR(Synthetic Aperture Radar) 영상 형성 과정에서 표적의 움직임에 의해 발생하는 SAR 영상의 왜곡 현상을 보상하는 알고리즘을 제안한다. 일반적인 SAR 영상 형성 알고리즘은 고정 표적과 레이다 플랫폼 사이의 거리 변화를 보상함으로써 왜곡 없는 SAR 영상을 형성하지만, 이동 표적의 경우, 표적의 움직임에 의해 야기된 추가적인 거리 변화가 왜곡된 SAR 영상을 형성한다. 본 논문에서는 지상 이동 표적의 기하학적 위치 및 움직임이 SAR 영상에 야기하는 왜곡 현상을 분석하고, SAR-ATI(SAR-Along-Track Interferometry)와 위상 정렬 기법을 이용해 기 왜곡 현상을 야기하는 표적의 모든 변수들을 추정하는 알고리즘을 제안한다. 최종적으로 본 논문에서는 잡음이 존재하는 환경에서 모의시험을 수행해 제안된 기법의 효용성을 증명한다.

Abstract

Recently, well-known SAR imaging algorithms have been developed to form the focused SAR images for stationary targets. In general, the conventional methods exploit the range variation only defined by the motion of radar platform and SAR geometry. However, for SAR imaging of ground moving targets, the motion of the targets induces an additional range shift, yielding the blurred SAR images. To overcome the problem, in this paper we propose an effective motion compensation algorithm operated under a multi-channel SAR, named along-track interferometry(ATI) and phase unwrapping to directly estimate the motion parameters of the targets. In simulations, 50 Monte-Carlo simulation results show the effectiveness of the algorithm in the presence of noise.

Key words: SAR, ATI, Parameter Estimation, Phase Unwrapping, Motion Compensation(MOCOM)

I. 서 론

합성 개구면 레이다(Synthetic Aperture Radar: SAR)는 저궤도 위성이나 항공기, 무인기 등의 탑재체에 장착되어 표적 혹은 관심 영역의 반사도(reflectivity map)를 형성하

는 레이더이다^[1]. SAR는 기존의 광학 센서와 달리 주야에 관계없이 관측이 가능하고, 기상 환경에 영향을 받지 않으므로 국방 및 민수 분야에서 다양하게 활용되고 있다.

일반적으로 SAR 영상은 레이다가 움직이고 표적 혹은 관심영역이 고정된 SAR 기하 구조에서 형성된다. 지난

「이 연구는 2017학년도 한국항공우주연구원이 지원하는 연구비의 지원으로 연구되었음.」

포항공과대학교 전자전기공학과(Department of Electrical Engineering, Pohang University of Science and Technology)

*한국항공우주연구원(Korea Aerospace Research Institute)

· Manuscript received April 12, 2017 ; Revised June 5, 2017 ; Accepted June 27, 2017. (ID No. 20170412-034)

· Corresponding Author: Kyung-Tae Kim (e-mail: kkt@postech.ac.kr)

수십 년간 발전된 SAR 영상 형성 알고리즘들은 위 기하 구조에서 발생하는 레이더와 표적 사이의 거리 변화를 적절히 보상하여 왜곡 없는 SAR 영상을 형성한다^[2]. 그러나 이동 표적의 경우, 표적의 움직임이 레이더와 표적 사이에 추가적인 거리 변화를 야기하고, 이는 왜곡된 SAR 영상 형성을 초래하기 때문에 이에 대한 보상 과정이 필요하다.

지상 이동 표적에 의한 SAR 영상의 왜곡 현상은 방위 방향으로의 위치 오차와 퍼짐 현상으로 구분된다^{[3],[4]}. 이러한 왜곡 현상은 표적의 거리 및 방위 방향으로의 기하학적 초기 위치(x_0, y_0)와 이동 속도(v_x, v_y)에 의해 결정되므로 해당 변수들을 추정하여 기 왜곡 현상을 보상할 수 있다.

기존의 지상 이동 표적 보상 알고리즘들의 경우, SAR 영상 형성 시 표적의 방위 방향으로의 초기 위치 y_0 에 의한 영향을 무시하고 표적의 속도에 의해 기인된 왜곡 현상만을 보상하였다^{[3]~[7]}. 그러나 y_0 의 영향이 커질수록 보상되지 않은 y_0 값에 의해 형성된 SAR 영상에 방위 방향으로 위치 오차가 발생한다. 따라서 기존의 알고리즘에 y_0 값을 추정하여 상기 왜곡 현상을 보상하는 과정이 필요하게 된다.

본 논문에서는 위의 문제를 해결하기 위해 2채널 SAR along-track interferometry(SAR-ATI) 시스템에서 위상 정렬(phase unwrapping) 기법을 활용하여 지상 이동 표적의 왜곡 보상을 수행하는데 필요한 모든 변수(x_0, y_0, v_x, v_y)를 추정하는 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘에서는 먼저 SAR-ATI를 이용하여 지상 이동 표적을 탐지하고, 표적의 거리 방향으로의 속도(v_x)를 추정한다. 다음으로 위상 정렬을 이용하여 이동 표적에 대한 수신 신호의 위상을 획득한 후, 이를 이용하여 표적의 방위 방향으로의 속도(v_y)와 초기 위치(x_0, y_0)를 추정한다. 마지막으로 추정된 변수들을 이용하여 표적의 움직임에 의한 SAR 영상의 왜곡 현상을 보상한다.

본 논문에서는 신호 대 잡음 비율(signal-to-noise ratio: SNR)을 변화시켜 50번씩 몬테-카를로(Monte-Carlo) 모의 실험을 수행하였다. 제안된 기법은 잡음이 존재하는 환경에서 모든 표적 변수를 매우 정확히 추정하며, 기존의 이

동 표적 보상 알고리즘에서 보상되지 않는 방위 방향 위치 오차를 효과적으로 보상하여 표적의 움직임에 의해 야기되는 SAR 영상의 모든 왜곡 현상을 보상할 수 있다.

II. 지상 이동 표적의 영향

레이더 플랫폼과 지상 이동 표적 사이의 기하구조는 그림 1과 같다. 이 때, 방위 방향은 항공기의 진행방향(y), 거리 방향은 이에 수직인 방향(x)으로 정의된다.

일반적으로 거리 셀 천이 보상(range cell migration compensation: RCMC)이 완료된 후의 SAR 수신 신호는 방위 시간 η 에 대해 식 (1)과 같이 표현된다.

$$s(\eta) = \exp[j\phi(\eta)] = \exp\left[j\frac{4\pi f_0}{c}R(\eta)\right] \quad (1)$$

여기서 f_0 는 중심 주파수, c 는 빛의 속도이다. 이 때, 식 (1)의 위상 성분 중 $R(\eta)$ 는 레이더와 표적 사이에 레이더 가시선 방향으로의 거리 변화이고, 이는 식 (2)와 같이 테일러 급수 전개(Taylor-series expansion)에 따라 η 에 대한 이차식으로 표현된다^[5].

$$\begin{aligned} R(\eta) &= |r_1(\eta) - r_2(\eta)| \\ &= \sqrt{(x_0 + v_x\eta)^2 + (y_0 + (v_y - V_p)\eta)^2 + H^2} \\ &\cong R_0 + v_R\eta + \frac{1}{2}a_R\eta^2 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 R_0 는 $\eta = 0$ 일 때의 레이더와 표적 사이의 초기 거리이고, $r_1(\eta)$ 는 레이더 플랫폼의 위치 벡터, $r_2(\eta)$ 는 표적의 위치 벡터이며, 이는 식 (3)과 같이 정의된다.

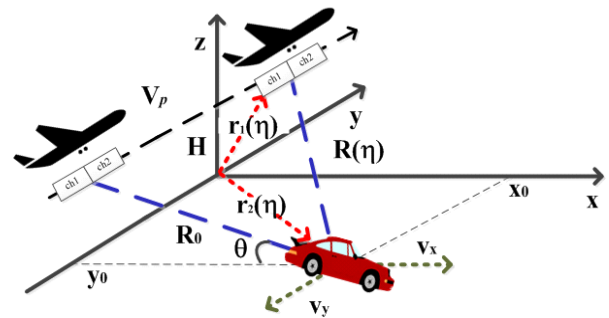


그림 1. 지상 이동 표적과 SAR 시스템의 기하 구조
Fig. 1. SAR geometry for ground moving target.

$$\begin{aligned} r_1(\eta) &= [0, V_p\eta, H]^T, \\ r_2(\eta) &= [x_0 + v_x\eta, y_0 + v_y\eta, H]^T \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 H 와 V_p 는 레이더 플랫폼의 고도와 이동 속도이며, (x_0, y_0) 는 거리 및 방위 방향으로의 표적의 초기 위치, (v_x, v_y) 는 거리 및 방위 방향으로의 표적의 이동 속도를 각각 나타낸다.

식 (2)의 계수 R_0 , v_R , 그리고 a_R 은 식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} R_0 &= \sqrt{x_0^2 + y_0^2 + H^2}, \\ v_R &= \frac{v_x x_0 + (v_y - V_p)y_0}{R_0}, \\ a_R &= \frac{v_x^2 + (v_y - V_p)^2}{2R_0} \end{aligned} \quad (4)$$

이동 표적이 존재하는 SAR 영상 형성 기하구조 내에서 식 (2)의 $R(\eta)$ 는 식 (5)와 같이 레이더 플랫폼의 움직임에 의해 발생하는 거리 변화량 $R_s(\eta)$ 와 표적에 의해 발생하는 거리 변화량 $R_m(\eta)$ 의 합으로 재 정의될 수 있다.

$$R(\eta) = R_s(\eta) + R_m(\eta) \quad (5)$$

이 때, $R_s(\eta)$ 와 $R_m(\eta)$ 은 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} R_s(\eta) &= R_0 + v_s\eta + \frac{1}{2}a_s\eta^2 \\ &= R_0 - \frac{y_0 V_p}{R_0}\eta + \frac{V_p^2}{2R_0}\eta^2, \\ R_m(\eta) &= v_m\eta + \frac{1}{2}a_m\eta^2 \\ &= \frac{v_x x_0 + v_y y_0}{R_0}\eta + \frac{v_x^2 + v_y^2 - 2v_y V_p}{2R_0}\eta^2 \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 v_s 와 a_s 는 레이더의 움직임에 의한 레이더 가시선 방향으로의 속도와 가속도, v_m 과 a_m 은 표적의 움직임에 의한 레이더 가시선 방향으로의 속도와 가속도 성분이고, 이들은 식 (7)과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} v_s &= -\frac{y_0 V_p}{R_0}, \quad a_s = \frac{V_p^2}{R_0}, \\ v_m &= \frac{v_x x_0 + v_y y_0}{R_0}, \quad a_m = \frac{v_x^2 + v_y^2 - 2v_y V_p}{R_0} \end{aligned} \quad (7)$$

정리하면, 이동 표적에 대한 식 (1)의 수신 신호는 레이더 플랫폼에 의한 거리 변화 $R_s(\eta)$ 와 표적의 움직임에 의한 거리 변화 $R_m(\eta)$ 의 합으로써 식 (8)과 같이 표현된다.

$$s(\eta) = \exp \left[j \frac{4\pi f_0}{c} (R_s(\eta) + R_m(\eta)) \right] \quad (8)$$

일반적인 SAR 영상 형성 알고리즘들은 표적 혹은 관심 영역이 고정된 기하 구조에서 SAR 영상을 형성하기 때문에 식 (8)의 위상 성분 중 $R_s(\eta)$ 에 의한 거리 변화만을 고려한다^[2]. 상기 알고리즘들 중 range-Doppler algorithm (RDA)은 $R_s(\eta)$ 중 a_s 에 의한 거리 변화를 η 에 대한 선형 주파수 변조(Linear Frequency Modulation: LFM) 신호로 가정하고, 방위 방향으로 정합 필터(matched filter)를 수행함으로써 왜곡 없는 SAR 영상을 형성한다.

그러나 지상 이동 표적의 경우, 레이더와 표적 사이에 $R_s(\eta)$ 외에 추가적인 거리 변화량 $R_m(\eta)$ 이 발생하고, $R_m(\eta)$ 의 a_m 은 RDA의 정합 필터에 부정합(mismatch)을 야기하므로 왜곡된 SAR 영상을 형성한다. 기 왜곡 현상은 v_m 에 의한 방위 방향으로 위치 오차와 a_m 에 의한 퍼짐 현상으로 구분된다.

상기 v_m 과 a_m 은 식 (7)의 결과와 같이 표적의 거리 및 방위 방향으로의 기하학적 초기 위치 (x_0, y_0) 와 이동 속도 (v_x, v_y) 에 의해 결정되므로 기 변수들을 추정하여 $R_m(\eta)$ 을 보상하고, 왜곡된 SAR 영상을 보정할 수 있다.

기존의 이동 표적 SAR 영상 형성 알고리즘들의 경우, 식 (7)의 v_m 중 x_0 에 의한 거리 변화량 $\frac{x_0 v_x}{R_0}$ 가 y_0 에 의한 거리 변화량 $\frac{v_y y_0}{R_0}$ 보다 크기 때문에, 식 (2)의 $R(\eta)$ 을 식 (9)와 같이 근사하였다.

$$R(\eta) \cong R_0 + \frac{x_0 v_x}{R_0}\eta + \frac{v_x^2 + (v_y - V_p)^2}{2R_0}\eta^2 \quad (9)$$

그 결과, 식 (7)의 v_m 이 $\frac{x_0 v_x}{R_0}$ 로 간소화 되고, 이 중 $\frac{x_0}{R_0}$ 는 레이더 입사각으로 결정되므로, 기존의 알고리즘들은 이동 표적의 속도 (v_x, v_y) 만을 추정해 v_m 과 a_m 성분을 보정하였다. 그러나 y_0 의 값이 커질수록 기 값에서

기인한 거리 변화량 $\frac{v_y y_0}{R_0}$ 성분을 무시할 수 없게 되며, 이에 따라 이동 표적에 대한 SAR 영상 형성 시 보상되지 않은 y_0 에 의해 방위 방향으로의 위치 오차가 발생하므로 y_0 를 추정하여 상기 왜곡 현상을 보상하는 과정이 필요하게 된다.

III. 지상 이동 표적 변수 추정

본 논문에서는 지상 이동 표적에 의한 왜곡 현상을 보상하는데 필요한 모든 표적 변수 (x_0, y_0, v_x, v_y)를 추정하기 위해 SAR-ATI와 위상 정렬 기법을 활용한다.

SAR-ATI는 둘 이상의 SAR 영상들을 이용해 인터페로그래(interferogram)를 형성하고, 이의 인터페로메트릭 위상(interferometric phase)을 유도하여 이동 표적을 탐지하는 레이더 시스템이다^[6]. 인터페로메트릭 위상의 값은 이동 표적의 거리 방향 속도 v_x 에 의해 결정되므로 먼저 SAR-ATI를 이용하여 이동 표적을 탐지한 후, 기 위상 값을 이용해 \hat{v}_x 를 추정한다. 다음으로, 위상 정렬을 통해 식 (8)의 위상 성분을 획득하고, 이에 2차 최소 자승법(least-square method)을 수행하여 식 (4)의 계수 ($\hat{R}_0, \hat{v}_R, \hat{a}_R$)를 추정한다. 마지막으로 SAR-ATI로 주어진 \hat{v}_x 와 위상 정렬을 통해 추정된 ($\hat{R}_0, \hat{v}_R, \hat{a}_R$) 사이의 관계식(식 (4))을 이용해 표적의 방위 방향 속도 \hat{v}_y 와 초기 위치 (\hat{x}_0, \hat{y}_0)를 추정한다.

본 논문에서 제안한 알고리즘은 지상 이동 표적의 속도 (\hat{v}_x, \hat{v}_y)뿐 아니라 초기 위치 (\hat{x}_0, \hat{y}_0)까지 추정하기 때문에, 기존의 알고리즘에서 보상되지 않은 $R_m(\eta)$ 에 의한 SAR 영상의 추가적인 방위 방향 위치 오차를 보상할 수 있다. 이와 더불어, 제안된 알고리즘은 표적에 대한 초기 위치 및 속도 성분을 제공하기 때문에, SAR 영상을 이용한 이동 표적 추적을 보다 용이하게 한다. 제안된 알고리즘의 지상 이동 표적 변수 추정 과정은 그림 2와 같다.

3-1 SAR-ATI를 이용한 거리 방향 속도 측정

본 논문에서는 그림 3과 같이 SAR-ATI 시스템을 위해 하나의 송신 채널과 두 개의 수신 채널을 사용하는 dual

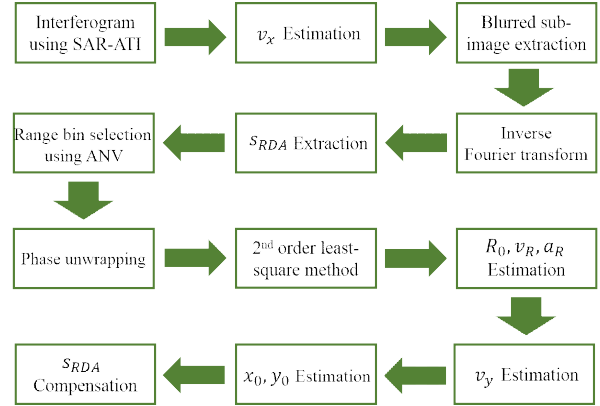


그림 2. 변수 추정 과정

Fig. 2. Flowchart of the proposed algorithm.

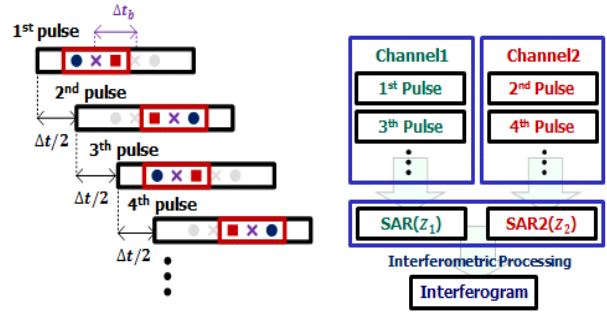


그림 3. DRA 운용 모드

Fig. 3. DRA operating mode.

receive antenna(DRA)를 사용한다.

첫 번째 수신 채널에서 RDA를 적용해 형성한 SAR 영상을 Z_1 이라 하고, 두 번째 수신 채널에서 형성한 SAR 영상을 Z_2 라 할 때, SAR-ATI의 인터페로메트릭 위상 ϕ_{ATI} 은 식 (10)과 같다^[6].

$$\phi_{ATI} = \text{phase}(Z_1 Z_2^*) = \frac{4\pi f_0 d v_x}{c V_p \cos \theta} \quad (10)$$

여기서 d 는 두 수신 채널 간의 거리이고, θ 는 레이더 입사각이다.

ϕ_{ATI} 의 값은 표적의 거리 방향으로의 속도 v_x 에 의해 결정되므로, ϕ_{ATI} 를 이용해 지상 이동 표적을 탐지할 수 있다. 또한 탐지된 지상 이동 표적의 거리 방향 속도 v_x 는 식 (10)의 인터페로메트릭 위상 ϕ_{ATI} 와 SAR 기하 구

조를 이용하여 식 (11)과 같이 유도된다^[6].

$$\hat{v}_x = \frac{c V_p \phi_{ATI}}{4\pi f_0 d \cos \theta} \quad (11)$$

식 (10) 과 (11)의 결과로 SAR-ATI 시스템을 이용하여 지상 이동 표적을 탐지하고, 기 표적의 거리 방향으로의 속도 \hat{v}_x 를 획득한다.

3-2 위상 정렬을 이용한 레이다 가시선 방향으로의 계수 추정

SAR-ATI 시스템을 이용하여 지상 이동 표적을 탐지했을 때, 기 표적에 의해 왜곡 현상이 야기된 부분 영상을 추출하고, 추출된 부분 영상에 방위 방향 역 푸리에 변환 (Inverse Fourier Transform)을 수행하여 식 (8)의 수신 신호 $s_{RDA}(\eta)$ 를 획득할 수 있다.

앞서 유도한 것처럼, $s_{RDA}(\eta)$ 의 위상 신호는 레이다와 표적 사이의 거리 변화량에 대응되므로 기 위상을 획득하고, 이의 계수를 유도하여 표적의 방위 방향으로의 속도 v_y 와 초기 위치 (x_0, y_0) 를 추정할 수 있다. 이를 위해 위상 정렬 기법을 사용한다.

$s_{RDA}(\eta)$ 의 위상에 위상 정렬을 수행하기 위해선 이동 표적의 수신 신호가 존재하는 특정 거리 빈(range bin)을 선택하는 과정이 필요하다. 이 과정에 amplitude normalized variance(ANV)을 이용한다^[8].

n 번째 거리 빈 $s_{RDA_n}(\eta)$ 의 ANV 값은 식 (12)와 같이 계산된다.

$$\sigma_n = 1 - \frac{E(|s_{RDA_n}(\eta)|)^2}{E(|s_{RDA_n}(\eta)|^2)} \quad (12)$$

여기서 E 는 expectation 연산자이다.

표적이 존재하는 거리 빈의 분산 값은 그렇지 않은 거리 빈의 분산 값보다 작으므로, ANV로 모든 거리 빈의 분산을 계산하고, 계산된 값을 비교해 가장 작은 ANV 값을 가지는 n_0 번째 거리 빈에서의 수신 신호 $s_{RDA}^{n_0}(\eta)$ 를 획득한다.

$s_{RDA}^{n_0}(\eta)$ 의 위상에 위상 정렬 과정을 통해 획득한 신호를 $\phi_{ph}(\eta)$ 라 할 때, 레이다 플랫폼과 표적 사이의 거리

$\hat{R}(\eta)$ 는 식 (1)과 획득한 $\phi_{ph}(\eta)$ 을 이용하여 식 (13)과 같이 유도된다.

$$\hat{R}(\eta) = \frac{c}{4\pi f_0} \hat{\phi}_{ph}(\eta) = \hat{R}_0 + \hat{v}_R \eta + \frac{1}{2} \hat{a}_R \eta^2 \quad (13)$$

이 때, 식 (13)의 계수 \hat{v}_R 과 \hat{a}_R 은 식 (4)의 결과로 식 (14)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \hat{v}_R &= \frac{\hat{v}_x \hat{x}_0 + (\hat{v}_y - V_p) \hat{y}_0}{\hat{R}_0}, \\ \hat{a}_R &= \frac{\hat{v}_x^2 + (\hat{v}_y - V_p)^2}{2\hat{R}_0} \end{aligned} \quad (14)$$

다음으로 식 (13)의 \hat{R}_0 , \hat{v}_R , \hat{a}_R 를 추정하기 위해 $\phi_{ph}(\eta)$ 에 η 에 대한 이차 최소 자승법을 수행한다. 상기 추정된 계수들 (\hat{R}_0 , \hat{v}_R , \hat{a}_R)과 SAR-ATI 기법을 통해 획득한 \hat{v}_x 를 이용하여 표적의 방위 방향으로의 속도 v_y 및 초기 위치 (x_0, y_0) 를 추정할 수 있다.

3-3 방위 방향 속도 추정

지상 이동 표적의 방위 방향 속도 v_y 는 $R(\eta)$ 의 이차 계수 a_R 과 관계되므로 위상 정렬을 통해 획득한 식 (13)과 (14)의 계수 (\hat{R}_0 , \hat{a}_R)와 SAR-ATI를 통해 추정된 거리 방향 속도 \hat{v}_x 를 이용하여 식 (15)와 같이 추정한다.

$$\hat{v}_y = V_p - \sqrt{2\hat{R}_0 \hat{a}_R - \hat{v}_x^2} \quad (15)$$

3-4 표적의 초기 위치 추정

지상 이동 표적의 초기 위치 (x_0, y_0) 는 그림 4의 SAR 기하 구조에 의해 식 (16)과 같이 정의된다.

$$x_0 = R_0 \cos \theta \cos \phi, \quad y_0 = R_0 \cos \theta \sin \phi \quad (16)$$

여기서 레이다 입사각 θ 는 주어진 변수이고, 초기 거리 R_0 는 식 (13)의 결과로 결정되므로, (x_0, y_0) 는 방위각 ϕ 에 대한 단일 변수로 표현된다. ϕ 는 $R(\eta)$ 의 일차 계수 a_R 과 관계되므로 위상 정렬을 통해 추정된 식 (13)과 (14)의 계수 (\hat{R}_0 , \hat{v}_R)을 이용하여 방위각 $\hat{\phi}$ 를 식 (17)과 같이

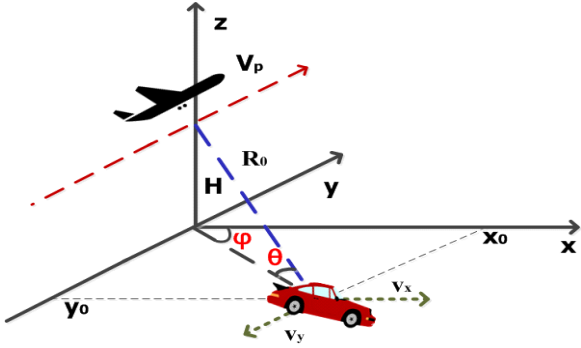


그림 4. 지상 이동 표적의 초기 위치와 SAR 기하 구조
Fig. 4. Initial position of ground moving target and SAR geometry.

추정한다.

$$\hat{\phi} = \left(\frac{\hat{v}_R}{\cos\theta} \right) / (\hat{v}_y - V_p) \quad (17)$$

일반적인 SAR 기하 구조에서 ϕ 는 매우 작은 값을 가지므로, 식 (16)은 식 (18)과 같이 근사된다.

$$x_0 \cong R_0 \cos\theta, y_0 \cong R_0 \cos\theta \phi \quad (18)$$

식 (17)의 추정된 $\hat{\phi}$ 를 이용하여 표적의 초기 위치 (\hat{x}_0 , \hat{y}_0)를 식 (19)와 같이 추정한다.

$$\hat{x}_0 = \hat{R}_0 \cos\theta, \hat{y}_0 = \hat{R}_0 \cos\theta \hat{\phi} \quad (19)$$

3.5 왜곡된 SAR 영상 보상

본 논문에서 제안한 변수 추정 기법을 이용해 추정된 표적 변수 (\hat{v}_x , \hat{v}_y , \hat{x}_0 , \hat{y}_0)와 이를 이용한 보상함수 H_{ph} 는 식 (20)과 같다.

$$H_{ph}(\eta) = \exp \left[j \frac{4\pi f_0}{c} \left(\frac{\hat{v}_x \hat{x}_0 + \hat{v}_y \hat{y}_0}{\hat{R}_0} \eta + \frac{\hat{v}_x^2 + \hat{v}_y^2 - 2 V_p \hat{v}_y}{\hat{R}_0} \eta^2 \right) \right] \quad (20)$$

기 보상함수 H_{ph} 를 이용하여 지상 이동 표적의 움직임에 의한 왜곡 현상을 보정한 신호 $s_{com}(\eta)$ 는 식 (21)과 같다.

$$\begin{aligned} s_{com}(\eta) &= s_{RDA}(\eta) H_{ph}(\eta) \\ &= \exp \left[-j \frac{4\pi f_0}{c} \frac{y_0 V_p}{R_0} \right] \end{aligned} \quad (21)$$

$s_{com}(\eta)$ 에 방위 방향 푸리에 변환 하면 지상 이동 표적에 의해 야기된 방위 방향 위치 오차와 퍼짐 현상이 보정된 SAR 영상이 형성된다.

IV. 모의시험 결과

4.1 지상 이동 표적 보상 알고리즘

본 절에서는 앞서 기술된 지상 이동 표적의 움직임에 의한 영향을 분석하는 모의시험을 수행한다. 먼저 표적에 해당하는 점 산란원에 반사되어 수신되는 SAR 신호를 모델링하고, RDA를 이용해 표적의 왜곡된 SAR 영상을 형성한다. 이 때, SAR-ATI를 이용해 지상 이동 표적을 탐지하고, 왜곡이 일어난 부분 영상을 추출 후, 본 논문에서 제안한 변수 추정 기법을 이용해 표적의 변수를 추정한다. 최종적으로 추정된 표적변수로 왜곡된 SAR 영상을 보정한다.

본 모의시험에서 수행한 SAR 운용모드는 stripmap SAR이며, 송신 파형은 LFM 신호이다. 모의시험에서 사용한 변수와 표적 설정은 표 1~3과 같다.

주어진 모의시험 시나리오에서 기존의 RDA 기법을 이용하여 이동 표적에 대한 SAR 영상을 형성한 경우, 그림 5의 결과와 같이 표적의 움직임에 의해 방위 방향으로 약 -30 m의 위치 오차와 심각한 퍼짐 현상이 발생한다. 따라서 이동 표적에 대한 SAR 영상은 표적의 움직임에 의한 왜곡 현상을 보정하는 과정이 필요하며, 해당 과정을 위하여 본 논문에서 제안한 기법을 사용한다.

표 1. 모의시험 변수

Table 1. Simulation parameters.

Simulation parameters	Value
Carrier frequency f_0	1 GHz
Frequency bandwidth B	128 MHz
Pulse width	1 us
Pulse repetition frequency(PRF)	3 kHz
Coherent processing interval(CPI)	0.6 s
SNR	20 dB

표 2. 레이더 플랫폼 설정

Table 2. Radar platform parameters.

Radar platform parameters	Value
Antenna inter-channel distance d	2 m
Altitude H	10 km
Platform velocity V_p	2 km/s
Radar incidence angle θ	27°

표 3. 지상 이동 표적 설정

Table 3. Ground moving target parameters.

Ground moving target parameters	Value
Initial position of ground moving target in range x_0	5.0953 km
Initial position of ground moving target in azimuth y_0	500 m
Velocity of ground moving target in range v_x	10 m/s
Velocity of ground moving target in azimuth v_y	50 m/s

그림 6은 ANV를 이용하여 표적이 존재하는 거리 빈 n_0 의 위상 $\phi_{ph}(\eta)$ 을 추출하고, 이에 방위 시간 η 에 대한 이차 최소 자승법을 적용하여 $\hat{R}(\eta)$ 을 유도한 결과이다. 추정된 거리 변화량 $\hat{R}(\eta)$ 의 계수 (\hat{R}_0 , \hat{v}_R , \hat{a}_R)의 값은 표 4와 같다.

SAR-ATI 시스템을 통해 표적의 거리 방향 속도 \hat{v}_x 가 주어질 때, 식 (15)와 (19)의 결과로 추정된 표적의 방위 방향 속도 \hat{v}_y 와 초기 위치 (\hat{x}_0 , \hat{y}_0) 값은 표 5와 같다.

본 논문에서는 SAR-ATI로 주어진 \hat{v}_x 와 제안된 기법으로 추정된 변수 (\hat{v}_y , \hat{x}_0 , \hat{y}_0) (표 5))를 이용하여 식 (21)의 보상함수 H_{ph} 를 설정하고, 그림 5의 왜곡된 SAR 영상을 보상하였다. 그림 7(a)의 결과와 같이 그림 5의 방위 방향 위치 오차와 퍼짐 현상이 효과적으로 보상을 확인하였다.

그러나 기존의 이동 표적 보상 알고리즘은 y_0 에 의한 거리 변화량 $\frac{v_y y_0}{R_0}$ 의 영향을 무시하므로 보상되지 않은 y_0 에 의해 추가적인 방위 방향 위치 오차가 발생하며, 이

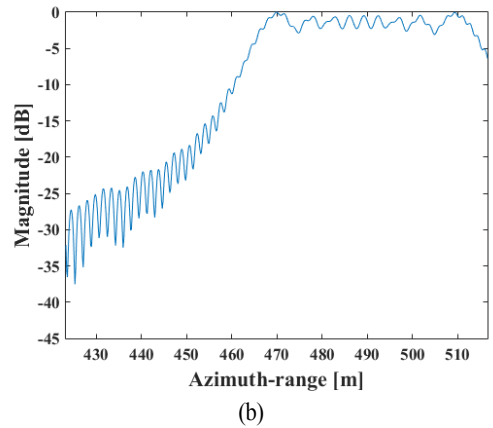
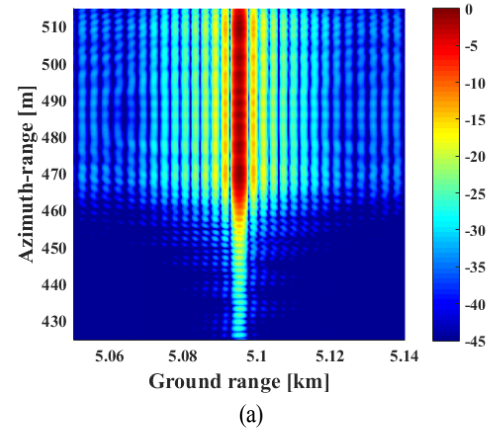


그림 5. (a) 왜곡된 SAR 영상과 (b) 이의 방위 방향 점산란 함수(Point Spread Function: PSF)

Fig. 5. (a) Blurred SAR image and (b) its PSF in azimuth direction.

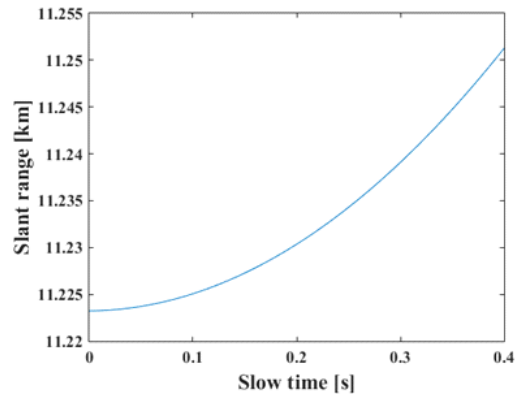


그림 6. 추정된 거리 변화량 $\hat{R}(\eta)$

Fig. 6. Estimated range variation $\hat{R}(\eta)$.

표 4. 추정된 거리 계수

Table 4. Estimated range equation coefficients.

Estimated range equation coefficients	Value
\hat{R}_0	$1.12 \cdot 10^4$
\hat{v}_R	-82.27
\hat{a}_R	169.27

표 5. 추정된 표적 변수

Table 5. Estimated target parameters.

Target parameters	Actual	Estimated
\hat{v}_y	50 m/s	49.83 m/s
\hat{x}_0	5.0953 km	5.076 km
\hat{y}_0	500 m	499.7 m

의 결과는 그림 7(b) 및 그림 8과 같다. 본 모의시험 환경에 기존의 알고리즘을 적용한 경우, 점 산란원의 방위 방향 초기 위치($y_0 = 500$ m)에서 약 12 m의 위치 오차가 발생하였다. 따라서 보다 일반적인 지상 이동 표적 보상 알고리즘을 수행하기 위해 이동 표적의 방위 방향 초기 위치에 의한 영향을 고려해야 하며, 제안한 기법이 상기 왜곡 현상을 효과적으로 보상함을 확인하였다.

4.2 몬테-카를로 모의시험

본 논문에서는 제안한 이동 표적 보상 알고리즘의 변수 추정 과정의 효율성을 증명하고, SAR 수신 신호에 잡음이 존재하는 환경에서 추정된 변수의 정확도를 확인하기 위하여 SNR을 변화시켜 50번씩 몬테-카를로 모의시험을 수행하였다. 여기서 추정된 변수의 상대 오차(relative error)를 계산하여 변수 추정 과정의 정확도를 확인하였다. 그림 9는 SAR-ATI 시스템을 통해 표적의 거리 방향 속도 \hat{v}_x 가 주어졌을 때, 추정된 표적 변수 (\hat{v}_y , \hat{x}_0 , \hat{y}_0)에 대한 상대 오차를 도시한 결과이다. (\hat{v}_y , \hat{x}_0 , \hat{y}_0) 모두 SNR이 낮을수록 잡음의 영향이 커져 추정 오차가 크지만, 10 dB 이상에서는 최대 0.382 %로 매우 낮은 오차를 가짐을 확인할 수 있다. 따라서 본 논문에서 제안한 이동 표적 보상 알고리즘이 효과적으로 모든 표적 변수를 추

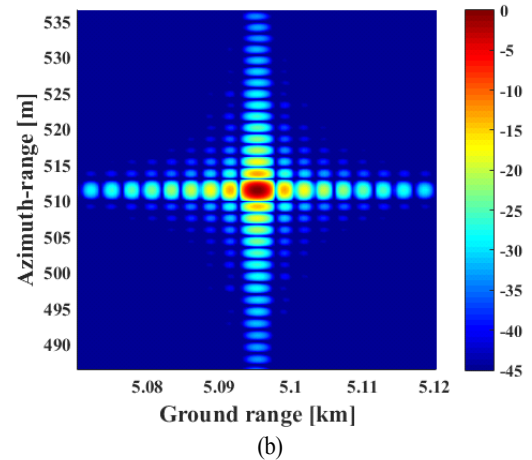
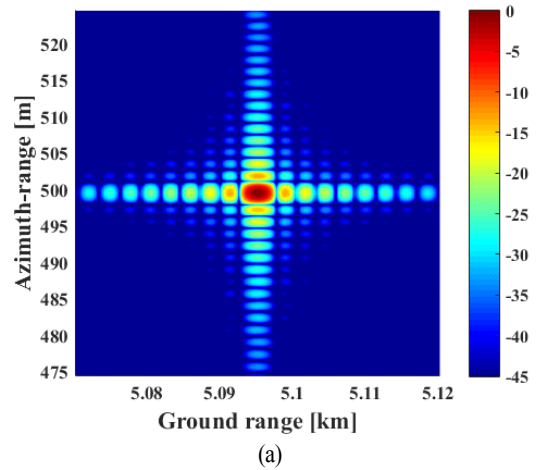


그림 7. (a) 제안된 기법으로 보상된 SAR 영상, (b) 기존의 이동 표적 보상 알고리즘으로 보상된 SAR 영상

Fig. 7. Compensated SAR images using (a) the proposed and (b) the conventional motion compensation(MOCOM) algorithms.

정하므로 지상 이동 표적의 움직임에 의해 기인된 SAR 영상의 왜곡 현상을 보상할 수 있음을 증명하였다.

V. 결 론

본 논문에서는 지상 이동 표적을 SAR 영상의 형태로 도시하는 과정에서 표적의 움직임에 의해 발생하는 왜곡 현상을 수학적으로 분석하고, 기 왜곡 현상을 효과적으로 보상하는 알고리즘을 제안하였다. 제안된 기법의 핵심은 SAR 영상의 왜곡 현상을 야기하는 모든 표적 변수를 추

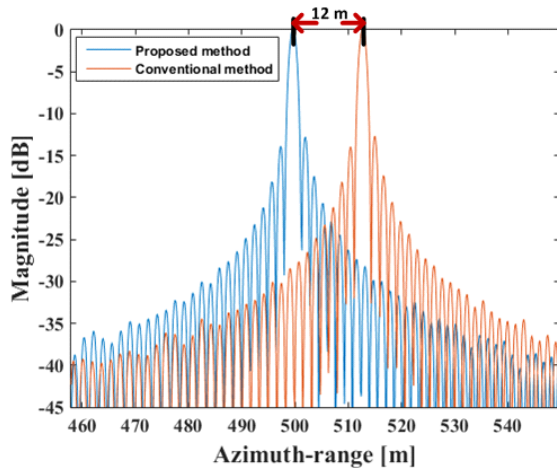


그림 8. 제안된 기법과 기존의 이동 표적 보상 알고리즘의 방위 방향 PSF

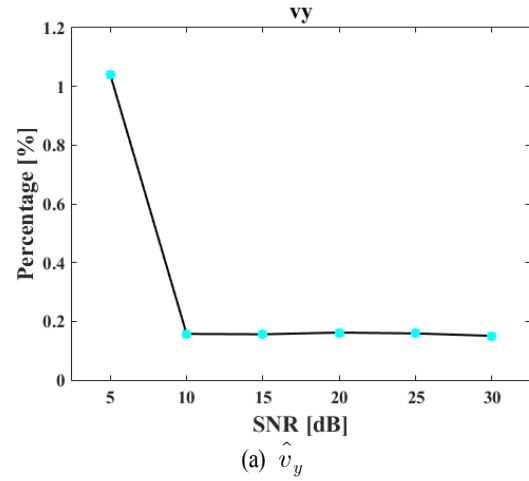
Fig. 8. Comparison of PSF results using the proposed and the conventional MOCOM algorithms.

정함에 있다. 본 논문에서는 SAR-ATI 시스템과 위상 정렬 기법을 이용하는 효과적인 변수 추정기법을 제안하고, 모의시험 결과를 통해 본 기법의 효용성에 대해 증명하였다.

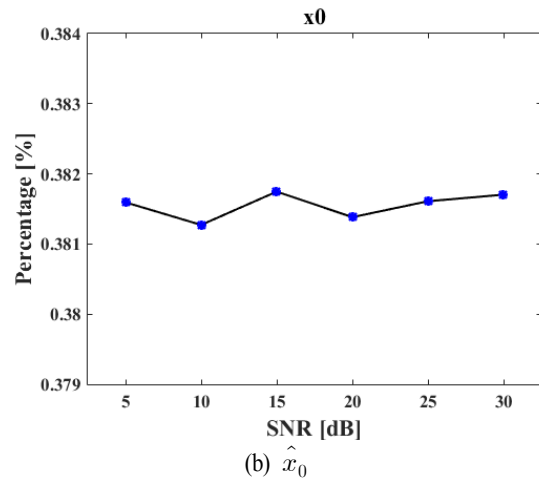
기존의 지상 이동 표적 보상 알고리즘들은 레이다와 표적 사이의 거리 변화에 표적의 방위 방향 초기 위치에 의한 영향이 미미하다 가정하고, 표적의 속도를 추정하여 속도에서 기인한 왜곡 현상만을 보상하였다. 그러나 보다 일반적인 SAR 영상 형성 기하 구조에서 표적의 방위 방향 초기 위치 값에 의해 SAR 영상에 추가적인 방위 방향 위치 오차가 발생하므로 기 왜곡 현상을 모두 고려한 보상 기법이 필요하다.

본 논문에서는 위의 문제를 해결하기 위해 2채널 SAR-ATI 시스템에서 위상 정렬 기법을 활용하였다. 먼저 SAR-ATI로 지상 이동 표적을 탐지하고, 표적의 거리 방향으로의 속도를 추정한 후, 위상 정렬을 이용하여 이동 표적에 대한 수신 신호의 위상을 획득한다. 획득한 위상과 SAR 기하 구조를 활용하여 표적의 방위 방향으로의 속도와 초기 위치를 추정하고, 추정된 모든 표적 변수를 이용하여 SAR 현상의 왜곡 현상을 보상하였다.

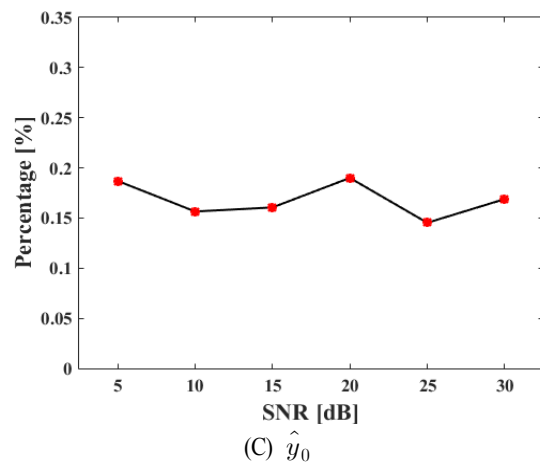
본 논문에서는 제안된 기법의 효용성을 증명하기 위해 SNR을 변화시켜 50번씩 몬테-카를로 모의시험을 수행하



(a) \hat{v}_y



(b) \hat{x}_0



(c) \hat{y}_0

그림 9. 추정 변수별 상대 오차(%)

Fig. 9. Relative error(%).

였다. 그 결과, 제안된 기법이 잡음이 존재하는 환경에서도 전반적으로 낮은 오차로 변수들을 추정하며, 기존의 이동 표적 보상 알고리즘에 의해 보상되지 않는 방위 방향 위치 오차를 포함한 SAR 영상의 모든 왜곡 현상을 효과적으로 보상을 확인하였다.

References

- [1] M. Soumekh, *Synthetic Aperture Radar Signal Processing with MATLAB Algorithms*, John Wiley & Sons Inc., 2005.
- [2] I. G. Cumming, F. H. Wong, *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar*, Artech House, 2005.
- [3] J. Wang, X. Liu, "Velocity estimation of moving targets in SAR imaging", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 50, no. 2, pp. 1543-1548, 2014.
- [4] J. Yang, C. Liu, and Y. Wang, "Imaging and parameter

estimation of fast-moving targets with single-antenna SAR", *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 11, no. 2, pp. 529-533, 2014.

- [5] R. K. Raney, "Synthetic aperture imaging radar and moving targets", *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 9, no. 3, pp. 499-505, 1971.
- [6] A. Budillon, V. Pascazio, and G. Schirinzi, "Estimation of radial velocity of moving targets by along-track interferometric SAR Systems", *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 5, no. 3, pp. 349-353, 2008.
- [7] 배창식, "SAR-GMTI에서 지상이동표적의 속도 추정 기법", *한국전자파학회지*, 28(2), pp. 139-146, 2017년 2월.
- [8] L. Liu, F. Zhou, M.-L. Tao, B. Zhao and Z.-J. Zhang, "Cross-range scaling method of inverse synthetic aperture radar image based on discrete polynomial-phase transform", *Proc. IET Radar Sonar Navigation*, vol. 9, no. 3, pp. 333-341, Mar. 2015.

유 보 현



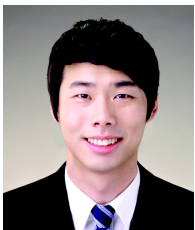
2015년 2월: 포항공과대학교 전기전자공학과 (공학사)
 2015년 3월~현재: 포항공과대학교 전기전자공학과 석박사 통합과정
 [주 관심분야] 레이더 영상, 레이더 신호 처리

임 병 균



2004년 2월: 고려대학교 전자전기전파공학부 (공학사)
 2010년 8월: 포항공과대학교 전기전자공학과 (공학박사)
 2010년 12월~현재: 한국항공우주연구원 선임연구원
 [주 관심분야] 합성개구면레이더 신호처리

강 병 수



2012년 2월: 영남대학교 전자공학과 (공학사)
 2014년 2월: 포항공과대학교 전기전자공학과 (공학석사)
 2014년 3월~현재: 포항공과대학교 전기전자공학과 (공학박사)
 [주 관심분야] 레이더 영상, 레이더 신호

처리

오 태 봉



2007년 2월: 한국항공대학교 전자 및 항공전자공학부 (공학사)
 2009년 8월: 한국항공대학교 전자 및 항공전자공학부 (공학석사)
 2009년 7월~2013년 7월: 한국항공우주연구원 연구원

임연구원

[주 관심분야] 레이더 신호처리

김 경 태



1994년 2월: 포항공과대학교 전기전자공학
학과 (공학사)

1996년 2월: 포항공과대학교 전기전자공학
학과 (공학석사)

1999년 2월: 포항공과대학교 전기전자공학
학과 (공학박사)

2002년 3월~2011년 2월: 영남대학교 전

자공학과 교수

2011년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 교수

2012년 9월~현재: 레이더/IR 표적식별 특화연구실 실장

[주 관심분야] 레이더 표적인식, 레이더 영상, 레이더 신호처리,
패턴인식, 전자기수치해석 및 RCS 측정