

스퀀트 SAR 시스템을 위한 최적화된 RCM 궤적의 기하학적 분석

Geometric Analysis of Optimized Range Cell Migration Trajectory for Squint Synthetic-Aperture Radar System

황지환 · 김덕진 · 한승훈* · 조재형* · 문효이*

Ji-Hwan Hwang · Duk-Jin Kim · Seung-Hoon Han* · Jae-Hyoung Cho* · Hyoi Moon*

요 약

본 논문에서는 스퀀트 SAR(synthetic aperture radar) 시스템을 위한 최적화된 RCM(range cell migration) 궤적 특성함수를 기하학적 접근법을 이용해 분석하고, 그 결과를 SAR 영상복원과정을 통해 검증한다. 이를 위해 회전 변환된 좌표평면으로부터 스퀀트 SAR 시스템의 거리방정식을 분석하고, FMCW-SAR(frequency modulated continuous wave: SAR) 신호모델과 Fourier 변환을 기반으로 한 신호변환과정을 통해 도플러영역 RCM 특성함수를 유도한다. 기하구조를 이용해 유도된 도플러영역 RCM 특성함수는 RDA(range Doppler algorithm) 기반 스퀀트 SAR 영상복원을 위한 RCM 보정과정과 정합필터과정에 기준함수로써 적용되며, 그 최적화된 특성을 비교/검증한다. 예측결과 대비 분석결과는 스퀀트 각도 45° 이내의 분석범위에서 약 5 % 오차를 포함한 해상도 분석결과를 확인하였다.

Abstract

In this study, an optimized characteristic function of the range cell migration(RCM) trajectory for a squint synthetic-aperture radar(SAR) system is analyzed using a geometric approach, and its performance is validated through the reconstruction of an SAR image. To achieve this, a range equation of a squint SAR system is developed in a rotational transformed coordinate, and the characteristic function of the RCM trajectory is transformed to the Doppler domain using a frequency-modulated continuous wave-SAR signal model and Fourier-transform-based signal transformation process. This formula developed through geometric analysis is applied in RCM correction and matched filtering for squint SAR image processing. Its optimized performance is compared and validated in the same process. The analysis results indicate that the resolution included an error of approximately 5 %, compared with the predicted result, in the analysis range within a squint angle of 45° .

Key words: RCM Trajectory, Geometric Analysis, FMCW-SAR, Range-Doppler Algorithm

I. 서 론

스퀀트 SAR 시스템은 스퀀트 설정각도를 ‘0°’로 하는

기존 SAR 시스템의 운용조건을 벗어난 설정에서 SAR 신호를 수집하고 처리함으로 다양한 응용이 가능하나, 스퀀트 설정각도가 ‘0°’를 벗어나면서 수신신호의 비틀림

「본 연구는 2019년도 한화시스템(주)의 재원을 지원받아 수행된 연구입니다(계약번호 U-19-003).」

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

*한화시스템 항공레이다팀(Avionics Radar Team, Hanwha Systems)

· Manuscript received March 10, 2020 ; Revised May 11, 2020 ; Accepted May 20, 2020. (ID No. 20200310-022)

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

(skewness) 현상과 같은 영상복원을 위한 좌표정보의 왜곡이 발생한다. 이와 같은 스퀀트 SAR 수신신호 특성변화는 기존 SAR 시스템에 최적화된 다양한 신호모델과 신호처리방법이 스퀀트 SAR 시스템을 위해 더이상 유효하지 않음을 의미한다. 스퀀트 SAR 시스템의 최적 성능을 유지하기 위해서 다양한 신호처리방법과 분석법이 연구되고 있으며, 크게 수신신호모델을 이론적으로 분석하는 방법과 기하구조를 이용한 분석 방법으로 나뉜다^{[1]~[6]}. 최적의 성능을 유지한 SAR 영상처리를 위한 두 접근방법은 INS(inertia navigation system) 센서로부터 제공되는 플랫폼 위치와 자세 등의 기하정보 정확도에 의존적인 특성이 있으며, 특히 기하구조를 이용한 스퀀트 SAR 분석기법은 이 부분에 취약한 특징을 갖지만, 이상적인 조건의 기하구조로부터 스퀀트 설정각도 변화에 따른 SAR 수신신호 특성변화를 보다 직관적으로 이해하고, 이론적으로 분석하기 위한 장점도 갖는다^{[5]~[7]}.

본 연구에서는 스퀀트 SAR 시스템의 최적 영상복원을 위해 RCM 궤적 특성함수를 스퀀트 SAR 기하구조를 통해 그 변화를 분석하며, 도플러영역 RCM 특성함수를 얻기 위한 FMCW-SAR 신호모델 변환과정에 대해 설명한다. 최적의 RCM 특성함수는 RDA(range Doppler algorithm) 기반의 영상복원과정에 적용하여 그 최적화된 특성을 기존 RCM 궤적 특성함수와 비교/검증한다.

II. SAR 기하구조와 신호특성

이상적인 SAR 기하구조와 영상복원을 위한 좌표정보는 그림 1과 같이 나타낼 수 있으며, 목표물을 중심으로 스퀀트 각도 변화에 따른 합성개구면(synthetic aperture)의 위치 이동과 그로 인한 좌표정보의 왜곡 등이 수신신호에 미치는 영향을 기하구조를 통해 분석한다.

2-1 SAR 시스템 기하구조

3차원의 SAR 기하구조는 전파진행방향(\hat{k})과 빔 중심을 고려해 경사거리방향(x_{sl}) 기준면의 2차원 구조로 단순화되어 안테나와 목표물 간 거리변화, 그리고 스퀀트 설정각 변화에 따른 합성개구면 위치 이동, 그리고 이에 따른 수신신호 좌표정보의 왜곡 정도를 분석할 수 있다. 다

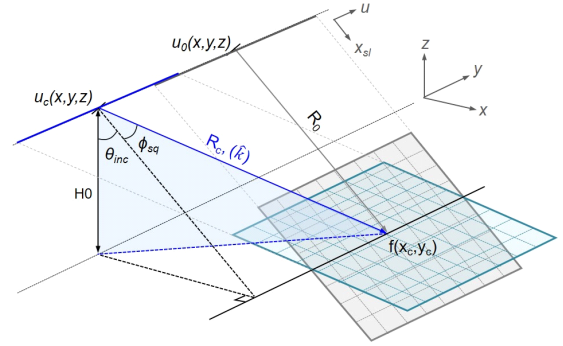


그림 1. 스퀀트 SAR 시스템 기하구조

Fig. 1. Geometry of squint SAR system.

만, 합성개구면의 유효길이(또는 최대길이)는 안테나 반전력빔폭과 비행고도에 의존적이며, 이를 반영한 경사거리평면 상의 2차원 구조로 단순화 될 수 있다^{[5][6]}.

본 연구에서 스퀀트 SAR 시스템의 수신신호 특성변화를 분석하기 위해 동일한 목표물을 중심으로 스퀀트 설정각도에 따라 합성개구면 위치를 이동시키는 방법으로 동일 목표물의 신호특성 변화를 분석한다(그림 2).

2-2 스퀀트 SAR 신호특성 및 RCM 궤적 변화

SAR 영상복원을 위한 신호처리 과정은 안테나와 목표물 간 거리변화를 나타내는 거리방정식과 도플러 신호영역의 RCM 궤적 기반으로 각각의 보정과정과 정합필터 등을 수행한다. 스퀀트 각도 설정에 따른 거리방정식 및 RCM 궤적 변화를 직관적으로 이해하기 위해 그림 2와 같은 2차원 구조의 SAR 시스템 RCM 특성을 도식화하였다. 그림 2(a)는 스퀀트 각도 설정이 '0°'인 기준 조건(예, zero-squint 경우)으로 지면거리 기준 목표물 중심(x_c, y_c)으로부터 안테나의 거리방정식은 식 (1)과 같다^[5].

$$R(u) = \sqrt{R_0^2 + (y_c - u)^2} \quad (1)$$

이때, 스퀀트 각도 설정이 ($\phi_{sq} \neq 0$)인 경우, 그림 2(b)와 합성개구면의 중심위치는 u_0 에서 u_c 로 이동하며, 목표물과의 거리방정식은 위의 식 (1)이 그대로 적용된다. 이때, 거리변화는 그림 2(b)의 '(1) squint, non-skewed' 영역의 RCM 궤적으로 나타난다. 그러나 이는 스퀀트 각도 설정에 의한 전파진행방향(\hat{k}) 변화를 고려하지 않은 설정(예,

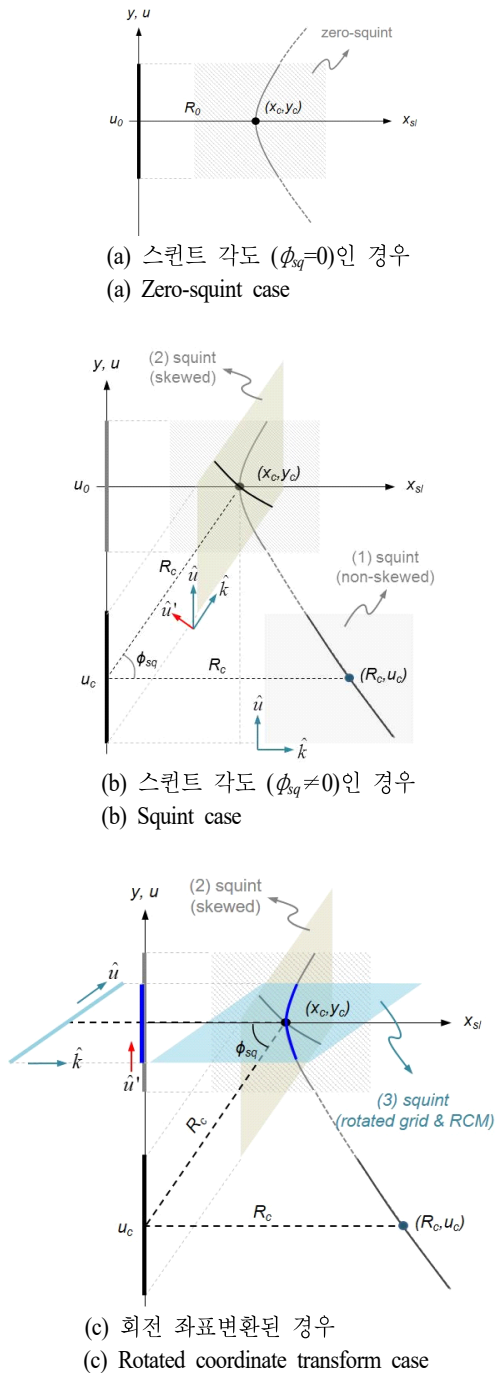


그림 2. 2차원 경사거리 평면상의 RCM 궤적 변환과정
Fig. 2. Transform procedure of RCM trajectory on 2D slant-range plane.

$\hat{k} = \hat{x}_{sl}$)으로 표현된 것이다. 다시 말해, 스쿼트 각도

설정에 의한 전파진행방향 변화를 고려한 RCM 궤적은 ‘(2) squint, skewed’ 영역의 비틀린 좌표정보에 동일한 거리 방정식 식 (1)의 거리가 반영되어 기존 좌표평면에 표현된다. 이때, 전파진행방향(\hat{k})과 비행방향(\hat{u})은 비틀린 좌표정보의 기저벡터성분으로 작용하며, RCM 궤적은 전파진행방향을 기준으로 한 새로운 좌표정보(\hat{k}, \hat{u})로 재설정될 수 있다. 새로운 좌표정보를 기준으로 한 RCM 궤적은 기준신호와 유사한 특성을 갖게 되고, 이를 직접 기준신호와 좌표평면으로 이동시키기 위해 목표물 중심점을 기준으로 좌표정보를 회전시키는 좌표변환을 시도할 수 있다^[7].

그림 2(c)는 비틀린 좌표정보 ‘(2) squint, skewed’에 표현된 신호특성을 스쿼트 설정각도 만큼 회전시켜 기준좌표 위에 중복해 도식화한 것이다. 스쿼트 설정에 의한 비틀린 좌표정보를 목표물 중심점을 기준으로 회전 변환시킨 좌표로 표현할 수 있으며, 앞서 신호처리를 위한 새롭게 추가된 기저벡터(\hat{u}') 성분도 함께 회전 변환된다.

요약하면 각 단계는 스쿼트 각도 설정에 의해 합성개구면 중심 이동과 그에 따른 목표물 중심과의 거리 변화 그리고 좌표정보의 비틀림(skewness) 정도에 의해 왜곡된 좌표평면에 의해 스쿼트 SAR 수신신호의 RCM 궤적이 결정되며, 이는 회전변환된 좌표계를 이용해 기준신호와 비교/분석이 가능하게 된다. 거리-비행방향 기하구조 내에서 분석된 RCM 궤적 특성함수는 다음 장에서 거리-도플러 신호영역의 특성함수로 변환/분석된다.

2-3 스쿼트 SAR 좌표변환 및 RCM 특성함수, $R'(u')$

앞서 개념적으로 설명한 스쿼트 SAR 신호특성 및 RCM 궤적 변화를 거리방정식과 좌표변환 과정을 통해 최적화된 거리(\hat{R} 또는 \hat{k})-비행방향(\hat{u}) 신호영역의 특성함수를 유도할 수 있으며, 그림 3과 같이 도식화된 기준좌표(‘zero-squint’ 경우)와 스쿼트 각도에 의해 비틀린 좌표(‘squint’ 경우) 그리고 이를 회전시킨 좌표정보를 이용해 단계별 RCM 궤적의 특성함수를 분석한다.

그림 3의 좌표변환 과정을 식 (1)의 거리방정식을 이용해 수식으로 나타내면, 먼저 ‘zero-squint’ 경우, 기준좌표정보를 적용한 식 (1)의 거리방정식을 ‘squint’ 경우 거리

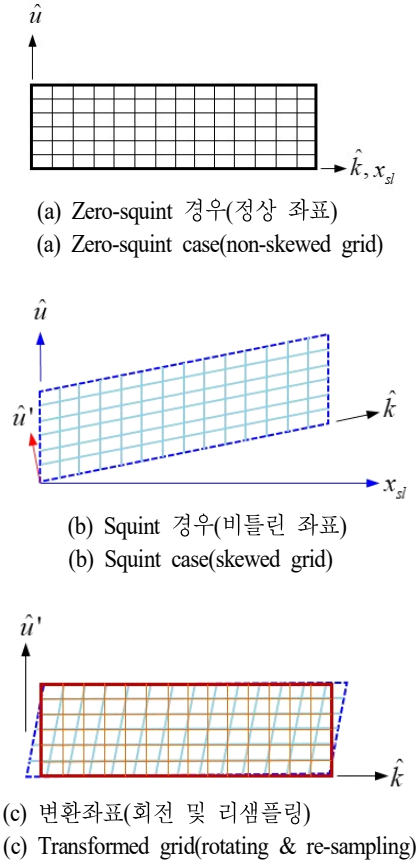


그림 3. 스퀀트 SAR 좌표 변환 과정

Fig. 3. Conversion process of squint SAR grid.

방정식 식 (2)와 같이 중심거리(R_c) 변화를 반영해 수정할 수 있다. 또한, 스퀀트 SAR 신호특성을 그림 3(b)의 비틀린 좌표평면에 나타내기 위해서 거리방정식 식 (2)는 경사거리평면 상의 (x_{sl}, y) -성분으로 구분하여 식 (3)과 같이 정리할 수 있다.

$$R(u) = \sqrt{R_c^2 + (y_c - u)^2} \quad (2)$$

$$(x_{sl}, y) = (R(u) \cos \phi_{sq}, u + R(u) \sin \phi_{sq}) \quad (3)$$

그림 2(c)의 ‘(3) squint, rotated grid & RCM’ 영역에 적용된 좌표정보는 식 (3)을 목표물 중심(x_c, y_c)을 기준으로 스퀀트 설정각도(ϕ_{sq}) 만큼 회전시킨 것으로 식 (4)와 같이 전개될 수 있다. 회전변환된 좌표의 x - y -성분은 각각 x_ϕ 와 y_ϕ 로 나타낸다.

$$\begin{aligned} (x_\phi, y_\phi) &= \begin{pmatrix} \{R(u) \cos \phi_{sq} - R_0\} \cos \phi_{sq} + \\ u \cdot \sin \phi_{sq} + R(u) \sin^2 \phi_{sq} + R_0, \\ -\{R(u) \cos \phi_{sq} - R_0\} \sin \phi_{sq} \\ + u \cdot \cos \phi_{sq} + R(u) \cos \phi_{sq} \sin \phi_{sq} \end{pmatrix} \\ &= \begin{pmatrix} R(u) + R_0(1 - \cos \phi_{sq}) + u \cdot \sin \phi_{sq}, \\ R_0 \sin \phi_{sq} + u \cdot \cos \phi_{sq} \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (4)$$

‘squint’ 경우, 거리방정식 식 (2)는 비틀린 좌표평면에 나타내기 위해 (x_{sl}, y) -성분으로 분해한 식 (3)은 다시 목표물 중심점(x_c, y_c)을 기준으로 회전시킨 좌표평면의 (x_ϕ, y_ϕ) -성분으로 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

식 (4)의 회전변환된 좌표정보는 개념적으로 그림 3(b)에서 그림 3(c)의 좌표로 회전된 결과이며, 그림 3(c)는 SAR 영상처리를 위한 추가된 기저벡터(\hat{u}') 성분으로의 리샘플링 과정을 포함한다. 다시 말해, 회전된 좌표와 리샘플링 과정을 거쳐 스퀀트 SAR 시스템의 비틀린 좌표특성이 새로운 직각좌표로 변환되는 (de-skewing)과정을 도식화한 것이다. 식 (4)의 결과식 중 x_ϕ -성분은 식 (1) 거리방정식의 회전변환된 좌표계(local coordinate) 내 표현식이 되며, 이는 식 (5)와 같이 스퀀트 SAR 시스템을 위한 거리방정식($R'(u)$)이 된다.

$$R'(u) = R(u) + R_0(1 - \cos \phi_{sq}) + u \cdot \sin \phi_{sq} \quad (5)$$

이때, 식 (4)의 y_ϕ -성분은 비행방향(u)성분과 회전변환 좌표계에서 추가된 방향(u')성분의 관계식 식 (6)을 제공하며, 이를 식 (5)에 대입해 u' 으로 표현된 회전변환 좌표평면 내 거리방정식($R'(u')$) 식 (7)을 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} u' &= R_0 \sin \phi_{sq} + u \cdot \cos \phi_{sq} \\ \rightarrow u &= \frac{\{u' - R_0 \sin \phi_{sq}\}}{\cos \phi_{sq}} \end{aligned} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} R'(u') &= \sqrt{R_0^2 + A^2(u')} + R_0 \left(1 - \frac{1}{\cos \phi_{sq}}\right) + u' \tan \phi_{sq} \\ \text{여기서, } A(u') &= \left(y_c - \frac{u'}{\cos \phi_{sq}} + R_0 \tan \phi_{sq}\right) \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)의 스퀀트 설정각도를 ‘ $\phi_{sq}=0^\circ$ ’로 할 때, 기존 거리방정식 식 (1)과 같은 식이 됨을 쉽게 확인할 수 있다.

III. 스캔트 SAR 시스템 RCM 특성함수

본 장에서는 회전 변환된 좌표계에서 얻어진 스캔트 SAR 시스템의 RCM 특성함수($R'(u')$)를 도플러영역의 특성함수($R'(k_u')$)로 변환/분석하는 과정을 설명한다. 신호변환과정은 FMCW-SAR 신호모델을 기반으로 분석되었으며, 송·수신 신호의 주파수하향변환(frequency down conversion)과정을 거친 비트주파수(beat frequency)로부터 거리정보를 획득는 FMCW 레이다 시스템 특성상 거리-도플러 신호영역을 나타내기 위해서 주파수-도플러 신호영역이 적용된다^[8].

3-1 FMCW-SAR 신호모델 기반 신호변환과정

스캔트 SAR 시스템의 RCM 궤적을 나타내는 특성함수($R'(u')$) 식 (7)로부터 도플러영역의 RCM 특성함수를 유도하기 위해 u' 와 k_u' 의 관계를 FMCW-SAR 신호모델의 Fourier 변환과정에서 유도할 수 있다. POSP(principle of stationary phase) 근사기법으로 유도된 관계식은 다음 식 (8)~(10)과 같이 정리된다^{[6],[8]}.

식 (8)은 FMCW-SAR 신호모델을 기반으로 한 (f, u') -신호영역의 수신신호를 나타내며, 목표물 지연시간(τ)은 스캔트 SAR 시스템의 RCM 특성함수($R'(u')$)를 포함한다.

$$s(f, u') = \exp \left\{ -2\pi j(f_0 + f)\tau'(u') - j\frac{\pi f^2}{K_r} \right\} \quad (8)$$

여기서, $\tau'(u') = \frac{2}{c} R'(u')$

$$s(f, k_u') = \int_{-\infty}^{\infty} [\exp \{j\Phi\}] du' \\ = \int_{-\infty}^{\infty} \left[\exp \left\{ -2\pi j(f_0 + f)\tau' - j\frac{\pi f^2}{K_r} - jk_u' u' \right\} \right] du' \quad (9)$$

$$\frac{d\Phi}{du'} = \frac{d}{du'} \left\{ -\frac{4\pi}{c} (f_0 + f) R'(u') - k_u' u' \right\} = 0 \quad (10)$$

식 (9)~(10)은 (f, u') -신호영역의 수신신호를 도플러(k_u')영역으로 변환하기 위한 Fourier 변환과 POSP 식을 요약한 것이다^[8].

식 (10)은 식 (11)의 미분식을 풀어 정리되며, 그 과정은 다소 지루한 풀이 과정이 되지만, 누구나 어렵지 않게 유도할 수 있다. 또한, 식 (7)에서 정의된 $A(u')$ 식을 이용

해 식을 간단히 정리할 수 있다.

$$\frac{d}{du'} \{ R'(u') \} = \frac{A(u')}{\cos \phi_{sq} \sqrt{R_0^2 + A^2(u')}} + \tan \phi_{sq} \quad (11)$$

$R'(u')$ 을 미분한 식 (11)은 앞선 식 (10)에 대입하여 k_u' 와 u' 의 관계식 식 (12)를 완성할 수 있다.

$$k_u' = -\frac{4\pi}{c} (f_0 + f) \left\{ \frac{A(u')}{\cos \phi_{sq} \sqrt{R_0^2 + A^2(u')}} + \tan \phi_{sq} \right\} \quad (12)$$

3-2 도플러 영역 RCM 특성함수, $R'(k_u')$

k_u' 와 u' 의 관계식 식 (12)는 $A(u')$ 식을 포함하고 있어 이를 $A(u')$ 에 대한 이항정리로 $A(k_u')$ 식 식 (13)을 유도할 수 있다. 또한, 식 (7)에서 정의된 $A(u')$ 식을 u' 에 대한 이항정리로 또 다른 관계식을 만들 수 있다.

$$A(k_u') = \frac{cR_0 \cdot \cos \phi_{sq} \cdot B}{\sqrt{16\pi^2(f_0 + f)^2 - c^2 \cos^2 \phi_{sq} \cdot B^2}} \\ B = \left\{ k_u' + \frac{4\pi}{c} (f_0 + f) \tan \phi_{sq} \right\} \quad (13)$$

$$A(u') = \left(y_c - \frac{u'}{\cos \phi_{sq}} + R_0 \tan \phi_{sq} \right) \\ \rightarrow u' = \{ y_c + R_0 \tan \phi_{sq} - A(u') \} \cdot \cos \phi_{sq} \quad (14)$$

앞서 유도된 두 관계식 식 (13)과 식 (14)를 스캔트 SAR 시스템의 RCM 특성함수($R'(u')$) 식 (7)에 대입하여 도플러영역 RCM 특성함수($R'(k_u')$) 식 (15)를 유도할 수 있다.

$$R'(k_u') = \sqrt{R_0^2 + A^2(k_u')} + R_0 \left(1 - \frac{1}{\cos \phi_{sq}} \right) + u' \tan \phi_{sq} \\ + \{ y_c + R_0 \tan \phi_{sq} - A(k_u') \} \cdot \sin \phi_{sq} \quad (15)$$

위 식 (15)는 스캔트 SAR 시스템을 위한 도플러 신호영역의 RCM 특성을 나타내는 특성함수로써 스캔트 SAR 영상복원을 위한 다음의 영상처리 과정에 적용되어 그 최적화된 특성을 분석/검증한다.

3-3 RCM 보정값, $\Delta R'(k_u')$

스캔트 SAR 시스템을 위해 최적화된 RCM 특성함수

식 (15)는 RDA(range-doppler algorithm) 기반 영상복원과정 중 보간법(interpolation)을 이용한 RCM 보정과정에 적용하여 기존 RCM 특성함수를 대체할 수 있다. RCM 보정을 위한 보정값($\Delta R'(k_u')$)은 회전 변환된 좌표계(local coordinate) 내에서 중심거리(R_0)를 기준으로 할 때, 식 (16)과 같이 간단히 정리될 수 있다.

$$\Delta R'(k_u') = R'(k_u') - R_0 \quad (16)$$

IV. 모의실험 성능분석 결과

스퀀트 SAR 시스템에 최적화된 RCM 특성함수를 적용한 RDA 기반 영상복원 특성은 표 1의 FMCW-SAR 시스템 제원을 이용한 모의실험을 통해 비교/분석한다.

4.1 RDA 기반 스퀀트 SAR 영상복원 응용

RDA 기반 스퀀트 SAR 영상복원 과정은 기존 RDA 영상처리 과정의 전·후 단계에 회전 변환된 좌표특성을 반영하기 위한 전처리 과정과 변환좌표를 원래 좌표정보로 되돌리는 후처리 과정이 추가된다(그림 4 및 Fourier 변환의 회전속성(rotation property) 참고문헌 [6] 참조)(그림 5).

RDA 기반 영상처리과정의 입력자료로 회전변환을 거친 전처리된 신호는 RCM 특성함수($R'(k_u')$) 식 (15)를 적용한 RCM 보정과정과 정합필터과정을 거쳐 스퀀트 SAR

표 1. 항공기 기반 FMCW-SAR 시스템 제원
Table 1. Specification of airborne FMCW-SAR system.

Items	Spec.	Note
Frequency	X-band	BW=500 MHz
Chirp rate(K_r)	5e11 Hz/s	$t_{\text{sweep}}=1$ ms
Range bins	1,252 samples	$f_s \approx 1.2$ MHz
Azimuth bins	2,001 samples	-
SA length	120 m	-
Altitude	1 km	-
HPBW	$\phi=5^\circ$, $\theta=50^\circ$	(azimuth, elevation)
Incident angle	$\theta_{mc}=45^\circ$	-
Scene center	$x_c=1$ km	(ground range)
Squint angle	$\phi_{sq}=0^\circ \sim 45^\circ$	

스퀀트 SAR 시스템을 위한 최적화된 RCM 궤적의 기하학적 분석

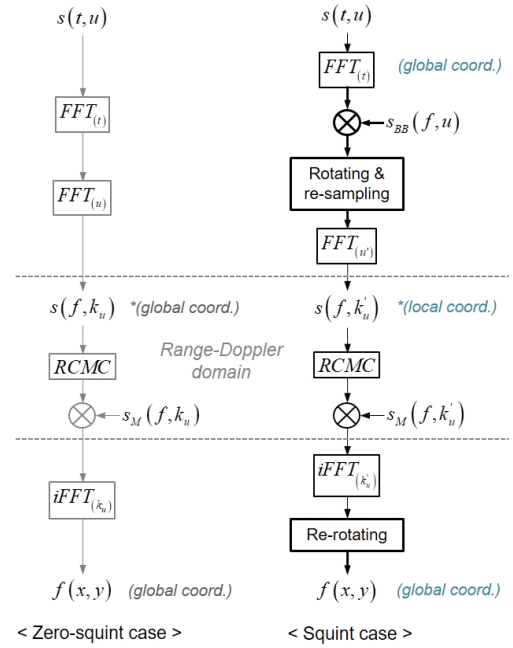


그림 4. RDA 기반 스퀀트 SAR 영상복원 과정
Fig. 4. RDA-based squint SAR image reconstruction.

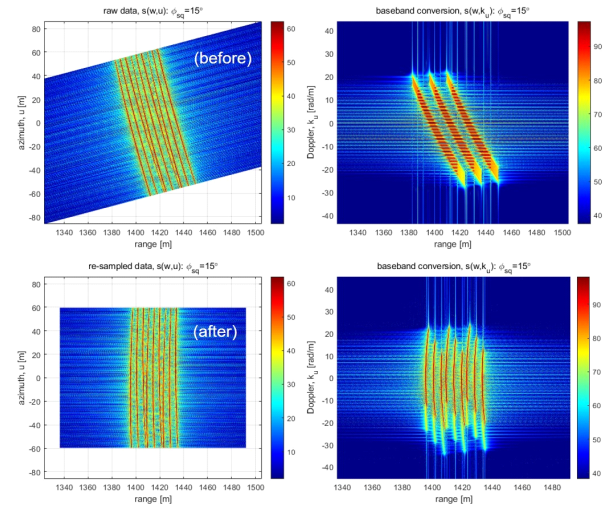


그림 5. 전처리 결과 비교(적용 전·후)
Fig. 5. Comparison of pre-processing results(before & after).

영상으로 복원되며, 이를 원래 좌표평면으로 회전('re-rotating')시켜 지면으로 투영하는 과정으로 영상복원이 이루어진다.

그림 6은 약 120×200 m의 합성개구면과 주사폭을 갖는

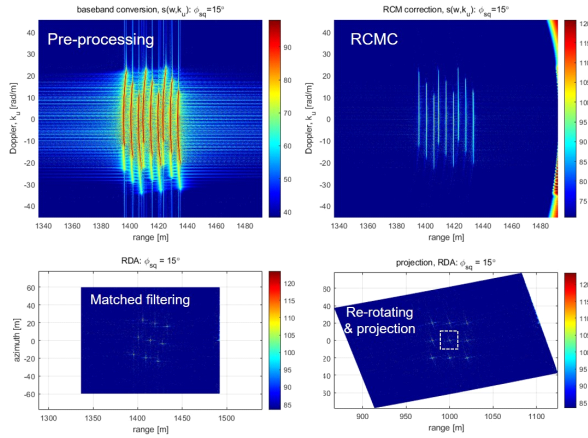


그림 6. RDA 기반 스윙트 SAR 영상복원 과정
Fig. 6. Squint SAR focusing process by RDA.

스윙트 SAR 영상을 모의실험한 것으로 20 m 간격 9개 목표물을 이용해 회전 변환된 좌표평면에서 적용된 RCM 보정과 정합필터 그리고 원래의 좌표평면으로의 변환과 지면으로 투영된 스윙트 SAR 영상복원 과정을 나타낸다.

4-2 Squint SAR 영상복원 결과

그림 7은 스윙트 설정각도(예, $\phi_{sq}=10^\circ$) 조건에서 기존 RDA 영상처리 과정과 스윙트 SAR 시스템에 최적화된 RCM 특성함수와 전처리과정을 적용한 영상처리 결과를 비교한 것이다. 본 모의실험 결과는 새로운 RDA 영상처리 기법을 제시하기 위한 목적이기보다 앞서 스윙트 SAR 시스템 기하구조와 FMCW-SAR 신호모델을 이용해 최적화시킨 RCM 특성을 기존 RDA 영상처리 기법에 전·후처리 단계를 추가하여 수신신호의 비틀림(skewness) 특성 보정효과와 목표물 분산전력패턴(power-spill) 변화 등의 특성변화를 분석할 목적으로 수행된 결과이다.

스윙트 설정각도 변화를 반영하지 못하는 기존 RCM 특성함수를 적용한 경우는 영상복원 성능에 심각한 영향을 미칠 뿐만 아니라, 스윙트 설정각도 $\phi_{sq}=10^\circ$ 이상인 조건에서는 영상복원이 불가능할 정도의 열화된 복원성능을 확인하였다. 반면에, 스윙트 SAR 시스템에 최적화된 RCM 특성함수를 적용한 경우, 회전변환된 좌표정보와 최적화된 특성함수로 수신신호 비틀림 보정(de-skewing) 효과와 RCM 보정과정의 정확도를 개선한 방법을 기존

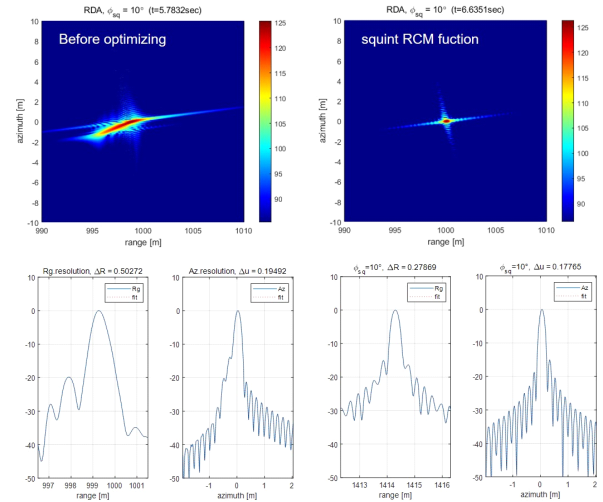


그림 7. 스윙트 SAR 영상복원 결과 비교
Fig. 7. Comparison result of reconstructed squint SAR images.

RDA 영상처리과정에 적용하여 이론적 해상도에 부합된 결과(예측결과 $\Delta R=0.3$ m, $\Delta u=0.183$ m, 모의실험결과 $\Delta R=0.286$ m, $\Delta u=0.181$ m)를 확인하였다. 단, 해상도는 경사거리를 기준면으로 복원된 영상으로부터 분석된 결과이다. 또한, 해상도 예측값은 앞선 식 (12) k_u 와 u 의 관계식과 식 (6) u' 과 u 의 관계식으로부터 도플러 주파수(최대값 k_u^+ , 최소값 k_u^-)와 대역폭($BW_{(k_u)}$)을 계산하며, 방위방향 해상도는 식 (17)의 관계식으로부터 계산된다^[5].

$$BW_{(k_u)} \in [k_u^-, k_u^+] \rightarrow \Delta u = \frac{2\pi}{BW_{(k_u)}} \quad (17)$$

4-3 스윙트 SAR 해상도 분석결과

그림 8은 앞서 설명한 RDA 기반 영상복원기법을 적용한 모의실험 결과로서 스윙트 설정각도 $\phi_{sq}=0 \sim 45^\circ$ 범위 내 스윙트 SAR 복원영상 결과예시이며, 그림 9는 스윙트 설정각도를 1° 간격으로 변화시켜 모의실험된 SAR 복원 영상으로부터 분석한 해상도와 식 (17)을 통해 예측한 해상도 분석결과를 비교한 것이다.

복원영상 내 목표물 분산전력패턴으로부터 측정된 해상도 분석결과(그림 9. ‘·’)는 식 (1)을 기반으로 최적화되기 전 예측결과(그림 9. ‘×’)와 최적화된 식 (12)을 이용한 예측결과(그림 9. ‘—’)를 비교해 최적화된 예측결과에

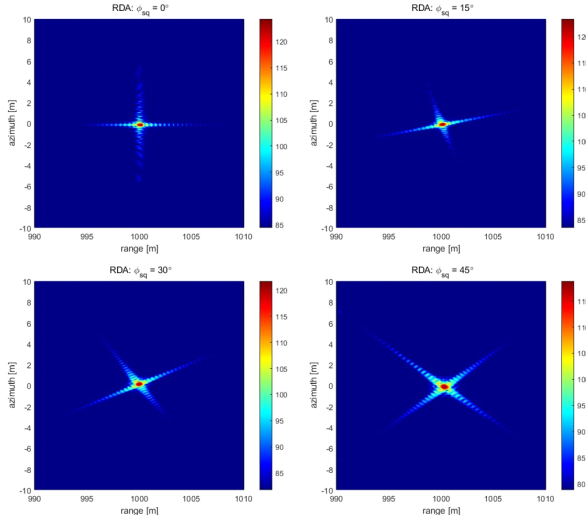


그림 8. 스퀀트 SAR 영상복원 결과예시: ($\phi_{sq}=0^\circ\sim 45^\circ$)
Fig. 8. Example of reconstructed squint SAR images:
($\phi_{sq}=0^\circ\sim 45^\circ$).

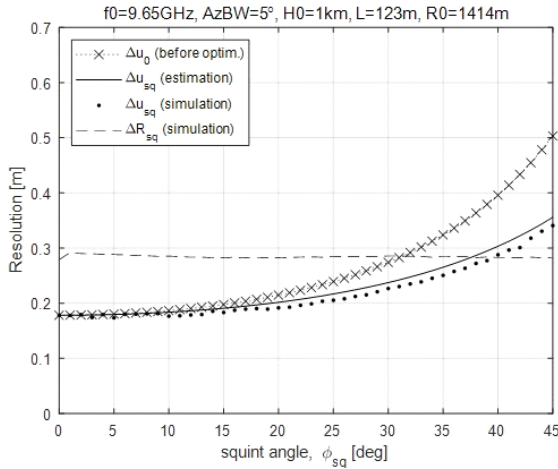


그림 9. 해상도 분석결과: ($\phi_{sq}=0^\circ\sim 45^\circ$)
Fig. 9. Analysis result of image resolution: ($\phi_{sq}=0^\circ\sim 45^\circ$).

부합되는 모의실험 결과를 확인할 수 있었다. 이때, 모의 실험 결과는 예측결과 대비 약 5 % 이하의 오차(설정범 위 $\phi_{sq}\leq 25^\circ$ 이하)를 포함한 결과를 나타내며, 오차성분은 모의실험 결과로부터 해상도 분석을 위해 적용된 수치적 분석기법(예, interpolation, curve-fitting, re-sampling 등)의 오차성분이 포함된 것이다. 거리방향 해상도 분석결과(그림 9. ‘-’)는 이론값 0.3 m 대비 모의실험 분석결과, 약 0.285

m로 약 5 %의 오차성분을 포함한 결과를 확인하였다.

V. 결 론

본 연구에서는 스퀀트 SAR 시스템에 최적화된 RCM 특성함수를 얻기 위한 기하학적 분석법과 FMCW-SAR 신호모델의 신호변환과정을 이용한 최적의 도플러영역 RCM 특성함수 풀이과정을 제시하였으며, 분석된 RCM 특성함수의 성능분석을 위해 RDA 기반 영상처리과정에 회전변환좌표를 적용한 전처리과정을 추가한 영상복원 과정과 복원영상의 해상도 분석결과에 관해 설명하였다. 스퀀트 SAR 시스템을 위해 최적화된 RCM 특성함수를 이용한 RCM 보정 및 해상도 분석/예측 정확도는 모의실험을 통해 검증하였으며, 약 5 % 오차성분을 포함한 분석 결과를 확인하였다.

최적화된 RCM 특성함수와 앞선 제시된 회전 변환된 좌표정보는 RDA 기반 영상처리 과정의 전·후처리 좌표 변환과정을 추가하여 쉽게 적용 가능하며, 이론적 스퀀트 SAR 해상도 분석/예측을 위한 이론적/기하학적 접근법이 될 것이다. 또한, 이를 이용한 스퀀트 SAR 시스템 운용을 위한 최적 운용/설정 조건을 예측하기 위한 기법연구로의 확장을 기대할 수 있다.

References

- [1] Z. Li, X. Zhao, "Modified hybrid digital correlation algorithm for highly squint SAR image formation," in *IET International Radar Conference 2013*, Xi'an, 2013, pp. 1-3.
- [2] M. Xing, Y. Wu, Y. D. Zhang, G. Sun, and Z. Bao, "Azimuth resampling processing for highly squinted synthetic aperture radar imaging with several modes," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 52, no. 7, pp. 4339-4352, Jul. 2014.
- [3] G. Wang, L. Zhang, and Q. Hu, "A novel range cell migration correction algorithm for highly squinted SAR imaging," in *2016 CIE International Conference on Radar(RADAR)*, Guangzhou, 2016, pp. 1-4.

- [4] Y. Q. Zhu, J. Chen, H. C. Zeng, H. Kuang, P. B. Wang, and W. Yang, et al., "Modified reconstruction method of squinted multi-channel SAR signal," in *2014 IEEE Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Quebec, 2014, pp. 632-635.
- [5] M. Soumekh, *Synthetic Aperture Radar Signal Processing with Matlab Algorithm*, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, pp. 186-244, 1999.
- [6] I. G. Cumming, F. H. Wong, *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Imple-*

mentation, Boston, MA, Artech House, pp. 32-63, 225-280, 2005.

- [7] W. G. Carrara, R. S. Goodman, and R. M. Majewski, *Spotlight Synthetic Aperture Radar Signal Processing Algorithm: Signal Processing Algorithms*, Boston, Artech House, pp. 157-200, 1995.
- [8] 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.

황 지 환 [서울대학교/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-2911-1583>



2001년 2월: 홍익대학교 전파공학과 (공학사)

2003년 2월: 홍익대학교 전파통신공학과 (공학석사)

2003년 4월~2006년 5월: LG전자 단말연구소 주임연구원

2007년 5월~2009년 3월: 한국 애절런트 테크놀로지스 기술지원부 과장

2009년 3월~2013년 2월: 홍익대학교 전자정보통신공학과 (공학박사)

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

김 덕 진 [서울대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0001-8147-7641>



1999년 2월: 서울대학교 지구시스템학과 (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 박사후연구원

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

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

한 승 훈 [한화시스템/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-6669-9318>



1999년 8월: 경희대학교 전자공학과(공학사)
2001년 8월: 경희대학교 전자공학과(공학석사)
2001년 6월~현재: 한화시스템(주) 수석연구원
[주 관심분야] Imaging RADAR

문 효 이 [한화시스템/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-4804-0880>



2014년 2월: 이화여자대학교 전자공학과(공학사)
2016년 2월: 한국과학기술원(KAIST) 전기 및 전자공학과 (공학석사)
2016년 7월~현재: 한화시스템(주) 선임연구원
[주 관심분야] Imaging RADAR

조 재 형 [한화시스템/전문연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-8555-7945>



2003년 2월: 광운대학교 전자공학과 (공학사)
2009년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
2017년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사)
2017년 6월: 한국과학기술연구원 박사후

연구원

2017년 6월~현재: 한화시스템(주) 전문연구원

[주 관심분야] RADAR System, Microwave Imaging