

# 스퀀트 SAR 비선형 신호변환특성 분석결과 기반 시스템 운용범위 예측기법

## Method for Estimating System Operating Range Based on the Nonlinearity of a Squint Synthetic Aperture Radar Signal Transformation

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 신호변환과정의 비선형적 특성을 분석하고, 이를 이용해 안정적 영상복원이 가능한 시스템 운용범위를 예측하는 방법을 제안한다. 스퀀트 SAR 비선형 신호변환특성은 수신신호 모델에 정지위상근사법을 적용해 도플러 영역 스펙트럼을 분석할 수 있고, 방위방향샘플과 도플러주파수 신호변환특성을 나타내는 관계식을 유도할 수 있다. 스퀀트 SAR 기하구조에 최적화된 관계식의 비선형 오차성분은 영상복원을 위한 신호처리과정에 그대로 포함되어 다양한 운용조건의 영상복원에 영향을 준다. 스퀀트 SAR 영상복원성능은 다양한 시스템 운용조건과 비선형 오차성분의 상관성을 통해 분석하고, 모의실험을 통해 분석/예측결과를 검증한다.

### Abstract

In this paper, we propose a method for analyzing the nonlinear characteristics of a squint synthetic aperture radar(SAR) signal conversion process and estimate the system operating range suitable for stable SAR image reconstruction using the proposed method. The Doppler spectrum can be analyzed by applying the principle of stationary phase to the squint SAR signal model. Consequently, the relationship between the azimuth samples and the Doppler frequency can be derived. The nonlinear error of this relationship formula optimized for the squint SAR geometry is included in the signal processing, and it affects the squint SAR image reconstruction under various operating conditions. The performance of the reconstructed SAR images is analyzed using the correlation between the various operating conditions and nonlinear errors, and the results are validated via simulation.

Key words: Squint SAR, Non-Linear Error, POSP, Azimuth-Doppler Relation Formula

### I. 서 론

스퀀트 SAR(squint synthetic aperture radar) 시스템은 목

표물 영상합성을 위해 기존 측면배열(broadside) SAR 시스템에 특정 범위의 스퀀트 각도를 추가하여 다양한 조건의 운용이 가능하지만 높은 스퀀트 각도 범위에서 안

「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 May 25, 2020 ; Revised June 19, 2020 ; Accepted July 21, 2020. (ID No. 20200525-044)

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

정적인 영상복원이 어려운 측면이 있어 이를 최적화하기 위한 여러 연구가 진행되고 있다<sup>[1]~[3]</sup>.

스퀀트 각도 적용은 기존 측면배열 SAR 시스템의 3차원 기하구조에 변형을 가하게 되며, 도플러 중심(Doppler centroid) 이동과 대역폭 감소 등의 수신신호 특성변화를 초래한다. 이와 같은 특성변화는 스퀀트 SAR 시스템 운용과 영상처리를 위한 여러 제약조건이 된다.

본 연구에서는 스퀀트 SAR 영상복원을 위한 다양한 시스템 운용조건을 분석하여, 안정된 영상복원이 가능한 시스템 운용범위를 예측하고자 한다. 이를 위해서 스퀀트 SAR 기하구조로부터 유도한 RCM(range cell migration) 궤적 특성함수와 FMCW(frequency modulated continuous wave)-SAR 신호모델을 적용하였으며, 정지위상근사법(POSP: principle of stationary phase)을 적용한 신호변환 관계식으로부터 비선형 오차특성을 분석하였다<sup>[4]~[7]</sup>.

신호변환 관계식의 비선형 오차특성과 복원영상 성능 분석은 RDA(range Doppler algorithm) 기반 모의실험을 통해 영상복원성능을 분석·검증하였다.

## II. 스퀀트 SAR 신호모델

안정적인 SAR 영상복원을 위한 스퀀트 각도설정 범위를 예측하기 위해서 그림 1과 같은 기하구조로부터 스퀀트 SAR 시스템의 도플러 신호변환특성을 분석한다. 그림 1은 송수신 안테나의 반전력빔폭( $\phi_{BW}$ )을 기준으로 한 합성개구면 길이( $L$ ), 비행고도( $H_0$ ), 입사각( $\theta_i$ ), 중심거리( $R_0$ ,  $R_c$ ) 그리고 스퀀트 설정각도( $\phi_{sq}$ )를 나타낸다.

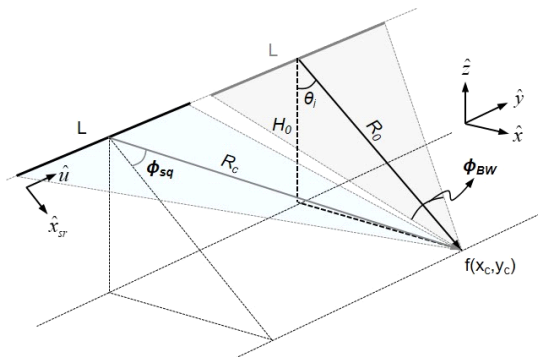


그림 1. 스퀀트 SAR 시스템 기하구조  
Fig. 1. Geometry of squint SAR system.

### 2-1 FMCW 신호기반 SAR 수신신호모델

FMCW 신호기반 스퀀트 SAR 수신신호모델은 식 (1)과 같은 기준신호로부터 목표물 지연시간( $\tau_0(u)$ )을 적용해 수신신호 식(2)을 나타낼 수 있다. 또한, ‘delayed de-chirp’ 신호처리를 위한 지연시간( $d$ )을 포함한 지연된 기준신호는 식(3)과 같이 나타낼 수 있다<sup>[5],[6]</sup>. (여기서,  $K_r$ 은 변조율,  $f_0$ 는 중심주파수이다.)

$$s_0(t) = \exp\left\{j2\pi\left(f_0 t + \frac{K_r}{2} t^2\right)\right\} \quad (1)$$

$$s_r(t, u) = \exp\left\{j2\pi\left(f_0(t - \tau_0(u)) + \frac{K_r}{2}(t - \tau_0(u))^2\right)\right\} \quad (2)$$

$$s_d(t) = \exp\left\{j2\pi\left(f_0(t - d) + \frac{K_r}{2}(t - d)^2\right)\right\} \quad (3)$$

식 (2)와 식 (3)을 이용한 주파수 하향변환(frequency down conversion)된 수신신호는 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다. 이때, ‘delayed de-chirp’ 신호처리가 적용된 목표물 지연시간( $\tau(u)$ )은 식 (5)와 같이 나타낼 수 있으며, 지연시간( $d$ ) 적용으로 추가된 잔여위상성분은 식 (4)의 두 번째 위상함수와 같이 정리된다. 안테나와 목표물 간 거리방정식( $R_0(u)$ )은 ‘zero-squint’ 기준신호를 예시로 한 것이다<sup>[7]</sup>.

$$\begin{aligned} s_{IF,r}(t, u) &= s_r^*(t, u) \cdot s_d(t) \\ &= \exp\left\{j2\pi\left(f_0\tau(u) + K_r t\tau(u) - \frac{K_r}{2}\tau^2(u)\right)\right\} \cdot \\ &\quad \exp\left\{-j2\pi\left(K_r\tau_0(u)d - K_r d^2\right)\right\} \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \text{여기서, } \tau(u) &= \tau_0(u) - d, \\ \tau_0(u) &= \frac{2}{c} R_0(u) = \frac{2}{c} \sqrt{R_0^2 + (y_c - u)^2} \end{aligned} \quad (5)$$

식 (4)는 비트주파수(beat frequency) 성분을 포함한 시간영역 수신신호 모델로써 다음 장에서 설명될 스퀀트 SAR 시스템에 최적화된 거리방정식을 적용해 도플러 신호변환과정을 수행할 수 있다.

### 2-2 스퀀트 SAR 거리방정식

스퀀트 SAR 시스템에 최적화된 거리방정식은 그림 2의 좌표변환과정을 통해서 유도될 수 있으며, 변환과정은 다음과 같다. ‘(1) zero-squint’ 영역 내 RCM(range cell

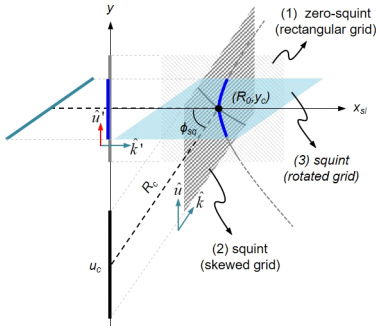


그림 2. 스퀀트 SAR 거리방정식: 좌표변환과정  
Fig. 2. Range equation for squint SAR: coordinate conversion process.

migration) 기준좌표와 ‘(2) squint (skewed grid)’의 비틀린 수신신호 좌표정보 내 RCM 궤적을 나타낸다. 그리고 ‘(3) squint (rotated grid)’는 ‘(2) squint (skewed grid)’ 신호를 목표물 중심( $R_0, Y_c$ )을 기준으로 회전시킨 좌표정보와 RCM 궤적을 나타낸다<sup>[4]</sup>(여기서, 그림 2는 경사거리면을 기준으로 표현된 2차원 기하구조이다).

‘(3) squint (rotated grid)’의 회전 변환된 좌표정보( $R', u'$ )와 RCM 궤적(굵은 곡선)은 기준 RCM 궤적(점선)과는 스퀀트 설정각도에 의해 미세한 차이를 갖는 궤적 특성을 갖는다. 식 (6)~식 (8)은 위 좌표변환과정을 거친 회전 변환된 좌표정보 내 최적화된 스퀀트 SAR 거리방정식을 나타낸다<sup>[4]</sup>.

$$R'(u') = \sqrt{R_0^2 + A^2(u')} + R_0 \left( 1 - \frac{1}{\cos \phi_{sq}} \right) + u' \tan \phi_{sq} \quad (6)$$

$$\text{여기서, } A(u') = \left( y_c - \frac{u'}{\cos \phi_{sq}} + R_0 \tan \phi_{sq} \right) \quad (7)$$

$$u' = R_0 \sin \phi_{sq} + u \cdot \cos \phi_{sq} \quad (8)$$

위의 최적화된 스퀀트 SAR 거리방정식에  $\phi_{sq} = 0^\circ$ 를 대입할 경우 ‘zero-squint’의 기준 거리방정식 식 (5)와 같은 식이 됨을 쉽게 확인할 수 있다.

### 2-3 도플러( $k_u$ ) 영역 신호변환

SAR 영상합성을 위해 RCM 보정기법과 정합필터(matched filter) 등의 신호처리기법은 도플러( $k_u$ ) 신호영역

에서 적용되며, 이를 위해 수신신호모델 식 (4)에 푸리에 변환(Fourier transform)을 통한 신호변환과정을 수행한다.

도플러 신호영역으로의 신호변환은 식 (4)에 최적화된 스퀀트 RCM 특성함수 식 (6)~식 (8)을 대입하고, 푸리에 변환과정에 정지위상근사기법(POSP, principle of stationary phase)을 적용해 수행된다.

식 (9)은 식 (4)에 식 (6)~식 (8)을 대입한 푸리에변환 적분식을 나타내며, 적분식에 정지위상근사기법을 적용해 풀이된다. 이 과정에서 방위방향샘플( $u'$ )과 도플러주파수( $k_u'$ )의 신호변환 관계식이 유도된다.

$$s(t, k_u') = \int_{-\infty}^{\infty} [\exp \{j\Phi\}] du'$$

여기서,

$$\Phi = \left\{ 2\pi \left( f_0 \tau'(u') + K_r t \tau'(u') - \frac{K_r}{2} \tau'^2(u') \right) - k_u' u' \right\},$$

$$\tau'(u') = \frac{2}{c} R'(u') \quad (9)$$

정지위상근사기법은 식 (9)의 위상함수를 미분한 값이 ‘0’이 되는 조건식 식 (10)의 풀이로부터 방위방향샘플( $u'$ )과 도플러주파수( $k_u'$ )의 관계식 식 (11)이 유도된다(식 (9) 위상함수의 2차항( $\tau'^2(u')$ )은 RVP-residual video phase 필터 과정을 거쳐 제거될 수 있다<sup>[8]</sup>).

$$\frac{d\Phi}{du'} = \frac{d}{du'} \left\{ -\frac{4\pi}{c} (f_0 + K_r t) R'(u') - k_u' u' \right\} = 0 \quad (10)$$

회전 변환된 좌표정보와 거리방정식을 적용한 스퀀트 SAR 시스템에 최적화된 방위방향샘플( $u'$ )과 도플러주파수( $k_u'$ )의 관계식은 식 (11)과 같이 정리된다.

$$k_u' = -\frac{4\pi}{c} (f_0 + f) \left\{ \frac{A(u')}{\cos \phi_{sq} \sqrt{R_0^2 + A^2(u')}} + \tan \phi_{sq} \right\} \quad (11)$$

식 (11)의 관계식을 식 (9)의 위상함수에 대입해 시간-도플러( $t, k_u'$ ) 영역 신호모델을 유도할 수 있으며, 도플러영역 RCM 특성함수( $R'(k_u')$ )도 식 (12), 식 (13)과 같이 정리된다.

$$R'(k_u') = \sqrt{R_0^2 + A^2(k_u')} + R_0 \left( 1 - \frac{1}{\cos \phi_{sq}} \right) + u' \tan \phi_{sq} + \{ y_c + R_0 \tan \phi_{sq} - A(k_u') \} \cdot \sin \phi_{sq} \quad (12)$$

여기서,

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

$$B = \left\{ k_u' + \frac{4\pi}{c} (f_0 + f) \tan\phi_{sq} \right\} \quad (13)$$

식 (14)는 ‘zero-squint’ 경우의 신호변환 관계식으로 기준신호 식 (4), 식 (5)를 이용해 식 (9)~식 (11)의 동일한 풀이 과정을 거쳐 얻어질 수 있으며, 기존 SAR 영상합성 과정에 적용된 방위방향샘플( $u$ )과 도플러주파수( $k_u$ ) 신호변환 관계식이 된다<sup>[9]</sup>(여기서,  $k$ 는 전파상수,  $\phi$ 는 안테나와 목표물 간 관측각도이다)..

$$k_u = -\frac{4\pi(f_0 + K_r t)(y_c - u)}{c\sqrt{R_0^2 + (y_c - u)^2}} = -2k \cdot \sin\phi \quad (14)$$

### III. 스퀀트 SAR 비선형 오차 분석지도

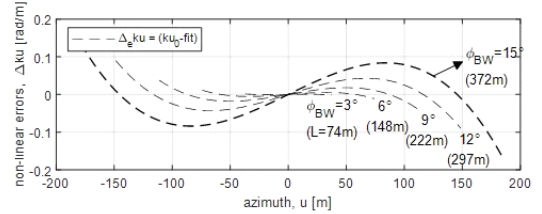
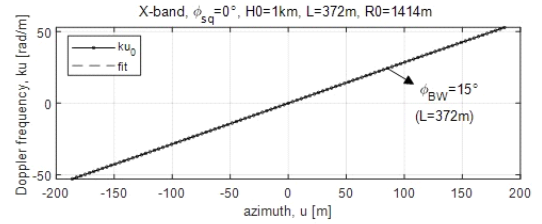
본 장에서는 스퀀트 SAR 신호모델 분석연구를 통해 얻은 신호변환 관계식의 비선형 오차특성을 분석하고, 이를 이용해 스퀀트 SAR 영상복원 성능과 안정된 시스템 운용범위를 직관적으로 분석·예측하기 위한 분석지도 구성에 대해 설명한다.

#### 3-1 방위샘플-도플러( $u$ - $k_u$ ) 신호변환 특성분석

스퀀트 SAR 시스템 신호변환 관계식 식 (11)의 비선형 특성은 합성개구면 길이( $L$ ) 변화로부터 분석될 수 있다. 그러나, 합성개구면 유효길이(stripmap 모드 기준)는 안테나 반전력빔폭에 의존적인 특성이 있어 물리적 길이 변화는 식 (15)와 같이 안테나 반전력빔폭( $\phi_{BW}$ )에 비례고도( $H_0$ ), 입사각( $\theta$ ) 정보를 추가하여 정의할 수 있다. 다시 말해, 안테나와 목표물 간 관측각도( $\phi$ ) 변화와 도플러주파수( $k_u$ ) 대역폭 변화를 고려할 때, 합성개구면 길이 변화의 정성적 특성은 안테나 반전력빔폭( $\phi_{BW}$ )에 의해 효과적으로 나타낼 수 있다.

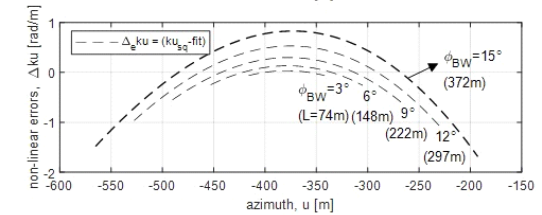
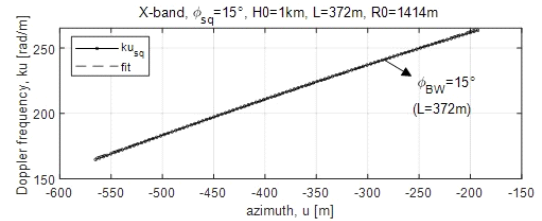
$$L = \frac{2H_0}{\cos\theta_i} \cdot \tan\left(\frac{\phi_{BW}}{2}\right) \quad (15)$$

그림 3은 비행고도( $H_0$ ) 1 km, 스퀀트 각도( $\phi_{sq}$ ) 0°와 15°



(a) ‘zero-squint’ 관계식, 식 (14)

(a) ‘zero-squint’ equation, eq (14)



(b) ‘squint’ 관계식, 식 (11)

(b) ‘squint’ equation, eq (11)

그림 3. 방위샘플-도플러( $u$ - $k_u$ ) 신호변환 비선형 오차특성  
Fig. 3. Non-linear errors of signal conversion azimuth samples to Doppler frequency.

의 설정조건에서 방위방향샘플-도플러주파수( $u$ - $k_u$ ) 신호변환특성을 분석한 것이다. 그림 3(a)는 식 (14)를 이용한 기준(‘zero-squint’ 경우) 신호변환특성을 나타낸 것으로 안테나 반전력빔폭( $\phi_{BW}$ ) 15°인 경우( $L=372$  m)를 예시로 한 신호변환 결과와 비선형 오차 분석결과를 나타낸 것이며, 그림 3(b)는 스퀀트 SAR 시스템에 최적화된 신호변환 관계식 식 (11)을 이용한 분석결과를 나타낸 것이다(그림 3(a)와 3(b) 아래 도표에는 반전력빔폭( $\phi_{BW}$ ) 3°~12° 조건의 오차 분석결과를 포함한다.).

그림 3의 비선형 오차 분석결과를 합성개구면이 길어질수록 비선형 오차성분이 증가하며, 스퀀트 SAR 시스템('squint' 경우)의 신호변환과정 중 오차성분이 훨씬 크게 나타남을 알 수 있다.

### 3-2 도플러주파수 대역폭 및 해상도 분석

식 (11)과 식 (14)의 신호변환 관계식으로부터 스퀀트 설정 각도 변화에 따른 도플러주파수 변화량으로부터 대역폭( $BW_{ku}$ )과 해상도( $\Delta u = 2 \pi / BW_{ku}$ ) 변화를 분석할 수 있다<sup>[9]</sup>. 그림 4는 특정 조건의 안테나 반전력빔폭(예,  $\phi_{BW}=5^\circ$ ,  $L \approx 123$  m)과 비행고도(예,  $H_0=1$  km) 조건에서 스퀀트 설정각도 변화에 따른 이론적 성능분석결과를 나타낸다. 이때, 성능검증을 위해 스퀀트 SAR 시스템에 최적화된 RCM 특성함수 식 (12), 식 (13)을 적용한 RDA 기반 영상복원 모의실험을 수행하였으며, 이를 통해 분석된 해상도(그림 4 '○' 참조) 분석결과를 식 (11)의 이론적 성능 분석결과에 부합됨을 확인할 수 있었다.

### 3-3 비선형 오차 분석지도(Non-Linear Error Map)

본 연구에서는 스퀀트 SAR 시스템 성능분석 및 예측을 위한 비선형 오차 분석지도를 제안한다. 신호변환과정

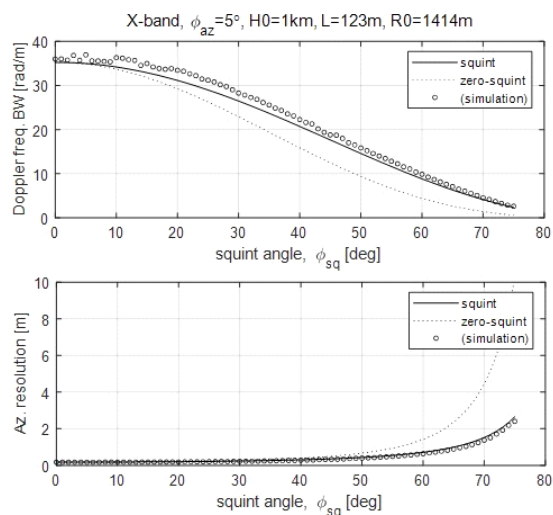


그림 4. 도플러 주파수 대역폭과 방위방향 해상도 분석결과  
Fig. 4. Analysis result of Doppler frequency bandwidth and azimuth resolution.

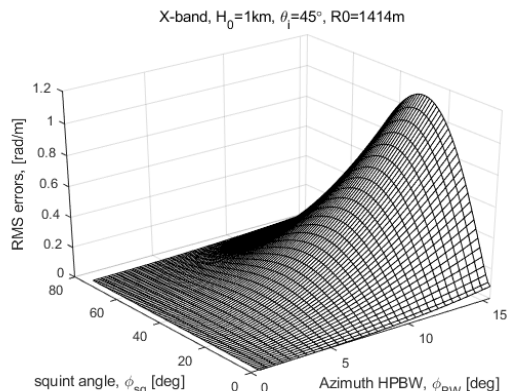


그림 5. 비선형 오차 분석지도(RMS 에러)  
Fig. 5. Non-linear error map(RMS error).

에서 발생하는 비선형적 오차성분은 SAR 영상복원을 위한 신호처리과정에 그대로 포함되어 복원영상 품질을 열화시키는 요인으로 작용 될 수 있다. 따라서, 스퀀트 설정각도( $\phi_{sq}$ )와 합성개구면 유효길이( $L$ ) 변화를 입력변수로 도플러주파수의 비선형 특성을 도식화할 수 있으며, 식 (15)를 참고해 도플러주파수 변화를 더욱 효과적으로 나타내기 위해 안테나 고유특성인 반전력빔폭으로 합성개구면 유효길이의 정성적 특성변화를 대체해 비선형 오차 분석지도를 구성할 수 있다.

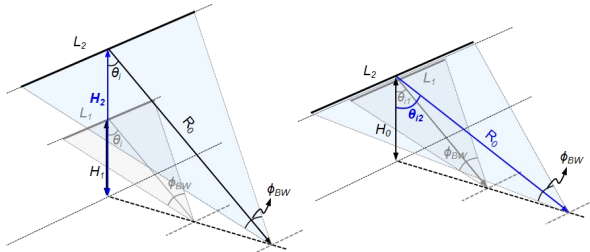
그림 5는 신호변환과정의 비선형 오차특성을 분석하기 위해 작성된 분석지도 예시로서 비선형 오차의 통계적 특성(예, RMS error)을 스퀀트 설정각도( $\phi_{sq}$ )와 송수신 안테나의 반전력빔폭( $\phi_{BW}$ )으로 나타낸 시스템 운용조건으로 도식화한 것이다. 이때, 운용주파수(X-band), 비행고도( $H_0=1$  km), 입사각( $\theta_i=45^\circ$ )을 운용조건으로 한다.

### 3-4 비선형 오차 변화특성

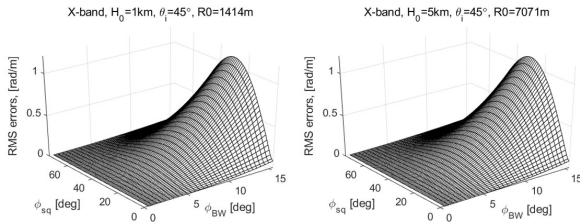
스퀀트 SAR 영상복원성능 예측을 위해 스퀀트 설정각도와 송수신 안테나의 반전력빔폭을 기본 시스템 운용조건으로 분석된 비선형 오차특성은 신호변환 관계식 식 (11)과 비행고도, 입사각, 반전력빔폭으로 정의된 합성개구면 유효길이는 식 (15)에 의해 오차분석지도의 고유한 속성을 확인할 수 있다.

그림 6은 SAR 시스템의 운용조건 변화에 따른 분석지도의 비선형 오차특성 변화를 비교한 결과이다. 예를 들

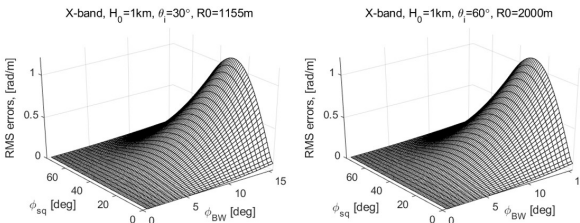




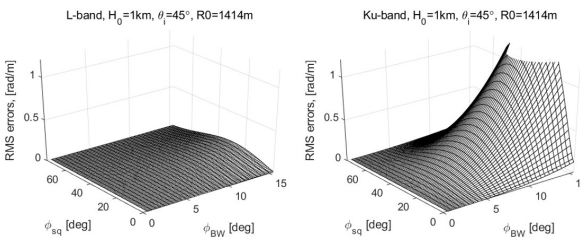
(a) SAR 기하구조 변화(비행고도, 전파입사각)  
(a) Change of SAR geometry(flight altitude, incident angle)



(b) 비행고도 변화( $H_0=1$  km, 5 km)  
(b) Variation of flight altitude( $H_0=1$  km, 5 km)



(c) 전파입사각 변화( $\theta_i=30^\circ, 60^\circ$ )  
(c) Variation of incident angle( $\theta_i=30^\circ, 60^\circ$ )



(d) 운용주파수 변화( $f_0=1.25$  GHz, 15 GHz)  
(d) Variation of operating frequency( $f_0=1.25$  GHz, 15 GHz)

그림 6. RDA 기반 스퀀트 SAR 영상복원 과정  
Fig. 6. RDA-based squint SAR image reconstruction.

어 비행고도, 전파입사각, 운용주파수 등의 시스템 운용 조건 변경이 미치는 영향을 비교한 것이다. 그림 6(a)는 비행고도와 입사각 변경에 의한 SAR 기하구조 변화를 도

식화한 것이다. 비행고도가 변경될 경우 고정된 안테나 반전력빔폭( $\phi_{BW}$ )에 의해 합성개구면 유효길이( $L$ )는 증가하며, 목표물 중심거리( $R_0$ ) 또한 길어진다 (식(15) 참조). 이는 안테나와 목표물 간 관측각도 변화에 아무런 영향을 주지 못하므로 도플러주파수와 비선형 오차에도 어떤 변화도 발생하지 않는다. 입사각 운용조건이 변경될 경우도 목표물 중심거리 증가로 합성개구면의 유효길이가 비례적으로 증가하고, 목표물 관측각도에는 아무런 변화가 발생하지 않는다. 따라서 도플러주파수와 비선형 오차에도 아무런 영향을 미치지 못한다. 각각의 비교결과는 그림 6(b), 그림 6(c)를 통해 확인할 수 있다.

이에 반해, 운용주파수 변경은 신호변환 관계식 식 (11)의 크기성분( $-4 \pi c \cdot (f_0 + f)$ )에 직접적인 변화가 발생하여 그림 6(d)와 같이 오차성분 크기 변화가 발생한다. 비교예시는 L/Ku-밴드 운용주파수를 적용한 결과이며, 동일한 길이를 갖는 합성개구면에서 운용주파수가 높아질수록 파장 대비 합성개구면 유효길이가 길어지는 효과가 있어 신호변환과정의 비선형 오차특성이 커지는 결과를 쉽게 이해할 수 있다.

따라서, 스퀀트 설정각도와 안테나 반전력빔폭으로 구성된 오차분석지도는 비행고도와 입사각 등의 시스템 기하구조 변화에 독립적이고 특정 운용주파수에 의존적인 고유한 응답특성을 갖게 되며, 이와 같은 특성은 안정적인 스퀀트 SAR 영상획득과 시스템 운용범위 예측에 활용될 수 있다.

#### IV. 스퀀트 SAR 시스템 운용범위 예측

스퀀트 설정각도와 안테나 반전력빔폭을 이용한 오차분석지도를 특정 운용조건(예, 합성개구면 유효길이, 비행고도, 입사각, 운용주파수 등)의 스퀀트 SAR 시스템 최적 운용범위 예측에 활용하기 위해서는 비선형 오차성분이 영상복원성능에 미치는 영향과 허용범위 설정을 위한 임계치 분석이 필요하다. 비선형 오차성분의 임계치 분석과 스퀀트 SAR 운용범위 확인을 위해 표 1과 같은 시스템 제원을 이용한 모의실험을 수행하였다.

##### 4-1 비선형 오차 임계치 분석

그림 7은 비선형 오차성분과 스퀀트 SAR 영상복원성

표 1. 스퀀트 FMCW-SAR 시스템 제원

Table 1. Specification of squint FMCW-SAR system.

Items	Spec.	Note
Frequency	X-band	-
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	-
Squint angle( $\phi_{sq}$ )	$0^\circ \sim 75^\circ$	
Beamwidth( $\phi_{BW}$ )	$1^\circ \sim 15^\circ$	$\theta_{BW}=50^\circ$
SA length( $L$ )	25~372 m	-
Incident angle( $\theta_{inc}$ )	$45^\circ$	-
Altitude( $H_0$ )	1 km	-

능을 분석하기 위한 예시로 X-밴드 운용주파수 조건에서의 비선형 오차 분석지도를 나타낸다. 그림 8(1)~그림 8(6)은 영상복원 성능검증을 위한 시험조건을 나타낸 것으로 오차성분이 최대가 되는 스퀀트 각도(예,  $\phi_{sq} \approx 30^\circ$ , 수평방향)와 대부분의 스퀀트 설정각도 범위에서 낮은 오차성분을 갖는 반전력빔폭(예,  $\phi_{BW} \approx 5^\circ$ , 수직방향) 조건에서 샘플링된 것이다.

그림 8은 그림 7에서 샘플링된 시험조건 그림 8(1)~그림 8(6)에서 RDA 기반 영상복원 모의실험 결과를 나타낸 것이다<sup>[10]</sup>. 비선형 오차특성이 최대가 되는 수평방향 시험조건 그림 8(1)~그림 8(3)의 영상복원과 분산전력패턴

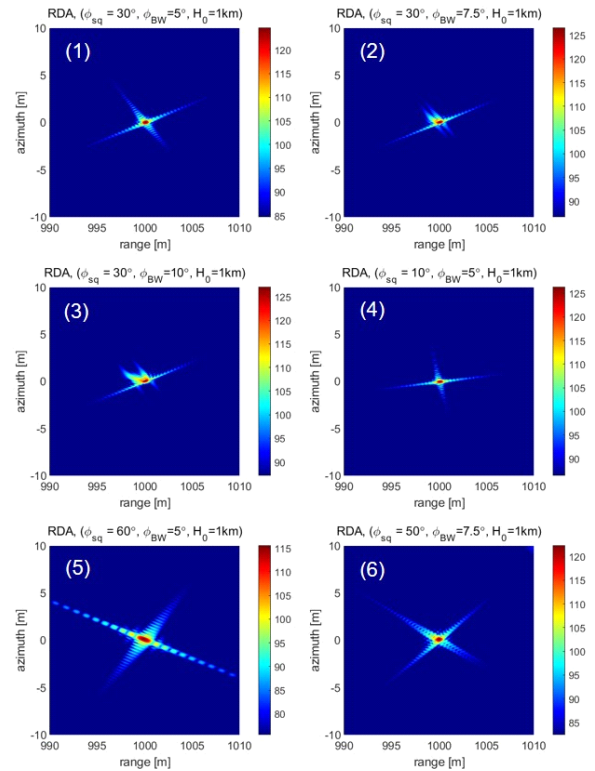


그림 8. 비선형 오차 분석지도 임계치 분석(II): (복원영상)  
Fig. 8. Validation of threshold of nonlinear error map(II): (focused images).

분석을 통해 실증적 오차 허용범위 임계치 0.15를 설정할 수 있으며, 수직방향 그림 8(1), 그림 8(4), 그림 8(5) 시험조건을 통해 임계치 이하 범위에서 영상복원 성능검증을 수행하였다. 그리고 임계치 근처 시험조건 그림 8(6)의 복원영상을 예시로 나타낸 것이다.

#### 4.2 방위방향 해상도 분석지도

신호변환과정의 비선형 오차특성을 이용한 오차분석지도는 방위방향 해상도 분석지도를 추가해 안정적인 시스템 운용범위 예측뿐만 아니라, 시스템 요구성능에 부합되는 해상도를 갖는 운용조건을 동시에 예측할 수 있다.

그림 9는 오차분석지도의 시스템 운용조건 스퀀트 설정각도( $\phi_{sq}$ )와 안테나 반전력빔폭( $\phi_{BW}$ )을 이용한 방위방향 해상도 분석지도를 나타낸 것이다. 스퀀트 SAR 시스템의 방위방향 해상도는 스퀀트 설정각도가 커질수록 합

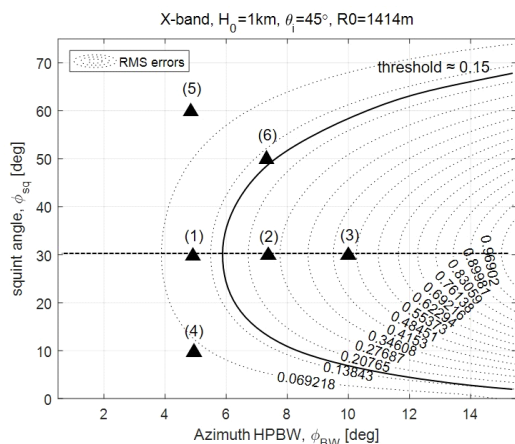


그림 7. 비선형 오차 분석지도 임계치 분석(I)  
Fig. 7. Validation of threshold of nonlinear error map(I).

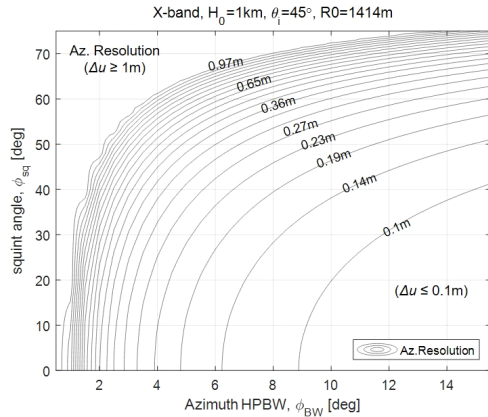


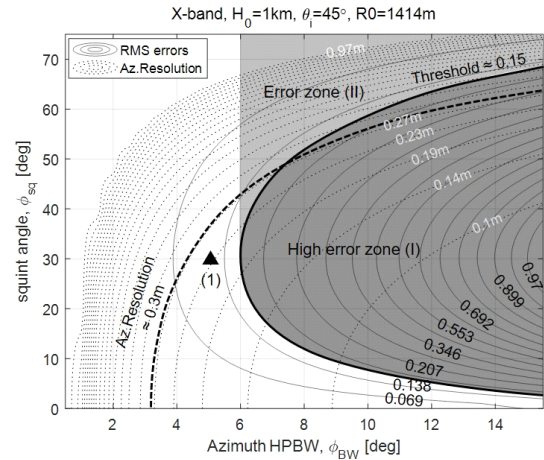
그림 9. 방위방향 해상도 분석지도  
Fig. 9. Azimuth resolution map.

성개구면 유효길이가 짧아져 도플러주파수 대역폭이 줄어들고, 그로 인해 해상도가 나빠지는 특성을 갖는다. 반면에 안테나 반전력빔폭이 커질수록 합성개구면 유효길이가 길어져 해상도가 좋아지는 특성을 나타낸다. 따라서, 그림 9와 같이 스퀀트 설정각도가 크고 반전력빔폭이 좁은 왼쪽 윗부분 영역에서 1 m 이상의 해상도 특성을 나타내며, 스퀀트 설정각도가 작고 반전력빔폭이 넓은 오른쪽 아래 영역으로 이동할수록 0.1 m 이하의 고해상도 특성을 갖는다.

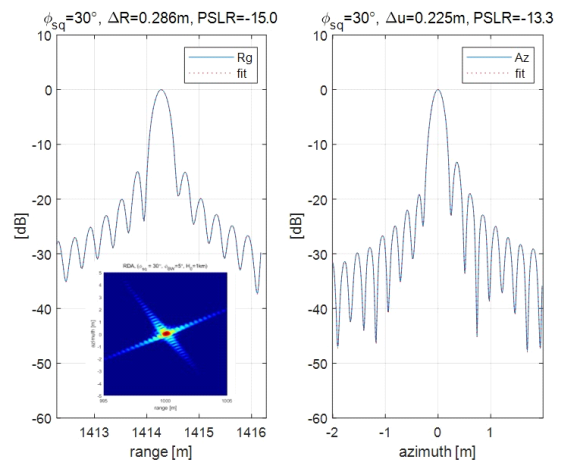
#### 4.3 스퀀트 SAR 운용범위 및 해상도 예측

그림 10은 스퀀트 SAR 시스템의 설정조건 변화에 따른 비선형 오차성분과 해상도 특성을 동일한 시스템 운용조건에서 나타낸 것이다. 그림 10(a)는 오차 분석지도와 해상도 분석지도를 하나의 분석지도로 나타냄으로써 비선형 오차성분의 허용범위와 목표 해상도 설정으로 스퀀트 SAR 시스템 운용범위를 쉽게 분석/예측할 수 있다.

비선형 오차 임계치를 이용한 ‘Error zone (I),(II)’(분석지도 내 회색 영역) 설정은 비선형 오차와 스퀀트 SAR 원시신호(raw data)의 비틀림(skewness) 특성에 의해 누적된 오차성분으로 영상복원이 불안정하게 이루어지는 영역을 나타내며, 이를 제외한 영역에서 해상도 목표성능(예,  $\Delta u=0.3$  m, 그림 10(a) ‘--’ 참조)을 적용한 운용조건 추가설정으로 스퀀트 SAR 시스템 운용범위를 특정 범위로 구체화할 수 있다.



(a) 운용범위 및 방위방향 해상도  
(a) Evaluation of operating range & az. resolution



(b) 운용조건(1)의 IRF 패턴(경사거리 기준)  
(b) IRF patterns of test-point no. (1)(slant range)

그림 10. 스퀀트 SAR 시스템 운용범위 분석지도  
Fig. 10. Operating range map of squint SAR system.

그림 10(b)는 스퀀트 설정각도( $\phi_{sq}=30^\circ$ )와 반전력빔폭( $\phi_{BW}=5^\circ$ )으로 특정된 시험조건(1)을 예시로 한 복원영상 분석결과를 나타낸다. 시험조건(1)의 분석지도 예측성능과 모의실험 측정성능은 각각 방위방향 해상도( $\Delta u$ ) 0.23 m와 0.225 m이며, 이때, 거리해상도( $\Delta R$ ) 0.286 m (이론값 0.3 m)와 PSLR(peak-side lobe ratio)  $-14.9$  dB/ $-13.3$  dB의 분석결과를 확인할 수 있었다(단, 해상도 분석결과는 경사거리를 기준으로 측정됨.) (표 2).



표 2. 시험조건별 모의실험 분석결과

Table 2. Simulation result by test conditions.

No.	Test setup ( $\varphi_{BW}$ , $\varphi_{sq}$ )		Results ( $\Delta R$ , $\Delta u$ , $PSLR-Rg$ , $Az$ )		
(1)	5°	30°	0.286 m (*0.3 m)	0.225 m (*0.23 m)	-14.9 dB, -13.3 dB
(2)	7.5°	30°	0.293 m (*0.3 m)	0.169 m (*0.158 m)	-15.9 dB, -10.5 dB
(3)	10°	30°	0.299 m (*0.3 m)	0.156 m (*0.118 m)	-15.8 dB, -10.5 dB
(4)	5°	10°	0.279 m (*0.3 m)	0.178 m (*0.183 m)	-15.7 dB, -16.9 dB
(5)	5°	60°	0.279 m (*0.3 m)	0.638 m (*0.711 m)	-14.7 dB, -13.3 dB
(6)	7.5°	50°	0.288 m (*0.3 m)	0.271 m (*0.286 m)	-15.9 dB, -11.5 dB

(\*theoretical values or estimated values)

## V. 결 론

본 연구에서는 스퀀트 SAR 시스템에 최적화된 RCM 특성함수를 적용한 방위방향샘플( $u$ )과 도플러주파수( $k_u$ ) 신호변환과정의 비선형 오차특성을 분석하고, 이를 스퀀트 SAR 시스템 최적 운용범위를 분석/예측하기 위한 분석지도 구성에 적용하였다. 또한, 효율적인 분석지도 구성을 위해 스퀀트 설정각도와 더불어 합성개구면 유효길이 변화를 절대적인 길이 변화가 아닌 정성적 길이 변화를 나타내기 위해 안테나 반전력범폭으로 대체함으로써 도플러 영역 신호특성 변화를 3차원 SAR 기하구조를 통해 잘 반영될 수 있도록 하였다.

오차분석지도와 해상도 분석지도를 이용한 스퀀트 SAR 시스템 운용범위 예측기법은 목표성능의 해상도를 갖는 안정된 복원영상 획득을 위한 플랫폼 운용조건을 쉽게 분석할 수 있으며, SAR 영상복원을 위한 다양한 요구사항을 앞서 제시한 분석지도 작성과정을 역산하여 최적의 스퀀트 SAR 시스템 운용조건을 찾을 수 있다.

따라서, 앞서 제시한 오차분석지도를 활용한 스퀀트 SAR 운용범위 분석/예측기법은 다양한 요구조건을 반영한 시스템 설계/운용을 위한 지침을 제공할 것으로 기대된다.

## References

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] Y. 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, QC, 2014.
- [4] J. H. Hwang, D. J. Kim, S. H. Han, J. H. Cho, and H. Moon, "Geometric analysis of optimized range cell migration trajectory for squint synthetic-aperture radar system," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 31, no. 5, pp. 446-455, May 2020.
- [5] 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.
- [6] J. J. M. de Wit, A. Meta, and P. Hoogeboom, "Modified range-Doppler processing for FM-CW synthetic aperture radar," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 3, no. 1, pp. 83-87, Jan. 2006.
- [7] 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.
- [8] W. G. Carrara, R. S. Goodman, and R. M. Majewski, *Spotlight Synthetic Aperture Radar: Signal Processing Algorithm*, Boston, MA, Artech House, pp. 501-506, 1995.

[9] M. Soumekh, *Synthetic Aperture Radar Signal Processing with Matlab Algorithm*, New York, NY, John Wiley & Sons, pp. 186-244, 1999.

[10] I. G. Cumming, F. H. C. Wong, *Digital Processing of*

*Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation*, Boston, MA, Artech House, pp. 225-280, 2005.

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: 한국에어릴랜드 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

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 박사후연구원

2017년 6월~현재: 한화시스템(주) 전문연구원

[주 관심분야] RADAR System, Microwave Imaging

문 효 이 [한화시스템/선임연구원]

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



2014년 2월: 이화여자대학교 전자공학과 (공학사)

2016년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)

2016년 7월~현재: 한화시스템(주) 선임연구원

[주 관심분야] Imaging RADAR