

## 항공기 기반 단일채널 FMCW-SAR 영상 내 이동물체 분석기법

### Analysis Technique for Moving Targets on Single-Channel Airborne FMCW-SAR Image

황 지 환 · 김 덕 진

Ji-hwan Hwang · Duk-jin Kim

#### 요 약

본 논문에서는 항공기 기반 단일채널 FMCW-SAR(frequency modulated continuous wave - synthetic aperture radar) 복원영상 내 이동물체 분석을 위해 합성개구레이다의 모호성 함수(SAR ambiguity function)를 이용한 상대속도 분석기법에 대해 설명한다. 안테나와 이동물체 간의 상대속도 변화를 분석하기 위해서 FMCW 신호모델 기반 정지 · 이동물체 간 신호변환특성을 분석하고, 이동물체의 변환특성을 고려한 모호성 함수를 모의실험하였다. 복원영상 내 이동물체의 상대속도 변화는 도식화된 모호성 함수의 최고점으로부터 추정될 수 있으며, 상대속도의 변화가 클수록 정지 · 이동물체 구분이 가능하게 된다. 이를 실제 항공기 기반 관측 자료로부터 복원된 FMCW-SAR 영상에 적용하여 모호성 함수를 이용한 이동물체 식별과 상대속도 분석결과를 관측지역 내 실험조건과 비교분석하였다.

#### Abstract

An analysis technique for detecting moving targets on a single-channel airborne frequency-modulated continuous-wave (FMCW) technology and synthetic aperture radar (SAR) image is presented. To analyze the relative velocities of moving targets, an FMCW-based signal model for stationary and moving targets was studied, and a SAR ambiguity function considering its signal model was simulated. The relative velocities of the moving targets on a reconstructed SAR image can be estimated by peak searching of the SAR ambiguity function, and the stationary and moving targets are easily distinguished when there is a large variation of the relative velocity. Analysis results of the moving targets on a reconstructed FMCW-SAR image, using practical airborne data and a SAR ambiguity process, are compared with the in situ testing in the study area.

Key words: Airborne FMCW-SAR, Moving Target Detection, Ambiguity Function, Motion-Transformed Coordinates

#### I. 서 론

소형 · 경량화 된 항공기 기반의 FMCW-SAR(frequency modulated continuous wave - synthetic aperture radar) 시스템

를 이용한 연구는 기존 고성능의 레이더 시스템을 이용한 대규모 제한적인 연구에서 다양한 연구목적의 소규모 응용연구로의 폭 넓은 활용이 가능케 하였다<sup>[1]~[5]</sup>. 예를 들어, 위성시스템의 다양한 운용기법과 신호처리기법

「이 연구는 한국연구재단의 소형위성개발사업(2017M1A3A4A01037204)과 국립해양조사원 이어도 해양과학기술지 활용 학술연구사업의 지원을 받아서 진행되었음.」

서울대학교 지구환경과학부(School of Earth and Environmental Science, Seoul National University)

· Manuscript received September 22, 2017 ; Revised October 12, 2017 ; Accepted July 3, 2018. (ID No. 20170922-098)

· Corresponding Author: Duk-jin Kim (e-mail: djkim@snu.ac.kr)

연구를 위한 시험대(test-bed) 역할과 더불어 소규모 연구 지역과 특정 목표물에 대한 전파특성 등을 연구하기 위한 목적으로 연구가 진행되고 있으며, 그 중에서 특정 소규모 관심지역 내 이동물체 탐지를 위한 연구에 항공기 기반 FMCW-SAR 시스템 활용이 가능하다<sup>[6]~[8]</sup>. 이를 위해 일반적으로 적용 가능한 정확도가 높은 다중채널 간섭계(interferometry) 시스템을 이용한 방법과 더불어 단일채널 FMCW-SAR 시스템만을 활용한 제약된 조건 하에서 이동물체를 식별하는 기법 연구도 고려해 볼 수 있다.

단일채널 FMCW-SAR 시스템을 이용한 이동물체 분석 연구를 위해서 단일채널 SAR 영상자료의 제약된 신호처리 입력조건과 FMCW 신호기반의 이동물체 응답특성을 고려한 분석·검증을 수행하며, 기존 chirp 펄스 기반 SAR 영상자료의 모호성 함수(ambiguity function)를 이용한 상대속도 분석 방법<sup>[9]</sup>을 본 연구에 적용해 실제 단일채널 FMCW-SAR 영상자료 활용성을 확인해 본다.

본 논문에서는 항공기 기반 단일채널 FMCW-SAR 영상자료의 제약된 조건 하에서 이동물체 식별을 위한 FMCW 신호기반의 상대속도 분석기법에 관한 연구결과를 설명한다. 이동물체 분석기법 연구를 위해 단일채널 FMCW-SAR 신호모델을 모의실험하고, 복원영상 내 이동물체 신호특성을 반영한 변환좌표계(motion-transformed coordinates)를 적용한다<sup>[11],[9]</sup>. 또한, 복원된 단일채널 SAR 영상의 특정 목표물에 이동물체 변환좌표계를 적용한 모호성 함수를 도식화하고 최적점의 상대속도를 추정한다.

이동물체의 상대속도 분석을 위한 FMCW-SAR 신호모델과 변환좌표계를 이용한 모호성 함수의 상대속도 분석 기법은 각각 2장과 3장에서 설명하며, 실제 항공기 기반 단일채널 FMCW-SAR 복원영상자료를 이용한 목표물 상대속도 분석결과는 4장에서 선보인다.

## II. FMCW-SAR 이동물체 신호모델

항공기 기반 FMCW-SAR 시스템을 이용한 복원영상 내 정지·이동물체 특성 비교분석을 위해 기존의 FMCW-SAR 신호모델에 이동물체의 속도성분을 추가해 수정한 신호모델을 모의실험을 통해 검증하고, 거리/방위 방향 속도 성분에 따른 이동물체 신호특성이 복원 영상에 미치는 영향을 분석한다.

### 2-1 FMCW-SAR 신호모델

FMCW-SAR 시스템은 송신신호와 수신신호를 직접 주파수 하향변환(frequency down conversion)하여 두 신호의 차에 해당하는 비트주파수(beat frequency) 성분을 수신한다<sup>[10],[11]</sup>. 이와 같은 과정은 식 (1)~(4)로 정리될 수 있으며, 톱니파 형태의 변조신호(상향변조, up-chirp)를 예로 표현된 것이다. 식 (1)은 주파수 상향변조의 송신신호이며, 식 (2)는 목표물 지연시간  $\tau$ 을 적용한 수신신호가 된다. 식 (3)과 식 (4)는 송·수신신호를 주파수 하향변환시켜 얻은 중간주파수(IF, intermediate frequency) 수신신호와  $n$ -번째 목표물의 지연시간 특성을 각각 나타낸다(여기서,  $t$  샘플링 시간,  $u$  안테나 위치,  $f_0$  중심주파수,  $K_r$  변조율,  $c$  광속을 각각 나타내며, 식 (1)~(3)은 편의상 신호세기 성분이 생략되었음.).

$$s_t(t) = \exp \left\{ 2\pi j \left( f_0 t + \frac{K_r}{2} t^2 \right) \right\} \quad (1)$$

$$s_r(t, u) = \exp \left\{ 2\pi j \left( f_0(t - \tau) + \frac{K_r}{2} (t - \tau)^2 \right) \right\} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} s_{IF,r}(t, u) &= s_t^*(t) \cdot s_r(t, u) \\ &= \exp \left\{ -2\pi j \left( f_0 \tau + K_r t \tau - \frac{K_r}{2} \tau^2 \right) \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\tau(u) = \frac{2 \sqrt{x_n^2 + (y_n - u)^2 + (z_n - h_0)^2}}{c} \quad (4)$$

식 (4)의 목표물 지연시간은 일반적으로 정지된 목표물의 위치( $x_n, y_n$ )와 안테나 위치( $u$ )로 표현되며, 이동물체의 속도성분을 추가하기 위해서 거리/방위 방향 속도성분( $v_{xn}, v_{yn}$ )과 FMCW-SAR 시스템의 자료수집 시간( $t_s$ )을 이용해 식 (5)와 같이 수정될 수 있다.

$$\tau(u) = \frac{2 \sqrt{(x_n + v_{xn} t_s)^2 + \{(y_n + v_{yn} t_s) + v_r t_s\}^2}}{c} \quad (5)$$

$$\tau(t, u_m) = \frac{2}{c} \sqrt{(x_n + v_{xn} t + v_{xn} t_{s,m})^2 + \{(y_n + v_{yn} t + v_{yn} t_{s,m}) - u_m\}^2} \quad (6)$$

이때, 거리/방위 방향 이동물체 속도성분은 그림 1과

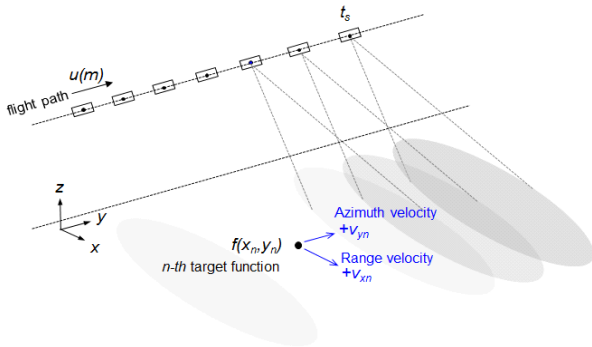


그림 1. FMCW-SAR 시스템과 이동물체 기하구조  
Fig. 1. Geometry of FMCW-SAR system.

같이 거리방향( $x$  방향)과 항공기 비행경로( $y$  방향)와 동일 방향을 (+)로 설정하였으며, 항공기 비행속도( $v_r$ )를 이용해 자료수집 시간 동안의 안테나 위치( $u=v_r \cdot t_s$ ) 변화를 나타낼 수 있다. 또한, 식(6)은 목표물 원시신호 생성을 위한 모의실험의 편의성을 고려해 안테나 위치를 ‘start-stop’ 근사기법을 적용해 수정한 것으로  $t_{s,m}$ 은  $m$ -번째 안테나 위치에서 이동시간,  $t_s$ 는 샘플링 시간을 각각 나타낸다.

## 2.2 정지 · 이동물체 모의실험

정지 또는 이동하는 물체의 SAR 복원영상 내 특성변화를 비교하기 위해서 목표물이 거리와 방위방향으로 등속도로 이동하고 안테나 위치는 ‘start-stop’ 근사기법을 적용한 가정 하에서 식 (6)과 같이 수정된 목표물 지연시간함수를 이용해 레이다 원시신호를 생성하고 이를 SAR 영상으로 복원하는 과정의 모의실험을 수행하였다.

모의실험을 위한 시스템 설정은 중심주파수 9.65 GHz, 대역폭 500 MHz, PRF(pulse repetition frequency) 1,000 Hz, 샘플링 주파수 1.2 MHz이며, 안테나 이동거리 100 m, 비행속도( $v_r$ ) 180 km/h(50 m/s)로 설정된 결과이다.

그림 2의 모의실험 결과는 5곳에 위치한 서로 다른 목표물과 그 중앙에 위치한 목표물을 각각 거리방향( $x$  방향,  $-10$  m/s)과 방위방향( $y$ 방향,  $-10$  m/s)으로 이동시킨 결과이다. 중앙에 위치한 시험용 이동물체는 속도성분에 따라 원래의 위치를 크게 벗어난 위치에서 영상이 복원되거나(그림 2b), 목표물 복원영상이 크게 번지는 현상(그림 2c와 그림 2d)을 확인할 수 있다. 이때, 거리방향 속도 성분은 복원영상 내 목표물의 위치이동에 크게 기여하고, 반면에 방위방향 속도성분은 복원영상 내 목표물 번짐 현상에 크게 기여하게 된다. 따라서 임의로 이동하는 물체는 속도성분에 따라 기준 위치를 벗어난 특정 영역에서 번진 형태로 복원됨을 예측할 수 있다.

본 연구에서는 이와 같은 이동물체의 SAR 영상 내 특성변화를 분석하여 이동물체 식별과 상대속도 분석을 시도한다. 이를 위해 이동물체의 위치변환 특성을 적용한 변환좌표계와 모호성 함수를 활용한 상대속도 분석기법을 단일채널 FMCW-SAR 시스템에 적용하고자 한다<sup>[9]</sup>.

## III. 상대속도 분석기법

본 장에서는 변환좌표계를 이용한 단일채널 FMCW-SAR 영상 내 목표물 레이다 신호 복원과정과 복원된 목표물 신호에 대한 모호성 함수를 일정 범위 내의 상대속

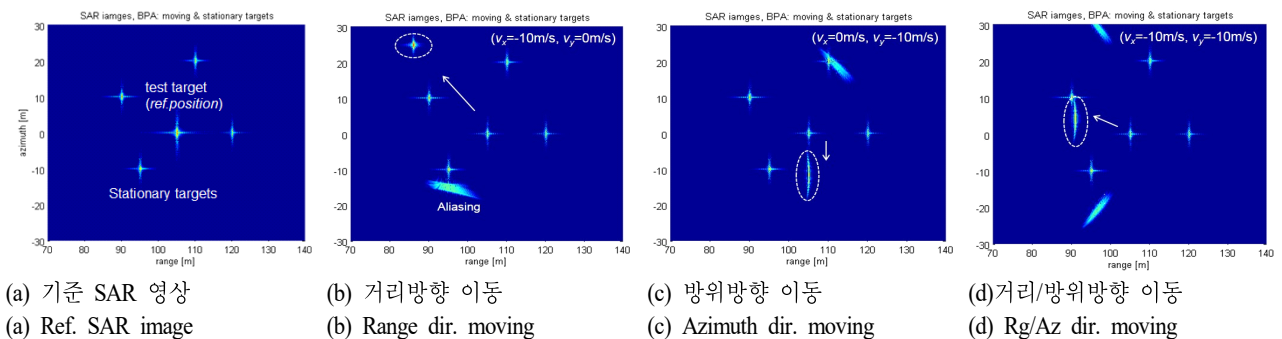


그림 2. 정지 · 이동물체에 대한 SAR 영상 복원 모의실험 결과비교

Fig. 2. Simulation results of SAR image reconstruction including the stationary and moving targets.

도( $\alpha$ )를 이용해 도식화하는 과정을 설명한다.

### 3-1 이동물체 변환좌표계

특정 속도와 방향성분을 갖는 이동물체는 SAR 영상복원 과정을 통해서 그 위치와 합성정도가 변하는 특성을 갖는다. 정지된 물체의 위치를 기준으로 특정 속도성분을 더한 이동물체 SAR 신호모델은 아래 식 (7)과 식 (8)의 거리함수로 각각 표현될 수 있다<sup>[9]</sup>.

$$R = \sqrt{(x_n + v_{xn}t_s)^2 + \{(y_n + v_{yn}t_s) + v_r t_s\}^2} \\ = \sqrt{\frac{(x_n^2 + y_n^2) + 2(v_{xn}x_n + (v_{yn} + v_r)y_n)t_s}{+ (v_{xn}^2 + (v_{yn} + v_r)^2)t_s^2}} \quad (7)$$

$$R = \sqrt{X_n^2 + \{Y_n + \alpha(v_r t_s)\}^2} \\ = \sqrt{X_n^2 + Y_n^2 + 2\alpha Y_n(v_r t_s) + \alpha^2(v_r t_s)^2} \quad (8)$$

식 (7)은 정지된 물체의 위치와 안테나 위치를 기준으로 표현된 거리함수(식 (4) 참조)에 이동물체의 속도성분을 거리와 방위 방향에 추가하고 안테나 위치를 항공기 속도로 표현한 이동물체를 위한 거리함수를 나타낸 것이다. 반면에 식 (8)은 이동물체 거리함수를 복원된 SAR 영상 내 목표물 위치변화를 고려한 변환좌표 개념을 차용하여 목표물 이동속도와 안테나의 상대적 거리 변화를 상대속도( $\alpha$ )로 치환해 표현한 이동물체 변환좌표계 거리함수를 나타낸 것이다.

$$\alpha = \frac{\sqrt{v_{xn}^2 + (v_{yn} + v_r)^2}}{v_r} \quad (9)$$

$$X_n = \frac{(v_{yn} + v_r)x_n - v_{xn}y_n}{\sqrt{v_{xn}^2 + (v_{yn} + v_r)^2}} \quad (10)$$

$$Y_n = \frac{v_{xn}x_n + (v_{yn} + v_r)y_n}{\sqrt{v_{xn}^2 + (v_{yn} + v_r)^2}} \quad (11)$$

식 (9)~식 (11)은 동일한 이동물체의 거리함수 식(7)과 변환좌표계 거리함수 식 (8)의 관계를 정리하여 얻은 관계식이며, 이동물체 변환좌표의 상대속도( $\alpha$ )는 식 (9)와 같이 정리된다. 이때, 상대속도는 목표물의 거리/방위방

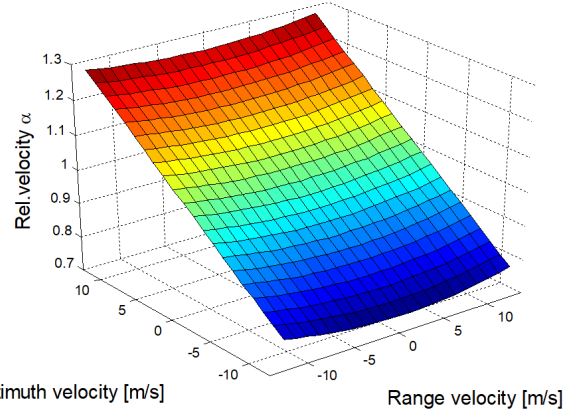


그림 3. 상대속도( $\alpha$ ) 변화 특성 예시, ( $v_r=50$  m/s)  
Fig. 3. Variations of relative velocity( $\alpha$ ), ( $v_r=50$  m/s).

향 속도성분을 실제 항공기 비행속도와 변환좌표계 내비행속도의 상대적 변화율로 정의된 것으로 그림 3과 같이 특정 비행속도(예,  $v_r=50$  m/s)에서 이동물체 거리/방위방향 속도( $\pm 12.5$  m/s) 성분변화에 따른 상대속도( $\alpha=0.75 \sim 1.25$ ) 특성변화를 확인 할 수 있다. 상대속도는 이동물체의 방위방향 속도성분에 민감하게 변화되는 특성이 있으며, 이와 같은 상대속도 특성변화는 일반적으로 항공기 비행속도 보다 느린 이동물체 속도성분 분석 시 거리방향 속도 성분 추정이 어려운 한계점을 내포한다.

다음으로 이동물체 변환좌표( $X, Y$ )는 식 (10) 및 식 (11)과 같은 관계식으로 각각 정리될 수 있으며, 이를 이용해 이동물체 기준위치( $x_n, y_n$ )와 복원된 SAR 영상 내 변환위치( $X_n, Y_n$ )를 아래 식 (12)와 같은 행렬식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} X_n \\ Y_n \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{(v_{yn} + v_r)}{\sqrt{v_{xn}^2 + (v_{yn} + v_r)^2}} & \frac{-v_{xn}}{\sqrt{v_{xn}^2 + (v_{yn} + v_r)^2}} \\ \frac{v_{xn}}{\sqrt{v_{xn}^2 + (v_{yn} + v_r)^2}} & \frac{(v_{yn} + v_r)}{\sqrt{v_{xn}^2 + (v_{yn} + v_r)^2}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_n \\ y_n \end{bmatrix} \quad (12)$$

### 3-2 SAR 모호성 함수

이동물체 변환좌표계 개념을 이용해 복원된 SAR 영상 내 이동물체의 위치를 ( $X_n, Y_n$ )으로 정의하면 이동물체의 속도성분(거리/방위 방향성분)은 앞선 식들에 의해 하나

의 상대속도( $\alpha$ )로 표현되고, 상대속도의 변화에 따라 변환좌표계에서 표현된 이동물체의 복원특성을 분석할 수 있다.

이를 위해 SAR 복원영상의 특정 목표물을 포함한 관심영역의 SAR 모호성 함수를 도플러 영역에서 도식화 할 수 있으며, 그 과정은 식 (13)~(15)로 나타낼 수 있다<sup>9)</sup>.

$$s_n(k_0, u) = \sum_{(X_i, Y_j)} \{f(X_i, Y_j, 1) \exp(j2k_0 \sqrt{X_i^2 + (Y_j + u)^2})\} \quad (13)$$

$$\gamma_n(k_0, u, \alpha) = s_n(k_0, u) \exp\{-j2k_0 \sqrt{X_c^2 + (Y_c - \alpha u)^2}\} \quad (14)$$

$$\Gamma_n(k_0, k_u, \alpha) = f f t_u \{\gamma_n(k_0, u, \alpha)\} \quad (15)$$

식 (13)은 복원된 SAR 영상 내 관심영역의 목표물 함수  $f(X_i, Y_j, \alpha=1)$ 를 이용해 이동물체 변환좌표계의 목표물

신호를 재생성하는 과정이며, 식 (14)는 재생성된 목표물 신호와 특정범위의 상대속도를 이용해 SAR 모호성 함수( $\gamma_n$ )를 생성한 것이다. 모호성 함수는 상대속도 변화에 따른 이동물체 복원특성을 쉽게 표현하기 위해서 도플러영역으로 변환되어 도식화된(여기서,  $X_c, Y_c$ 는 복원된 단일채널 SAR 영상 내 관심영역  $i, j$ -번째 목표물의 변환좌표계 위치이며,  $X_c, Y_c$ 는 재생성된 목표물 신호의 중심위치이다. 또한,  $k_0 = 2\pi/\lambda_0$ 는 중심주파수의 파수이다.).

### 3-3 목표물 모호성 함수 분석

앞서 설명한 관심 목표물의 모호성 함수를 도식화하고, 상대속도를 추정하는 과정을 그림 4의 모의실험 결과를 통해 각 단계별 신호처리 과정을 설명한다.

모호성 함수는 복원된 SAR 영상 내 특정 관심영역 범위설정(그림 4b, ‘이동/정지된 물체’ 확대 이미지)과 설정된 범위 내 목표물의 변환좌표 신호 재생성 과정(그림 4c)

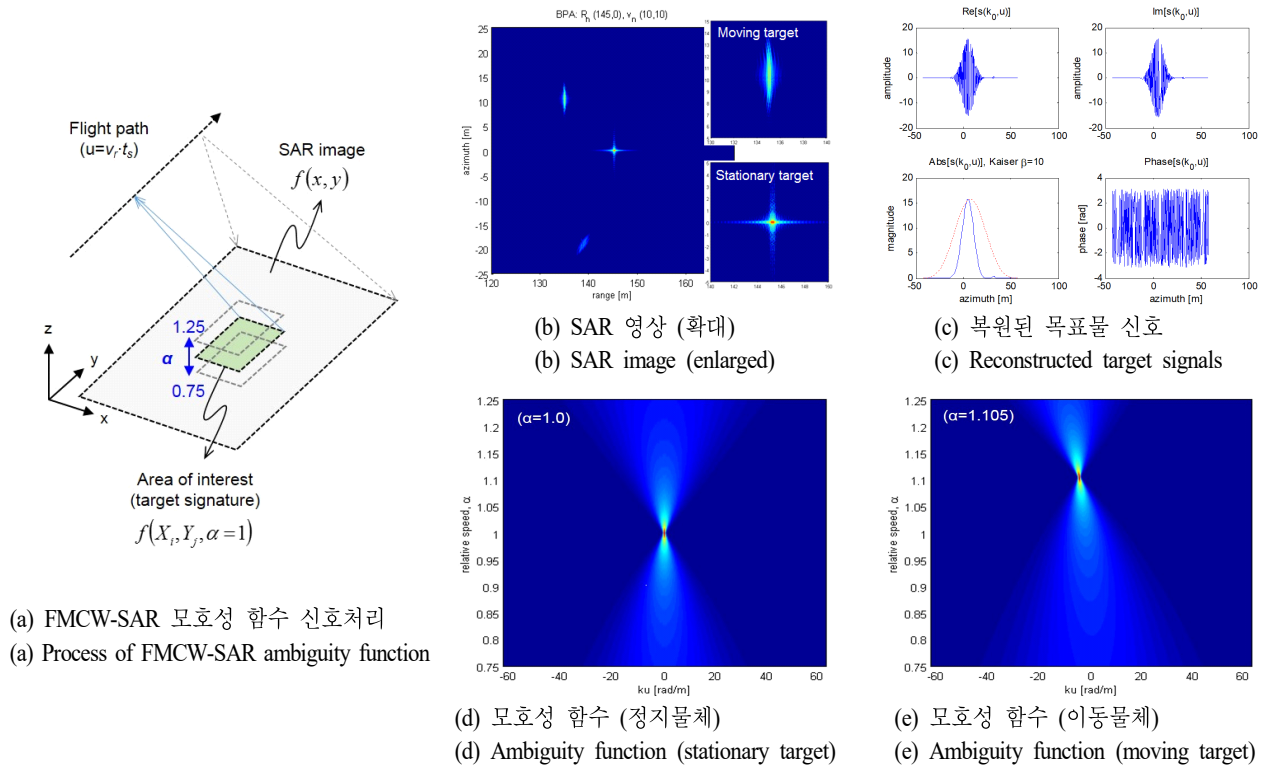


그림 4. 정지·이동물체에 대한 SAR 영상 복원 모의실험 결과 비교

Fig. 4. Simulation results of SAR image reconstruction including the stationary and moving targets.

이 선행된다.

모호성 함수의 상대속도 분석 범위는 식별 가능한 이동물체 속도를 고려해 적절한 범위 (예,  $\alpha=0.75\sim1.2$   $v_r=50$  m/s 경우, 약  $\pm12.5$  m/s 범위의 거리/방위방향 속도변화 식별 가능, 그림 3 참조)로 설정하고, 도플러 영역에서 도식화된 모호성 함수의 최고점으로부터 이동물체의 상대속도를 추정할 수 있다.

그림 4는 정지·이동물체에 대한 FMCW 신호모델을 기반으로 생성된 SAR 원시자료를 이용해 복원된 SAR 영상과 모호성 함수를 이용한 상대속도 변화를 분석하는 전 과정을 모의실험한 결과이다. 그림 4(a)는 SAR 영상의 관심영역 설정과 그것으로 레이더 신호를 재생성하고, 이동물체를 위한 변환좌표계의 상대속도를 조절하여 관심영역 내 목표물의 복원특성을 합성영상의 초점(image focusing) 정도를 모호성 함수로 추정하는 과정을 나타낸 것이다. 그림 4(b)의 SAR 영상으로부터 특정범위의 관심목표물 영역을 설정하고, 이를 변환좌표계의 레이더 신호로 재생성한 결과는 그림 4(c)와 같다. SAR 영상으로부터 추출된 목표물 함수의 샘플링 특성을 고려해 레이더 신호 재생성과정에 윈도우함수(예, kaiser window)를 적용하여 복원신호 내 주변신호를 제거(gating)시키는 과정을 추가하였다. 또한, 최적화된 신호 재생성을 위해 윈도우 함수 길이와 안테나 위치(u) 정보에 대한 적절한 샘플링 과정이 추가 적용된다. 그림 4(d)와 4(e)는 SAR 영상으로부터 추출된 정지·이동물체의 모호성 함수 특성을 도플러영역에서 도식화한 것으로 이동물체 변환좌표계 상의 상대속도가 최고점을 이루는 지점을 쉽게 찾을 수 있으며, 이를 통해 상대속도를 추정할 수 있다. 정지된 물체의 상대속도는 모의실험 입력과 추정치 모두  $\alpha=1.0$ 으로 동일하였으며, 이동물체의 경우 상대속도 입력  $\alpha_0=1.1045$ (예, 설정값  $v_x=-5$  m/s,  $v_y=5$  m/s) 대비 추정치  $\alpha=1.105$ 로 분석되었다.

#### IV. FMCW-SAR 영상 내 이동물체 분석결과

단일채널 FMCW-SAR 영상 내 존재하는 이동물체의 상대속도 분석을 위해 이동물체 변환좌표계를 적용한 SAR 모호성 함수의 최고점 분석기법을 실제 항공기 기반 FMCW-SAR 영상에 적용하여 실험지역 내 이동물체의 상대속도

표 1. 항공기 기반 FMCW-SAR 시스템 제원

Table 1. Specification of airborne FMCW-SAR system.

Radar parameters	Specifications	Notes
Frequency	10.0~10.5 GHz	BW=500 MHz
Tx power	max 1 watt	(max 30 dBm)
Sampling rate	~1.2 MHz	-
Resolution	~30 cm	Slant range
Sensing time	~30 sec	PRF=1,000 Hz
HPBW	~12°	Horizontal polarization
Altitude	425 m	-

를 분석하였다. 실험을 위해 사용된 FMCW-SAR 시스템 제원은 표 1과 같으며, 정지·이동물체 설치 및 실험업무는 2016년 1월 대부분 인근 매립지(농어촌공사 관리구역) 내 허가받은 구역에서 진행되었다.

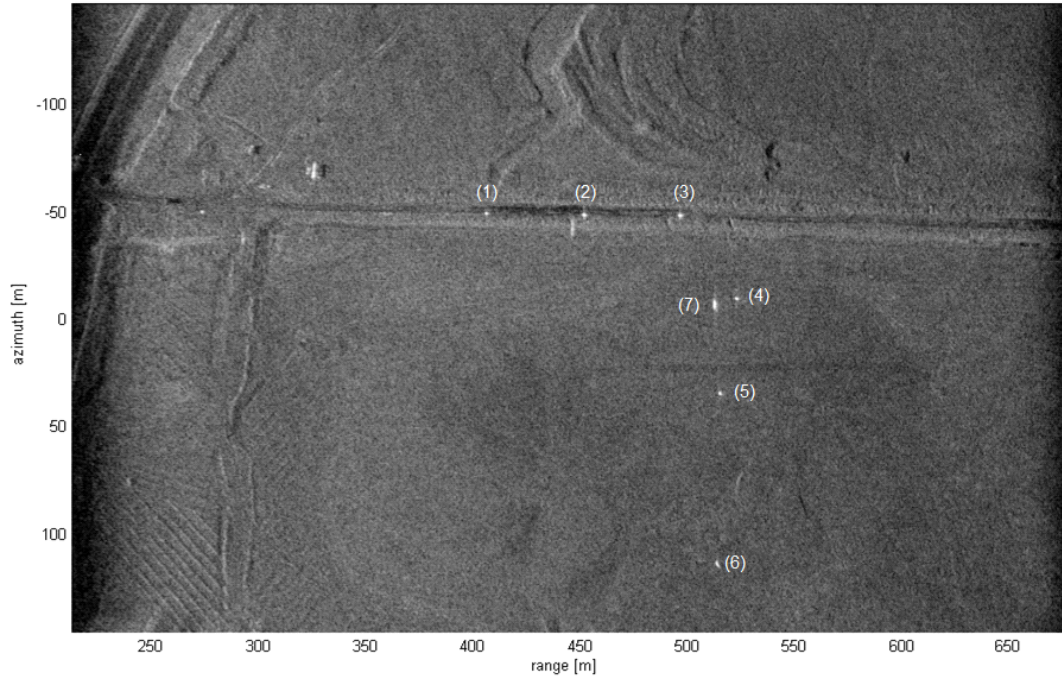
#### 4-1 정지·이동물체 실험설정

정지·이동물체의 상대속도 분석을 위해 합성개구면(synthetic aperture) 길이 약 1.5 km, 주사폭(swath width) 약 450 m, 해상도 약 40 cm/5 cm(거리/방위 방향) 급으로 복원된 단일채널 FMCW-SAR 영상을 이용하였으며, 이때 항공기 비행속도는 약 180 km/h를 유지하였다. 상대속도 분석을 위한 목표물 설정은 실험지역 내 6개의 삼각수동전파반사기(정지된 물체, 크기 50 cm 4개, 30 cm 2개)와 1개의 능동전파반사기(이동물체)를 위치시켰으며, 30 dB의 이득을 갖는 소형 능동전파반사기를 임의의 방향과 속도(unsupervised test-setup)로 실험 참가자에 의해 도보로 이동시켰다. 그림 5(a)와 같이 고정된 6개의 목표물은 비행 경로 기준 거리 방향과 방위 방향으로 각각 3개씩 설치되었으며, 1개의 이동물체를 실험지역 내에서 이동시켰다.

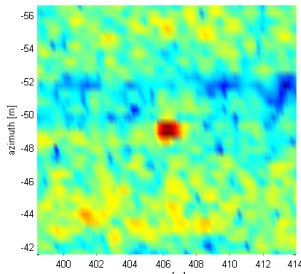
#### 4-2 상대속도 분석결과

그림 5(b)~(e)는 획득된 SAR 영상 내 목표물의 상대속도 분석을 위한 관심영역으로 1, 4, 6, 7 번 목표물을 예시로 나타낸 것이다. 그림 5(f)~(i)는 목표물의 SAR 모호성 함수 특성을 도식화한 것으로 각각의 상대속도는  $\alpha=1.0$  (정지물체)과 0.947(이동물체)로 추정/구분되었다. 이때, 항공기 비행속도가 실험 참가자가 이동시킨 능동전파반

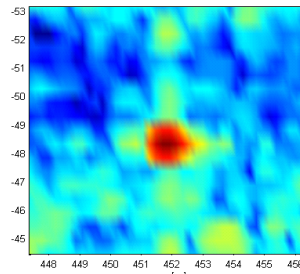




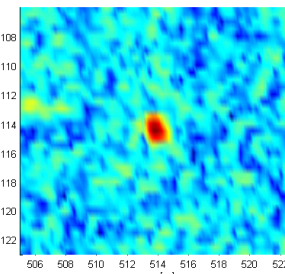
(a) 항공기 기반 단일채널 FMCW-SAR 영상  
(a) Single channel airborne FMCW-SAR image



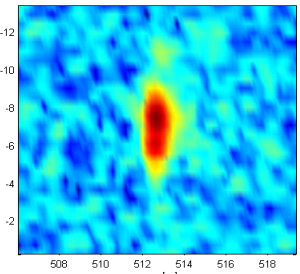
(b) 1번 목표물 설정범위  
(b) No.1 target's region



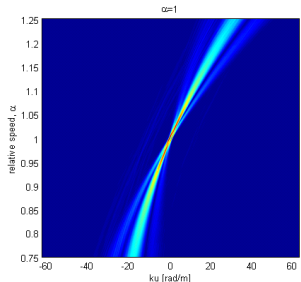
(c) 4번 목표물 설정범위  
(c) No.4 target's region



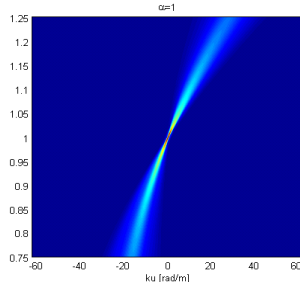
(d) 6번 목표물 설정범위  
(d) No.6 target's region



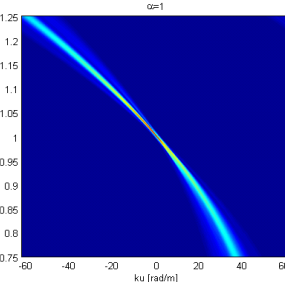
(e) 7번 목표물 설정범위  
(e) No.7 target's region



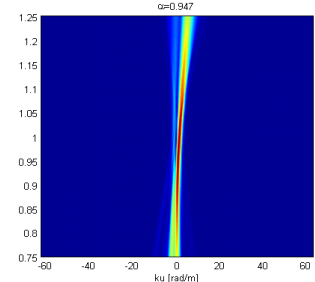
(f) 상대속도 추정치 ( $\alpha=1.0$ )  
(f) Relative velocity ( $\alpha=1.0$ )



(g) 상대속도 추정치 ( $\alpha=1.0$ )  
(g) Relative velocity ( $\alpha=1.0$ )



(h) 상대속도 추정치 ( $\alpha=1.0$ )  
(h) Relative velocity ( $\alpha=1.0$ )



(i) 상대속도 추정치 ( $\alpha=0.947$ )  
(i) Relative velocity ( $\alpha=0.947$ )

그림 5. 항공기 기반 단일채널 FMCW-SAR 영상 내 관심 목표물 상대속도 분석결과

Fig. 5. Extraction of the relative velocity of the interested targets on single channel airborne FMCW-SAR image.

사기의 이동속도(약 2m/s)보다 현저히 빠른 점을 감안하여(식 (9) 참조) 거리방향 속도성분의 변화를 무시한 방위 방향 속도 성분만을 고려할 때 약 2.6 m/s의 분석결과를 확인하였으며, 분석오차는 능동전파반사기의 이동 중 동일한 전파입사각도 유지가 어려웠던 점에서 기인된 것으로 목표물의 이동속도 이상으로 SAR 영상 내 피접현상이 추가되어 상대속도 분석에 오차로 작용한 것으로 보인다.

## V. 결 론

본 논문에서 제안한 단일채널 FMCW-SAR 영상 내 이동물체의 상대속도 분석기법은 이동물체 변환좌표계와 SAR 모호성 함수를 FMCW 신호모델 기반으로 최적화한 것으로 목표물의 이동속도와 방향에 따른 합성영상의 초점(focusing) 정도를 직관적으로 분석 가능한 장점이 있다. 반면에, 단일채널 SAR 영상을 이용한 상대속도 추정 은 이동물체의 거리/방위 방향 성분을 구분할 수 없으며, 이동물체의 속도가 변환좌표계를 통한 항공기 비행속도의 상대적 변화를 모호성 함수 특성을 통해 분석해야 하는 한계점을 내포하고 있다. 또한, 항공기 기반 FMCW-SAR 시스템의 경우, 요동보상에 관한 보정 정확도와 복원영상의 초점 정도가 상대속도 분석 정확도에 영향을 미칠 수 있으므로 목표물 분석을 위한 단일채널 FMCW-SAR 영상복원의 정확도가 우선 확보되어야 한다.

그럼에도 불구하고 단일채널 FMCW-SAR 시스템의 제약된 운용조건하에서도 변환좌표계와 모호성 함수를 이용해 상대속도를 분석할 수 있으며, 관심 지역 내 목표물의 이동 여부를 설정된 분석범위 내에서 빠르고 직관적으로 분석과 평가가 가능한 사용자 편의성 측면의 장점이 있어 다양한 활용이 가능할 것으로 기대된다.

## References

[1] A. Meta, P. Hoogeboom, and L. P. Ligthart, "Signal processing for FMCW SAR," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 45, no. 11, pp. 3519-3532, Nov. 2007.

[2] E. C. Zaugg, D. G. Long, "Generalized frequency scaling and backprojection for LFM-CW SAR processing," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 53, no. 7, pp. 3600-3614, Jul. 2015.

[3] E. C. Zaugg, D. G. Long, "Theory and application of motion compensation for LFM-CW SAR," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 46, no. 10, pp. 2990-2998, Oct. 2008.

[4] 황지환, 정정교, 김덕진, 김진우, 신희섭, 옥재우, "항공기 기반 FMCW-SAR 시스템의 연속이동효과 보정," *한국전자과학회논문지*, 28(5), pp. 410-418, 2017년 5월.

[5] D. J. Kim, J. Jung, K. M. Kang, S. H. Kim, Z. Xu, and S. Hensley, et al., "Development of a cost-effective airborne remote sensing system for coastal monitoring," *Sensors*, vol. 15, no. 10, pp. 25366-25384, 2015.

[6] M. Soumekh, D. A. Nobles, M. C. Wicks, and G. J. Genello, "Signal processing of wide bandwidth and wide beamwidth P-3 SAR data," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 37, no. 4, pp. 1122-1141, Oct. 2001.

[7] M. Soumekh, "Moving target detection in foliage using along track monopulse synthetic aperture radar imaging," *IEEE Transactions on Image Processing*, vol. 6, no. 8, pp. 1148-1163, Aug. 1997.

[8] M. Soumekh, "Moving target detection and imaging using an X band along-track monopulse SAR," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 38, no. 1, pp. 315-333, Jan. 2002.

[9] M. Soumekh, *Synthetic Aperture Radar Signal Processing with Matlab Algorithm*, John Wiley & Sons, Inc., pp. 47-135, 1999.

[10] M. I. Skolnik, *Radar Handbook*, 3rd ed. McGraw-Hill Inc., New York, 2008.

[11] I. G. Cumming, F. H. Wong, *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data*, Artech House, Boston/London, pp. 40-112, 2005.



## 황 지 환



2001년 2월: 홍익대학교 전파공학과 (공학사)  
 2003년 2월: 홍익대학교 전파통신공학과 (공학석사)  
 2003년 4월~2006년 5월: LG전자 단말연구소 연구원  
 2009년 3월~2013년 2월: 홍익대학교 전

자정보통신공학과 (공학박사)

2015년 1월~현재: 서울대학교 기초과학연구원 연수연구원  
 [주 관심분야] 레이더, 전파산란, 마이크로파 원격탐사

## 김 덕 진



1999년 2월: 서울대학교 지구시스템과학과 (이학사)  
 2001년 2월: 서울대학교 지구환경과학부 (이학석사)  
 2005년 2월: 서울대학교 지구환경과학부 (이학박사)

2001년 9월~2002년 3월: 미국 NASA/JPL (제트추진연구소) & 캐나다 University of Manitoba 방문연구원  
 2005년 3월~2005년 10월: 서울대학교 기초과학연구원 박사후 연구원

2005년 10월~2006년 1월: 캐나다 University of Manitoba 박사 후연구원

2006년 2월~2007년 6월: 미국 University of Michigan 박사후연구원

2007년 7월~2008년 8월: 한국항공우주연구원 선임연구원

2014년 8월~2015년 7월 NASA/JPL(제트추진연구소) 방문연구원

2008년 9월~현재: 서울대학교 지구환경과학부 교수

[주 관심분야] 마이크로파 원격탐사, 항공기 SAR, SAR 영상 활용