

항공기 기반 FMCW-SAR 시스템의 연속이동효과 보정

Correction of Continuous Motion Effects for Airborne FMCW-SAR System

황지환 · 정정교 · 김덕진 · 김진우* · 신희섭* · 옥재우*

Ji-hwan Hwang · Jungkyo Jung · Duk-jin Kim · Jin-Woo Kim* · He-Sub Shin* · Jae-Woo Ok*

요 약

본 연구에서는 항공기 기반 FMCW-SAR(Frequency Modulated Continuous Wave-Synthetic Aperture Radar) 시스템의 연속이동효과를 분석하고, 이를 보정하기 위한 신호처리 연구 결과를 설명하며, 보정된 레이더 신호를 back-projection 알고리즘 기반으로 복원시킨 SAR 영상 품질 개선 결과를 포함한다. FMCW 신호기반 SAR 시스템의 연속이동효과를 FMCW 신호 모델을 이용하여 항공기 이동 속도와 샘플링 주기 등의 영향을 분석하고, 이를 개선시키기 위해 시간-도플러(t, k_u) 영역에서의 레이더 신호처리 기법을 적용하였다. 이때, FMCW-SAR 영상 복원을 위해 back-projection 알고리즘과 수정된 정합필터를 활용하였으며, 항공기 기반으로 수집된 실제 X-밴드 대역 데이터에 적용하여 연속이동효과 개선 결과를 확인/검증하였다.

Abstract

Results of an analysis of the continuous motion effect for FMCW-SAR system and a signal processing to correct it are presented in this paper. SAR images reconstructed by back-projection algorithm are included as well. To analyze how platform velocity and sampling frequency affect the continuous motion effect, FMCW signal model was used, and the signal processing in time-doppler(t, k_u) domain was adopted. Then, back-projection algorithm and modified matched-filter was used to reconstruct SAR images, and it was validated using measured data by airborne FMCW-SAR system in X-band frequency.

Key words: FMCW-SAR, Continuous Motion Effect, Back-Projection, Airborne System, X-Band Frequency

I. 서 론

FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave) 신호기반의 레이더 시스템은 기존의 펄스(chirp-pulse 신호기반) 레이더 시스템보다 소형/경량화에 여러 장점이 있어 최근 다양한 연구목적을 위해 활용되고 있다. 특히, 레이더 영상 획득을 위한 SAR(Synthetic Aperture Radar) 시스템으로

의 활용도는 시스템적 측면의 장/단점을 고려해 다양한 레이더 영상화 신호처리 기법들이 연구되고 있다^{[1]~[4]}.

특히, FMCW 신호기반의 SAR 시스템은 동일한 변조 주기에서 레이더 신호의 송·수신이 연속적으로 이루어지는 특징이 있어, 시스템 구성에 따라 상대적으로 송·수신 안테나의 연속이동효과(continuous motion effect)가 두드러지는 문제가 있다^[5]. 이는 항공기 기반 시스템의 SAR

「이 연구는 LIG NEX1 산학협력과제 지원으로 연구되었음.」

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

*LIG 넥스원(LIG Nex1) 우주영상연구소

· Manuscript received January 17, 2017 ; Revised March 20, 2017 ; Accepted May 10, 2017. (ID No. 20170117-004)

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

영상 복원을 위해 활용되는 back-projection 알고리즘을 이용한 영상 복원 시 영상 품질을 저하시키는 요인으로 작용하여, FMCW 신호 모델을 이용한 연속이동효과와 분석과 최적화된 영상 복원 기법 적용이 필요하다.

이를 위해 본 논문에서는 연속이동효과에 의한 레이더 수신 신호의 위상변화를 FMCW-SAR 신호 모델을 통해 분석하였다. 연속이동효과에 의한 위상변화는 시간-도플러(t, k_u) 영역의 신호처리 기법에 의해 제거될 수 있으며, 영상 복원을 위한 거리압축신호에 적용된다. 그리고 SAR 영상 복원을 위해 적용된 back-projection 알고리즘에 연속이동효과 보정을 위한 수정된 정합필터를 적용하였으며, 그 결과를 실제 항공기 기반 SAR 시스템의 관측 데이터에 적용하여 연속이동효과 보정 결과를 검증하였다.

본 논문에서는 FMCW-SAR 신호 모델과 이를 이용한 연속이동효과 및 보정 결과를 모의 실험하고, 실제 영상 복원을 위해 back-projection 알고리즘의 수정된 정합필터 적용 사례를 II장 FMCW-SAR 신호 모델과 III장 연속이동효과 모의실험, 그리고 IV장 실험 결과에서 각각 설명한다.

II. FMCW-SAR 신호 모델

FMCW-SAR 신호 모델은 시스템 특성을 분석하고, 레이더 원시신호 생성과 영상 복원 과정을 모의실험하기 위한 유용한 도구로써 활용될 수 있다. 특히, FMCW-SAR 시스템의 연속적인 안테나 위치 변화 특성을 그림 1과 같이 도식화할 수 있으며, 안테나 위치와 목표물 함수는 u 와 $f(x, y)$ 로 각각 표현될 수 있다^[6].

2-1 FMCW-SAR 신호 모델

FMCW 신호 모델은 식 (1)과 같이 운용 주파수(f_0)와 주파수 변조율(K_r =대역폭/변조주기)을 이용해 톱니파형태의 주파수 변조 신호로 나타낼 수 있으며, 수신 신호는 목표물로부터 반사되는 지연 시간(τ)을 이용해 식 (2)와 같이 표현할 수 있다. 이때, 목표물 지연 시간은 식 (4)와 같이 목표물 위치(x_i, y_j)와 안테나 위치(u)의 거리(R)로부터 계산된다^[7].

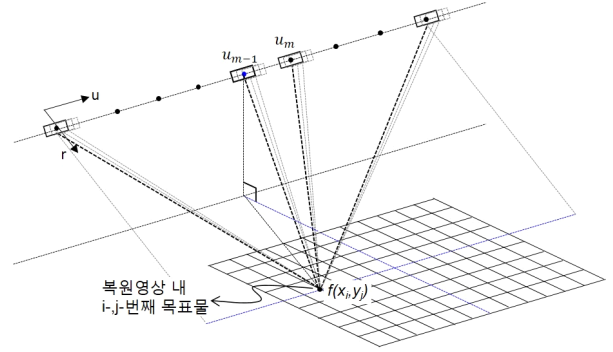


그림 1. 연속이동효과를 포함한 FMCW-SAR 기하구조

Fig. 1. Geometry of FMCW-SAR system including the continuous motion effect.

FMCW 신호기반의 레이더 시스템은 송·수신 신호를 주파수 혼합기를 통해 주파수 하향 변환하고, 두 신호의 차에 해당하는 비트 주파수(beat frequency) 성분을 샘플링하여 영상 복원 과정에 이용한다^[7]. 이와 같은 과정을 식(3)으로 정리하여, 다음 과정에서 FMCW-SAR 시스템의 수신 신호로 이용된다(단, c 는 광속 3×10^8 m/s이다.)^[8].

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

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

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

$$\tau(u) = \frac{2\sqrt{x_i^2 + (y_j - u)^2}}{c} = \frac{2R(u)}{c} \quad (4)$$

위 식 (1)~(3)은 표현의 편의상 신호세기 성분이 생략되었으며, 모의실험을 위해 안테나 빔패턴, 목표물 거리와 반사도 등이 고려되어야 한다^[9].

2-2 연속이동효과(Continuous Motion Effect) 신호 모델

FMCW-SAR 시스템에서 고려되어야 할 연속이동효과와 레이더 신호 송·수신 과정에도 안테나의 위치가 지

속적으로 이동하는 것으로, 기존에 안테나 위치를 정지된 위치로 근사화시킨 ‘start-stop’ 근사기법만으로 그 처리가 부족한 측면이 있다^{[5],[10]}. 이를 보완하기 위해서 시간에 따른 안테나 위치 변화를 항공기 이동 속도(v_r)와 측정 시간(sweep time)을 고려해 식 (5)와 같이 수정하였다.

$$u \rightarrow u - v_r t \quad (5)$$

$$R(t, u) = \sqrt{x_i^2 + (y_j - u + v_r t)^2} \quad (6)$$

식 (6)은 각각의 송신신호마다 정지된 안테나 위치로 표현된 기존 거리 함수 $R(u)$ 를 항공기 이동 속도와 시간 변화에 따른 안테나 위치 변화의 세부 정보를 추가한 2차원 배열의 거리함수 $R(t, u)$ 로 나타낼 수 있다.

$$s_{IF,r}(k_r, u) = \exp\{jk_r R(t, u)\} = s_{IF,r}(t, u) \quad (7)$$

식 (7)은 연속이동효과를 포함한 수정된 거리함수 $R(t, u)$ 를 이용해 거리성분에 대한 공간 주파수($k_r = 2\pi/\lambda$) 영역의 신호로 표현된 것이다. 이때, 안테나 위치 변화를 포함한 공간 주파수 영역의 수신 신호는 비트 주파수 스펙트럼으로 표현되는 거리 정보의 푸리에 역변환 관계에 놓이며, 이는 시간영역과 동일한 영역의 신호임을 알 수 있다. 따라서 앞선 식 (3)은 시간 영역 신호에 연속이동효과를 더해 식 (7)과 같이 정리될 수 있다. 이를 시간-도플러 $S(t, k_u)$ 영역의 신호로 변환하는 과정은 식 (8)~(10)과 같다.

$$\begin{aligned} S_{IF,r}(k_r, k_u) &= \int \exp\{jk_r \sqrt{x_i^2 + (y_j - u + v_r t)^2} - jk_u u\} du \\ &= \int \exp\{jk_r \sqrt{x_i^2 + (y_j - u')^2} - jk_u (u' + v_r t)\} du' \\ &= \int \exp\{j\Phi\} du' \end{aligned} \quad (8)$$

$$\frac{d\Phi}{du'} = \frac{k_r(y_j - u')}{\sqrt{x_i^2 + (y_j - u')^2}} - k_u = 0 \quad (9)$$

$$\therefore (y_j - u') = \frac{k_u x_i}{\sqrt{k_r^2 - k_u^2}} \quad (10)$$

식 (8)은 도플러(k_u) 영역으로의 푸리에 변환 과정을 나

타낸 것으로 변수치환($u' = u - v_r t$) 과정과 정지 위상 근사 기법(stationary phase approximation)을 적용한 과정을 나타낸 것이며, 식 (10)의 관계식을 이용해 식 (8)의 결과식을 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} S_{IF,r}(t, k_u) &= \exp\{-jk_u(v_r t)\} \\ &\cdot \exp\left\{jk_r \sqrt{x_i^2 + \left(\frac{k_u x_i}{\sqrt{k_r^2 - k_u^2}}\right)^2} - jk_u \left(y_j - \frac{k_u x_i}{\sqrt{k_r^2 - k_u^2}}\right)\right\} \end{aligned} \quad (11)$$

위의 최종식은 항공기 이동 속도에 따른 위상 변화 부분(식 (11) 우변 첫 번째 항)과 도플러 영역의 목표물 위상함수로 구분된다.

2-3 시간-도플러(t, k_u) 영역 신호처리 기법

식 (11)에서 항공기 이동 속도에 따른 연속이동효과를 나타내는 위상성분은 $\exp\{-jk_u(v_r t)\}$ 이며, 이를 제거하기 위한 과정은 식 (12)와 같이 수신 신호를 시간-도플러 영역으로 변환하고, 연속이동효과 위상성분의 쉼보 복소수를 곱하는 과정이 된다.

$$s_{IF,r1}(t, k_u) = f t_u \{s_{IF,r}(t, u)\} \exp\{jk_u v_r t\} \quad (12)$$

$$s_{IF,r2}(\omega, u) = f t_\omega \{f t_{k_u} \{s_{IF,r1}(t, k_u)\}\} \quad (13)$$

SAR 영상 복원을 위한 back-projection 알고리즘의 입력신호로써 거리 압축 신호 영역으로 변환하는 과정은 식 (13)과 같다. 이때, $\omega = 2\pi f$ 이며, 거리 정보를 나타내기 위한 주파수 영역의 신호를 나타낸다.

III. 연속이동효과 모의실험

항공기 기반 FMCW-SAR 시스템의 연속이동효과 특징을 분석하고, 이를 보정하기 위해 앞서 설명한 FMCW 신호 모델과 시간-도플러 $s(t, k_u)$ 영역 신호처리 기법을 적용한 모의 실험을 수행하였다. 영상 복원을 위해 back-projection 알고리즘을 이용하였으며, 복원 영상 내 연속이동효과를 효과적으로 표현하기 위해 실제보다 넓은 안테나 방사패턴을 갖도록 설정하였다(표 1 참고).

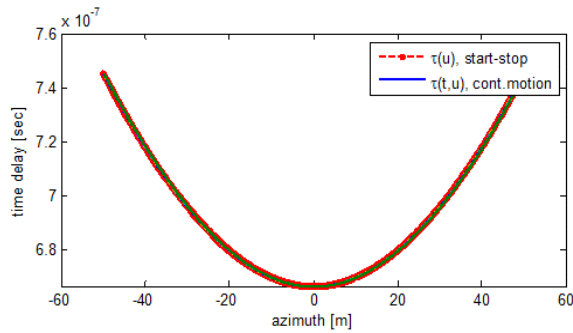
표 1. 모의실험을 위한 FMCW-SAR 시스템 설정
Table 1. FMCW-SAR system parameters for simulation.

설정 항목	설정값	비고
주파수 대역	10.0~10.5 GHz	해상도 30 cm
변조율(K_r)	5e11 Hz/s	chirp-rate
샘플링 주파수	1.2 MHz	1,024 points
측정 시간 주기	1 ms	PRF = 1,000 Hz
안테나 방사 패턴	30°	반전력빔폭(HPBW)

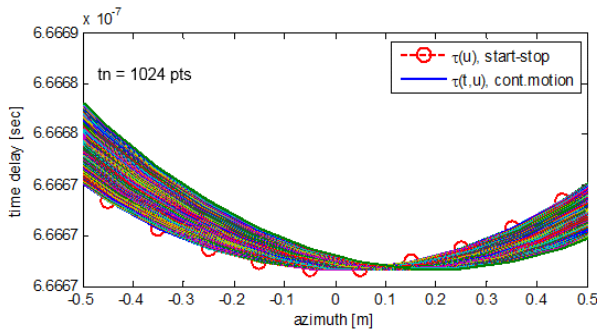
3-1 연속이동효과 적용 거리 압축 신호

FMCW-SAR 시스템에서 발생하는 연속이동효과는 목표물과 안테나 간의 거리변화를 나타낸 식 (6)으로써 그 특성을 확인할 수 있다.

그림 2는 목표물 지연 시간($\tau(t, u) = 2/c \cdot R(t, u)$) 특성을 시간에 따른 안테나 위치 변화를 모두 고려해 작성된



(a) 목표물 시간 지연 특성
(a) Time-delay from a specific target



(b) 목표물 시간 지연 특성(확대 그래프)
(b) Time-delay from a specific target(enlarged graph)

그림 2. 연속이동효과에 의한 목표물 시간지연(τ) 특성
Fig. 2. Property of time-delay(τ) by continuous motion effect.

것으로 1 ms의 샘플링 주기 내 위치 변화를 모두 계산한 것으로 각 샘플링 시간과 그에 따른 안테나의 연속적인 위치 변화(1,024개)를 모두 그린 것으로 방위각 방향으로 중심점이 이동하는 것을 확인 할 수 있다.

그림 3은 앞선 측정 시간과 안테나 위치의 함수로 모델링된 목표물 지연 시간을 이용해 생성된 레이다 원시 신호의 거리 압축 신호 $s(w, u)$ 를 모의실험한 것으로 연속이동효과 유·무를 비교한 결과이다.

3-2 연속이동효과 보정 신호처리

식 (3)~(6)을 이용한 모의 실험을 통해 목표물 궤적이 방위각 방향으로 이동하는 FMCW-SAR 시스템의 연속이동효과를 확인하였다. 이와 같은 연속이동효과가 복원된 SAR 영상에 미치는 영향을 분석하기 위해서 back-projection 알고리즘을 이용해 레이다 원시 신호를 SAR 영상으로 복원하였다.

그림 4는 FMCW-SAR 시스템의 연속이동효과를 보정하기 위한 신호처리과정을 비교 설명한 것으로 'start-stop' 근사기법(연속이동효과 미적용)으로 생성된 레이다 원시 신호를 복원한 기준 SAR 영상과 연속이동효과를 적용한 레이다 원시 신호를 복원한 SAR 영상, 그리고 연속이동

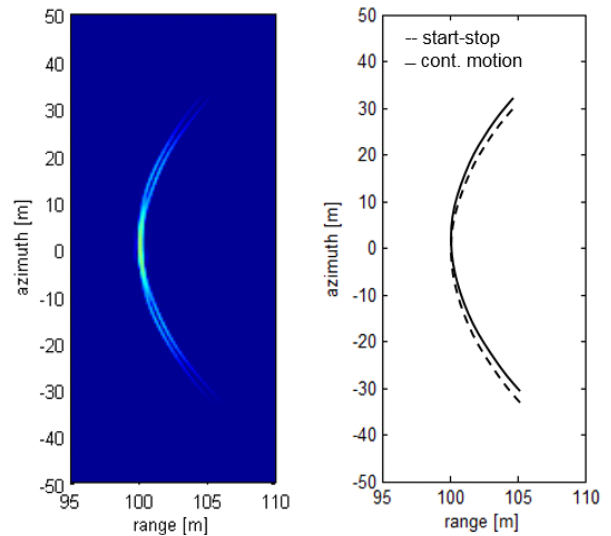


그림 3. 연속이동효과가 적용된 거리압축신호 $s(w, u)$

Fig. 3. Range compressed signals $s(w, u)$ applied the continuous motion effects.

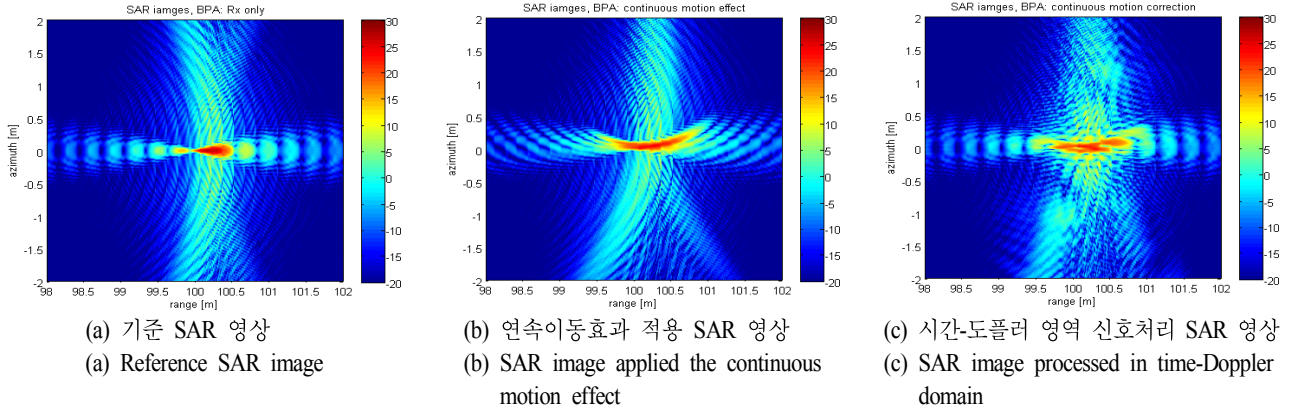


그림 4. 연속이동효과 보정 신호처리 과정
Fig. 4. Process for correcting the continuous motion effect.

효과 보정을 위한 시간-도플러 $s(t, k_u)$ 영역 신호처리 기법이 적용된 SAR 영상을 각각 그림 4(a)~(c)에서 나타낸다. 이때, 목표물의 분산 전력 특성 변화를 정밀하게 나타내기 위해 모의 실험 설정 해상도 30 cm보다 세밀한 해상도로 복원된 영상을 목표물 중심점을 기준으로 확대하였다.

연속 이동 효과를 적용한 그림 4(b) 레이더 원시 신호를 이용한 복원 영상은 기준 영상 대비 목표물의 분산 전력 패턴이 거리 방향으로 퍼지는 특성을 보이며, 방위각 방향으로으로는 항공기 이동 속도에 비례한 왜곡된 위상 성분으로 목표물 분산 전력 패턴이 왜곡되는 특성을 나타낸다.

항공기 이동 속도와 샘플링 시간에 비례하는 연속이동 효과의 위상 변화 성분을 제거하기 위해서 앞서 설명한 식 (12)와 식 (13)의 시간-도플러 영역 신호처리 기법을 back-projection 알고리즘 입력 신호에 적용하여 그림 4(c)와 같은 연속이동효과 보정 결과를 얻었다. 시간-도플러 영역 신호처리 기법을 이용한 연속이동효과 보정 결과는 그림 4(c) 좌우 패턴과 같이 거리 방향의 목표물 분산 전력 패턴이 기준 영상의 패턴 특성과 매우 유사하게 보정됨을 확인 할 수 있다. 그러나 목표물의 중심점 부분의 영상 복원 개선 효과가 충분치 못해 이를 개선하기 위해 추가적으로 영상 복원을 위해 사용된 back-projection 알고리즘에 수정된 정합필터를 적용하였다.

3-3 수정된 Matched-Filter를 이용한 BPA 복원 영상

식 (14)는 기존 back-projection 알고리즘의 정합필터 과

정을 나타낸 것으로 복원 영상의 목표물 지연 시간(t_d)은 안테나 위치(u)와 복원 영상 내 목표물 즉 각 픽셀과의 거리를 이용해 계산될 수 있으며, u 는 M 개의 정지된 안테나 위치로 처리된다. 반면에, 연속이동효과 보정을 위해 수정된 정합 필터 과정은 식 (15) 및 식 (16)과 같이 시간(t)에 따른 변화를 추가한 목표물 지연 시간 특성 함수로 변형 될 수 있으며, 이는 기존의 back-projection 알고리즘의 안테나 위치 입력 정보(u_m)를 시간 샘플(t_n) 개수(N)만큼 세분화하고, 추가된 안테나 위치정보 만큼 목표물의 분산전력이 누적되는 효과가 있다.

$$f(x, y) = \sum_{m=1}^M \{s_{IF,r2}(w, u_m) s_t^*(t_d(u_m))\} \quad (14)$$

$$f(x, y) = \sum_{m=1}^M \sum_{n=1}^N \{s_{IF,r2}(w, u_m) s_t^*(t_d(u_m, t_n))\} \quad (15)$$

$$t_d(u_m, t_n) = \frac{2}{c} \sqrt{x^2 + (y - u_m + v_r t_n)^2} \quad (16)$$

반면에 식(15)의 수정된 정합필터 과정은 시간샘플 개수 N 에 비례한 안테나 세부 위치를 이용한 영상 복원 과정으로 기존 back-projection 알고리즘의 연산량을 N 배 만큼 증가시키는 단점이 있으나, 이는 일정 비율로 시간 샘플 개수를 낮춰 계산함으로써 보정 정확도 유지와 계산 효율 저하를 보완 할 수 있다. 다시 말해, 연속이동효과 보정을 위해 수정된 정합필터는 기존 안테나 위치 입력 정보(u_m)에 항공기 이동 속도와 시간 변화를 고려한 세부위

치 입력 정보(v_r, t_n)를 더한 것으로 기존 back-projection 알고리즘을 이용한 영상 복원 과정에 약 5~10배(예, $N/10 \sim N/100$ 비율 모의 실험 적용) 증가된 입력 정보를 추가해 개선된 목표물 분산 전력 특성을 얻을 수 있다.

그림 5는 시간-도플러 $s(t, k_u)$ 영역에서 연속이동효과 위상성분을 보정한 레이다 거리압축 신호를 입력으로 한 back-projection 알고리즘의 영상 복원 결과이다. 수정된 정합 필터 적용으로 목표물의 분산전력 특성은 중심점에 더욱 집중된 결과를 확인할 수 있으며, 이를 거리방향과 방위각방향으로 각각 추출하여 기준 SAR 영상(REF)과 연속이동효과(CME) 보정 전/후의 결과로 비교한 것이다. 그 결과 시간-도플러 영역에서의 위상 변화 보정 기법(CMC)과 수정된 정합필터(MF)를 적용한 경우, 거리/방위각 방향 해상도 각각 보정 전 37.2 cm/6.5 cm, 보정 후 30.1 cm/8.9 cm로 분석되었으며, 거리방향 해상도 개선과 목표물 중심점 부근의 분산 전력 특성 개선효과가 있음을 확인하였다. 단, 방위각 방향의 해상도는 안테나 세부위치 정보를 추가한 수정된 정합필터로 인해 기준 신호 대비(8 cm) 약 0.9 cm 증가한 수치를 확인하였다.

IV. 실험 결과

FMCW-SAR 시스템 연속이동효과 보정 기법 성능을 비교/검증하기 위해 항공기 기반 FMCW-SAR 시스템을 이

용한 현장관측 자료를 활용하였다. 본 실험연구에 적용된 FMCW-SAR 시스템은 저고도/근거리 비행 실험에 최적화된 ImSAR社(모델명 NanoSAR-B, 최대출력 1 W)에서 제작된 시스템으로 운용 효율을 높이기 위해 delayed-de-chirp 방식으로 운용된다^[10]. 이는 상대적으로 낮은 샘플링 주파수($f_s=1.2$ MHz)와 적은 샘플개수(1,024 points)를 보다 효율적으로 사용하기 위한 방식으로 약 480 m의 상쇄 거리(range offset)를 포함하여 운용되었다(표 2 참고).

연속 이동 효과 보정 기법 검증을 위해 사용된 관측자료는 2016년 1월 대부도 인근 매립지 주변에서 측정된 것으로 넓은 평지로 이루어진 지형에 시험용 목표물(삼각수동전파반사기, 크기 50 cm)을 설치하고, 그 특성을 복원 영상으로부터 분석하였다.

그림 6은 FMCW-SAR 시스템의 연속이동효과 보정성

표 2. 항공기 기반 FMCW-SAR 시스템 제원
Table 2. Specification of airborne FMCW-SAR system.

레이다 항목	제원특성	비고
운용 주파수	10~10.5 GHz	2채널
송신출력	최대 1 W	(최대 30 dBm)
측정시간	약 30초	PRF = 1,000 Hz
샘플링 주파수	1.2 MHz	샘플개수 1,024개
안테나 방사 패턴	12°	HH-pol.(수평편파)
비행 고도/속도	425 m / 320 km/h	—

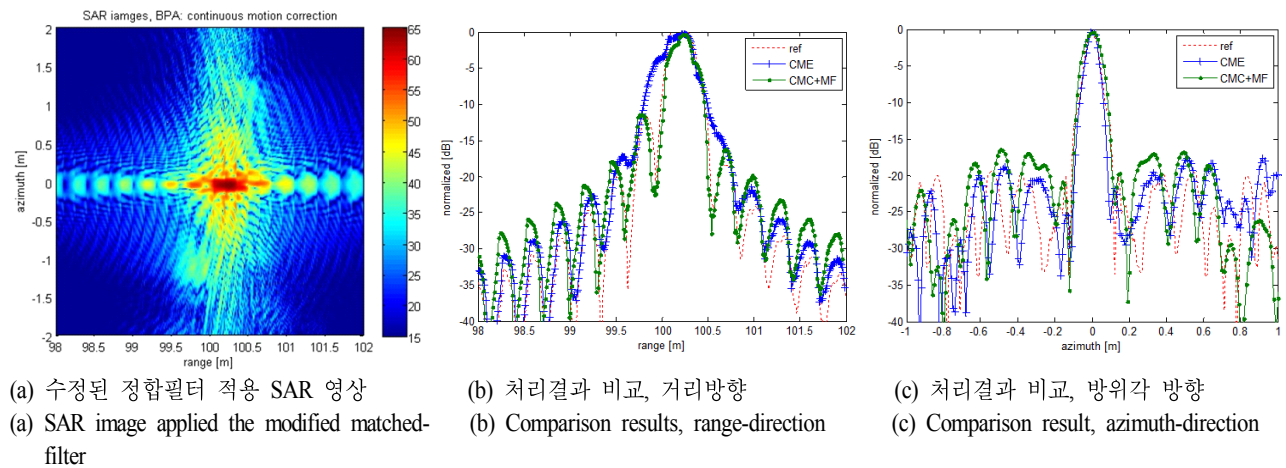
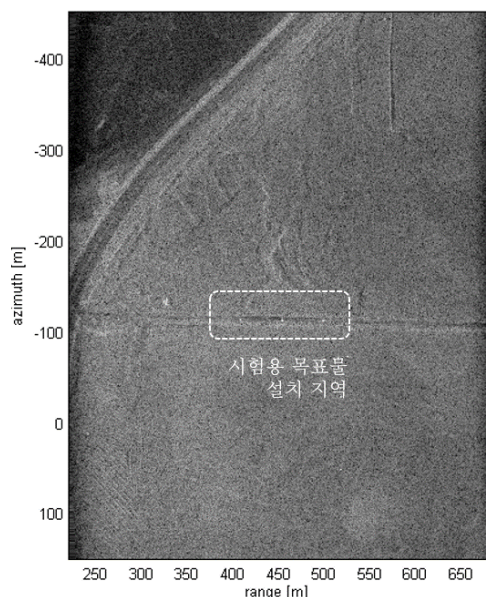
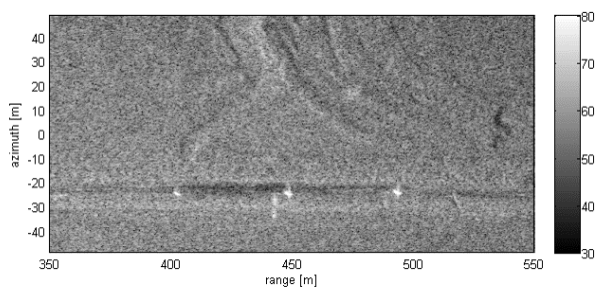


그림 5. 수정된 정합필터 적용 SAR 영상 복원

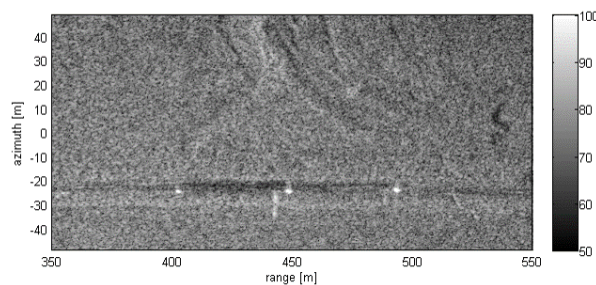
Fig. 5. Reconstructed SAR images applied a process of the continuous motion correction.



(a) 시험지역 SAR 복원 영상
(a) Reconstructed SAR image of test-site



(b) 보정 전(확대 영상)
(b) Before correcting(enlarged image)



(c) 보정 후(확대 영상)
(c) After correcting(enlarged image)

그림 6. 연속이동효과 보정 기법 적용 항공기 기반 FMCW-SAR 영상(4,756×1,534 픽셀)

Fig. 6. Airborne FMCW-SAR images(4,756×1,534 pixels) applied the continuous motion correction.

능을 비교분석한 결과로 보정 전/후의 SAR 영상이며, 시험용 목표물 설치 지역 내 확대 영상으로 보정 성능을 분석하였다. 시험용 목표물을 이용한 보정 성능 분석 결과는 표 3과 같으며, 복원 영상 내 시험용 목표물의 분산 전력 특성은 그림 7과 같이 거리 방향 성분의 개선 효과를 확인 할 수 있었다. 이때, 이론적인 경사거리(slant-range) 해상도는 약 31 cm로 목표물 전파 입사각을 고려할 때 지면거리 해상도는 약 44 cm 정도가 되며, 윈도우 함수를 적용한 일반적인 PSLR(Peak-Sidelobe Ratio) 성능 -20 dB 보다 낮은 결과를 확인하였다^[9].

V. 결 론

본 연구에서는 FMCW-SAR 시스템의 연속이동효과를 보정하기 위해 시간-도플러 $s(t, k_a)$ 영역 신호처리 기법과 SAR 영상 복원을 위한 back-projection 알고리즘의 수정된 정합

표 3. 연속이동효과 보정 신호처리 결과

Table 3. Performances of the continuous motion correction.

항 목	보정 전	보정 후	비고
해상도	0.63 m	0.51 m	거리 방향 방위각 방향
	0.46 m	0.47 m	
PSLR(peak sidelobe ratio)	-22.6 dB	-25.9 dB	거리 방향 방위각 방향
	-20.4 dB	-20.1 dB	

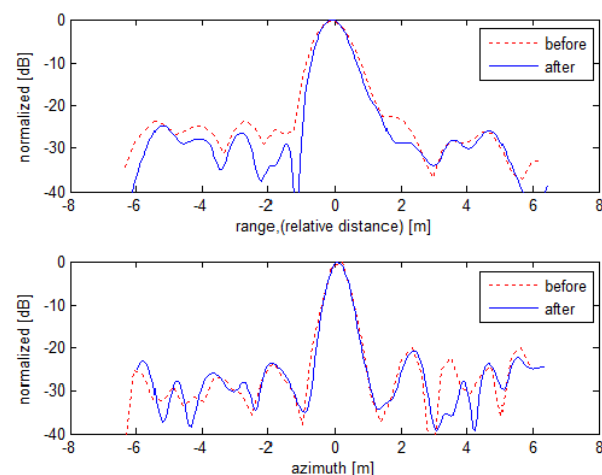


그림 7. 시험용 목표물 분산전력 특성

Fig. 7. Property of the power spill of test targets.

필터 기법을 제안하였으며, 연속이동효과 보정검증을 위해 FMCW 신호 모델을 이용한 모의실험을 수행하였다. 또한, 제안된 연속이동효과 보정 기법의 성능검증을 위해 실제 항공기 기반 FMCW-SAR 원시자료를 이용하였으며, 분석결과 거리방향 해상도 개선(측정값 51 cm, 이론값 44 cm)과 PSLR 2~3 dB 개선 효과를 확인하였다.

References

- [1] 최재현, 장중훈, 이재환, 노진입, "FMCW 전파고도계의 신호처리 알고리즘 구현", 한국전자과학회논문지, 26(6), pp. 555-563, 2015년 6월.
- [2] 이기웅, 김범승, 문민정, 송정환, 이우경, 송용규, "드론을 활용한 초소형 SAR 영상 구현 및 품질 보상 분석", 한국전자과학회논문지, 27(9), pp. 854-864, 2016년 9월.
- [3] 황지환, 김승희, 강기목, 김덕진, "다중대역폭을 갖는 FMCW 레이더 송수신기 설계 및 제작", 한국전자과학회논문지, 27(4), pp. 377-387, 2016년 4월.
- [4] E. C. Zaugg, D. G. Long, "Theory and application of motion compensation for LFM-CW SAR", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 46, no. 10, pp. 2990-2998, Oct. 2008.

- [5] A. Ribalta, "Time-domain reconstruction algorithms for FMCW-SAR", *IEEE Geosci. Remote Sens. Lett.*, vol. 8, no. 3, pp. 2990-2998, May 2011.
- [6] M. Soumekh, *Synthetic Aperture Radar Signal Processing with Matlab Algorithm*, John Wiley & Sons, Inc., pp. 47-135, 1999.
- [7] M. I. Skolnik, *Radar Handbook*, 3rd edition, McGraw-Hill Inc., New York, 2008.
- [8] A. Meta, L. P. Ligthart, "Signal processing for FMCW SAR", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 45, no. 11, pp. 3519-3532, Nov. 2007.
- [9] I. G. Cumming, F. H. Wong, *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data*, Artech House, Boston/London, pp. 40-112, 2005.
- [10] E. C. Zaugg, D. G. Long, "Generalized frequency scaling and backprojection for LFM-CW SAR processing", *IEEE Trans. Geosci. Remote Sensing*, vol. 53, no. 7, pp. 3600-3614, Jul. 2015.

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 전자정보통신공학과 (공학박사)

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

정 정 교



2011년 2월: 서울대학교 지구환경과학부 (이학사)
 2013년 2월: 서울대학교 지구환경과학부 (이학석사)
 2013년 3월~현재: 서울대학교 지구환경과학부 박사과정
 [주 관심분야] 마이크로파 원격탐사, 항공기 SAR, SAR Interferometry

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 방문 연구원

2005년 3월~2005년 10월: 서울대학교 기초과학연구원 박사후 연구원

2005년 10월~2006년 1월: 캐나다 University of Manitoba 박사후 연구원

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

2007년 7월~2008년 8월: 한국항공우주연구원 선임연구원

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

2008년 9월~현재: 서울대학교 지구환경과학부 부교수

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

신 희 섭



2002년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자 공학과 (공학사)

2004년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자 공학과 (공학석사)

2009년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자 공학과 (공학박사)

2009년 1월~현재: LIG Nex1 우주영상연

구소 수석연구원

[주 관심분야] SAR 신호처리

김 진 우



2004년 2월: 인하대학교 자연과학부 (이학사)

2008년 8월: 서울대학교 지구환경과학부 (이학석사)

2014년 2월: 서울대학교 지구환경과학부 (이학박사)

2014년 4월~2014년 8월: UNIST 도시환경공학부 박사후연구원

2014년 9월~현재: LIG NEX1 우주영상연구소 선임연구원

[주 관심분야] 마이크로파 원격탐사, SAR 체계공학, SAR 신호 처리

옥 재 우



2009년 2월: 중앙대학교 전자전기공학부 (공학사)

2011년 2월: Postech 전자전기공학과 (공학석사)

2011년 2월~현재: LIG NEX1 우주영상연구소

[주 관심분야] SAR Processing, 마이크로

파 원격탐사