

Squint SAR 영상 내 목표물 분산전력패턴 분석기법

Analysis of a Target's Power-Spill Patterns Using Squint SAR Images

황지환 · 김덕진 · 이승철 · 한승훈* · 조재형* · 문효이*

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

요 약

본 논문에서는 FMCW(frequency modulated continuous wave) 신호기반 SAR 시스템의 스윙트 각도(squint angle) 설정에 따른 복원영상 내 목표물 분산전력패턴 변화를 예측하기 위한 분석기법에 대해 설명한다. SAR 복원영상 내 목표물 분산전력패턴은 지면에 투영된 전파진행방향과 합성개구면과 스윙트 각도가 이루는 방위방향에 따라 일정한 방향으로 변형된 특성을 갖게 되며, 이와 같은 특성변화를 3차원 SAR 기하구조 내에서 분석한다. 스윙트 설정각도에 따라 변형된 목표물 분산전력패턴은 FMCW 신호모델과 back-projection 알고리즘을 기반으로 한 모의실험을 통해 그 분석결과를 검증한다. 또한, 변형된 분산전력패턴의 예측결과를 SAR 기하구조와 스윙트 설정각도를 변수로 정리된다.

Abstract

This paper presents an analysis technique for estimating the properties of a target's power-spill patterns observed in reconstructed SAR images, which in turn depend on the setup squint angle of the FMCW signal-based SAR system. The target responses observed in the reconstructed SAR images were affected by the range-direction and azimuth-direction of a wave projected on the ground, and the obtained results were analyzed by applying three-dimensional squinted SAR geometry. Furthermore, the rotation patterns were verified through simulations based on the FMCW signal model and back-projection algorithm. This paper summarizes the obtained evaluation results as a function of SAR geometry and squint angle.

Key words: Squint FMCW-SAR, Rotated Power-Spill, Back-Projection Algorithm, Analysis Technique

I. 서 론

항공기 기반 SAR(synthetic aperture radar) 시스템은 비행자세와 안테나 지향각도 등의 여러 운용조건에 따라 최적화된 SAR 영상복원을 위한 다양한 신호처리기법이 연구되고 있다^{[1]~[4]}. 이를 위한 다양한 신호처리 기법 연구는 크게 항공기 비행경로와 비행자세에서 기인된 비선

형 특성의 오류를 보정하기 위한 기법(motion error compensation)^{[5]~[7]}과 특정 안테나 지향각도를 갖도록 설계/운용되는 squint-SAR 시스템의 원시자료로부터 최적화된 영상복원을 위한 신호처리 기법으로 구분될 수 있으며^[8], 각각의 원시자료에 포함된 오류와 왜곡특성을 그 속성에 맞게 보정하는 과정으로 요약할 수 있다.

이때, SAR 시스템의 최적화된 신호처리를 위해 레이

「이 연구는 한화시스템 산학협력과제 지원으로 연구되었음.」

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

*한화시스템 AESA 레이더 개발센터(AESA Radar R&D Center, Hanwha Systems)

· Manuscript received July 12, 2018 ; Revised August 7, 2018 ; Accepted August 28, 2018. (ID No. 20180712-073)

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

다 수신신호 특성과 SAR 시스템의 기하구조를 고려한 두 가지 측면의 접근이 일반적이며, 본 연구에서는 기존의 레이더 신호측면의 여러 영상복원 알고리즘^{[8],[9]}과 더불어 squint-SAR 시스템의 기하구조를 이용한 복원영상 내 목표물 응답특성의 이론적 분석을 시도하였다.

본 연구에서는 특정 안테나 지향각도를 갖도록 설계/운용되는 **squint-SAR** 시스템의 해상도 및 영상품질 저하 요인 중 하나인 목표물 분산전력패턴의 변형 정도를 이론적으로 분석/예측하기 위해 이상적인 비행경로를 갖는 **SAR** 시스템 기하구조 내 전파 진행경로와 유효 합성개구면의 회전성분을 분석하였으며, 분석결과를 근거로 안테나 지향각도 설정에 따른 목표물 분산전력패턴의 이론적 변형 정도를 예측하기 위한 거리/방위방향 회전성분의 관계식을 유도하였다.

그리고 이상적인 비행경로를 갖는 squint-SAR 시스템의 전파특성 검증을 위해서 FMCW(frequency modulated continuous wave)-SAR 신호모델을 기반으로 한 신호생성과 back-projection 알고리즘을 이용한 영상복원 과정을 포함한 모의실험을 수행하였다^[10]. 이때, 지면에 투영된 전파 진행특성의 왜곡 없는 영상복원을 위해 적용된 back-projection 알고리즘의 계산효율을 높이기 위해 최적화된 분할연산기법을 추가 적용하였다^[11].

본 논문의 구성은 Squint-SAR 시스템의 전파특성을 분석하기 위해 적용된 FMCW-SAR 신호모델과 이를 기반으로 SAR 시스템의 배경이론을 II장에서 설명하며, 특정 안테나 지향각도(squint angle) 설정에 따른 변화를 이차적인 SAR 시스템 기하구조 내에서 분석한 결과와 이를 검증한 모의실험 결과를 각각 III장과 IV장에서 설명한다.

II. FMCW-SAR 시스템

Squint-SAR 시스템의 전파특성을 이론적으로 분석하기 위해 FMCW-SAR 신호모델을 기반으로 한 성능분석을 시도하였다. SAR 원시신호 생성과 영상복원을 위해서 FMCW 신호모델과 관련 신호처리 기법에 대한 배경이론을 설명하며, 안테나 지향각도 설정에 따른 SAR 시스템 기하구조 변화에 대해 간단히 비교 설명한다(그림 1).

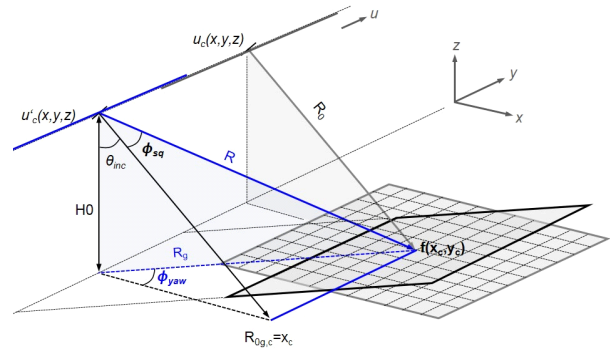


그림 1. 이상적인 squint-SAR 시스템 기하구조
Fig. 1. Geometry of an ideal squint-SAR system.

2-1 FMCW-SAR 신호모델

FMCW 신호모형을 기반으로 한 SAR 원신호 생성은 다음 식 (1)~(4)을 이용해 특정 거리에 위치한 n -번째 목표물의 지연시간(τ_n)과 반사신호 크기성분(A_n)을 고려해 계산될 수 있다(여기서, f_0 는 중심주파수, K_r 은 변조율 임). 식 (1)과 식 (2)는 각각 송신신호와 수신신호를 나타내며, 특히 식 (1)은 지연선(d)을 이용해 기준신호를 지연시켜 중간주파수(IF) 수신신호를 효과적으로 처리하기 위한 ‘delayed de-chirp’ 신호처리를 나타낸다^[4].

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

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

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

$$\tau_n(u) = \frac{2\sqrt{x_n^2 + (y_n - u)^2 + (z_n - H_0)^2}}{c} \quad (4)$$

식 (3)은 지연된 기준신호와 수신신호를 주파수 하향변환시켜 얻은 중간주파수 수신신호이며, 식 (4)는 n -번째 목표물의 지연시간을 목표물의 위치(x_n, y_n, z_n)와 안테나 위치(u)의 상대적 거리로 나타낸 것이다.

2-2 Squint FMCW-SAR 시스템

이상적인 비행경로를 갖는 SAR 시스템은 그림 1과 같은 기하구조로 도식화될 수 있다. 이는 특정위치의 목표물(예, 중심거리 내 목표물)을 기준으로 SAR 시스템의 안테나가 특정 지향각도를 갖도록 설정된다면 그림 1에 서와 같이 합성개구면의 중심점 위치(u_c)는 squint-SAR 시스템 운용을 위한 중심점 위치(u_c)로 이동되어야 하고, 그에 따른 목표물과 안테나 사이의 거리는 R_0 에서 R 로 이동함을 나타낸다. 또한, 목표물과 안테나의 상대적 거리는 안테나 지향각도 설정값에 따라 멀어지는 특성을 갖게 되어 원시신호 생성 시 거리변화를 효과적으로 관리하기 위해 ‘delayed de-chirp’ 신호처리기술을 적용하였다.

그림 1에서 도식화된 각각의 기호와 좌표성분은 직각좌표계(x, y, z)로 표현되며, 합성개구면 상의 안테나 위치(u, u'), 안테나 입사각도(θ_{inc})와 지향각도(ϕ_{sq}), 지면을 기준으로 한 방위각(ϕ_{yaw}), 비행고도(H_0) 등을 도식화하였다.

III. Squint-SAR 시스템 기하구조

본 장에서는 안테나 지향각도 설정에 따른 지면에 투사되는 전파특성의 변화를 squint-SAR 시스템 기하구조 내에서 분석하였다. 특정 입사각도(예, $\theta_{inc}=45^\circ$)로 설정된 SAR 시스템에서 안테나 지향각도(ϕ_{sq}) 변화가 기하구조 내에서 미치는 영향을 각각의 성분별로 분석하고, squint-SAR 원시신호 생성을 위한 신호모델에 이와 같은 특성을 반영한 수정된 안테나 방사패턴을 모델링하였다.

3-1 방위방향 전파특성

특정 안테나 지향각도를 갖는 일반적인 squint-SAR 시스템의 목표물($f(x, y)$) 분산전력패턴이 지향각도에 비례해 일정한 각도로 회전됨을 유추할 수 있으며, 특히 방위방향 패턴 변화는 이상적인 합성개구면의 안테나 빔 중심이 지면에 투영된 방위각(ϕ_{yaw})에 수직한 방향을 이루게 된다^{[8],[9]}.

그림 2는 안테나 지향각도와 이때 지면에 투영된 방위각의 관계를 도식화한 것으로 안테나 빔 중심을 기준으로

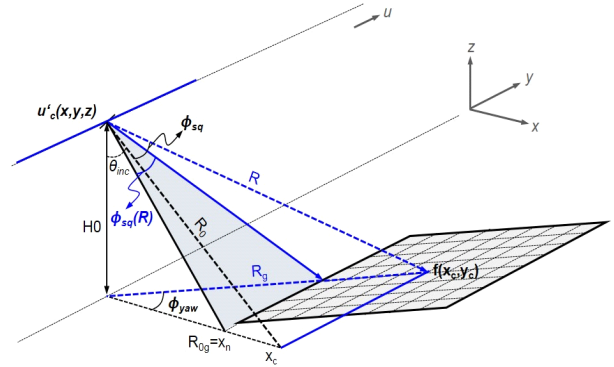


그림 2. Squint-SAR 시스템의 방위각 성분 분석

Fig. 2. Geometry of squint-SAR system for analyzing azimuth components.

설정된 입사각도와 지향각도 그리고 빔 중심에 놓인 목표물($f(x_c, y_c)$)을 이용해 지면에 투영된 방위각 성분을 나타낸다. 지면에 투영된 방위각 성분은 거리에 따른 안테나 지향각도($\phi_{sq}(R)$) 변화에 무관하게 일정한 값을 유지한다. 다시 말해, 빔 중심에서 설정된 지향각도(ϕ_{sq})에 의해 지면에 투영된 방위각(ϕ_{yaw})과 거리에 따른 안테나 지향각도($\phi_{sq}(R)$)에 의해 지면에 투영된 방위각 성분이 동일함을 알 수 있다. 이와 같은 안테나 지향각과 지면에 투영된 방위각 사이의 관계는 다음 절의 수정된 안테나 방사패턴 모델링 과정에서 이용된다.

$$R \sin \phi_{sq} = R_g \sin \phi_{yaw} \quad (5)$$

$$\phi_{yaw} = \sin^{-1} \left(\frac{R \cdot \sin \phi_{sq}}{\sqrt{R^2 - H_0^2}} \right) \quad (6)$$

식 (5)는 안테나 지향각과 지면에 투영된 방위각의 관계를 나타낸 것으로 안테나와 목표물 중심 거리(R)와 지면에 투영된 거리(R_g)를 이용한 관계를 나타내며(그림 1 및 그림 2), 식 (6)은 지향각도 설정에 의한 방위각 성분변화로 정리된 식이다.

3-2 안테나 방사패턴 모델링

거리방향 전파특성 분석에 앞서 안테나 지향각(ϕ_{sq}) 설정에 따른 방사패턴 모델링에 대한 수정사항을 설명한다.

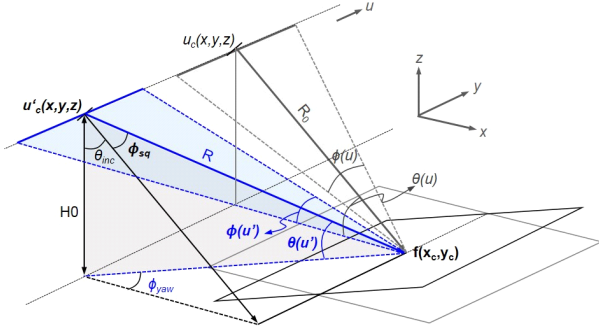


그림 3. Squint-SAR 시스템의 방위방향 방사패턴 모델링
Fig. 3. Geometry of squint-SAR system for modelling an azimuth beam pattern.

$$A_n = C \frac{\sigma_n}{R_n^2} \times \text{sinc}^2 \left(0.886 \frac{\phi_n(u')}{HPBW_\phi} \right) \times \text{sinc}^2 \left(0.886 \frac{\theta_n(u')}{HPBW_\theta} \right) \quad (7)$$

식 (7)은 앞선 식 (3)의 중간주파수 수신신호의 크기함수(A_n) 특성을 수학적으로 모델링한 것으로 목표물의 레이다 단면적(σ)에 비례하고, 거리제곱($1/R^2$)에 반비례하며, 안테나 방사패턴($\text{sinc}^2(\cdot)_{\phi, \theta}$)과 보정상수(C)를 적용된 값으로 표현할 수 있다. 여기서, 목표물의 반사도와 보정상수를 정규화하면 크기함수의 상대적 크기 변화는 거리와 방사패턴에 의존적이게 된다. 따라서 squint-SAR 기하구조 내 목표물 위치에 따라 입사파의 고각(θ) 및 방위각(ϕ)의 변화가 반영된 안테나 방사패턴 모델 수정이 필요하다.

$$\theta(u') \approx \theta(u) - \theta_{inc} \quad (8)$$

$$\phi(u') = \phi(u) - \phi_{sq}(R) \quad (9)$$

식 (8)과 식 (9)는 각각 고각과 방위각 방사패턴의 수정된 모델을 나타낸 것으로 기존의 방사패턴 모델에서 입사각도(θ_{inc})와 지향각(ϕ_{sq})을 보정한 값이다. 이때, 고각방향 안테나 방사패턴은 일반적으로 넓은 빔 폭(예, $HPBW_\theta \approx 50^\circ$)을 갖도록 설계되어 거리에 대한 변화량에 둔감한 특성이 있다. 반면에 방위각 방향 안테나 방사패턴의 경우, 좁은 빔 폭(예, $HPBW_\phi \approx 10^\circ$)의 적용과 거리에 따른 지향각도가 그림 2에서와 같이 변하는 특성이

있어 식 (9)의 우변 두 번째 항($\phi_{sq}(R)$, 식 (10) 참조)을 앞선 식 (5)의 관계식을 통해 재정의하여 수정된 모델에 적용한다.

$$\phi_{sq}(R) = \sin^{-1} \left(\frac{\sqrt{R^2 - H_0^2} \cdot \sin \phi_{yaw}}{R} \right) \quad (10)$$

3-3 거리방향 전파특성

Squint-SAR 시스템의 목표물 분산전력패턴 특성변화는 back-projection 알고리즘을 이용한 영상복원을 통해 분석 가능하다. Back-projection 알고리즘은 기본적으로 낮은 계산효율을 갖는 반면 squint-SAR 시스템과 같은 상대적으로 복잡한 기하구조 내 전파진행 특성을 왜곡없이 복원하는 장점이 있어 본 연구에서 squint-SAR 시스템의 전파특성 분석/검증을 위해 활용되었으며, 모의실험의 계산효율을 높이기 위해서 분할연산기법을 추가 적용하였다^{[10][11]}.

특히, squint-SAR 시스템의 거리방향 전파 특성을 분석하기 위해서 back-projection 알고리즘을 이용해 복원된 영상을 살펴보면(제4장 모의실험 참조), 회전 정도가 방위방향 성분과 다른 것을 쉽게 확인할 수 있다. 이는 기울어진 전파진행면(slant-range)에서 안테나 지향각도(squint-angle)에 의해 공간적으로 다시 일정 각도로 기운 동위상면(equi-phase plane) 상을 전파가 진행하고, 기운 동위상면과 지면이 접하는 접선을 따라 전파진행의 흔적이 투영되는 것으로 설명할 수 있다.

따라서 이와 같은 지면에 투영된 거리방향 전파진행 특성을 분석하기 위해서 그림 4와 같은 4단계의 분석과정을 도식화하였다. 그림 4(A)는 squint-SAR 시스템의 특정 지향각(ϕ_{sq}) 설정 예로써, $\phi_{sq} = 0^\circ$ 인 경우의 기준 전파진행방향(\vec{k}_i)과 $\phi_{sq} > 0^\circ$ 인 경우의 전파진행방향($\vec{k}_{i,sq}$) 벡터성분을 기울어진 전파진행면 위에 도식화한 것이다. 두 입사파의 벡터성분은 동일한 평면상에 위치하므로 두 벡터성분은 공통의 수직벡터(\vec{n}) 성분을 갖는다. 다시 말해, 기울어진 전파진행면을 기준으로 한 두 입사파의 수직방향 동위상면의 특성변화는 없으며, 단지 전파진행방향이 안테나 지향각도 만큼 이동한 것이다. 그러나 관측기준면을 기운 전파진행면에서 지면으로 바꾸면 두 입사파의 수직방향 동위상면은 그림 4(A), 그림 4(B)와 같이 서로 다른 특성

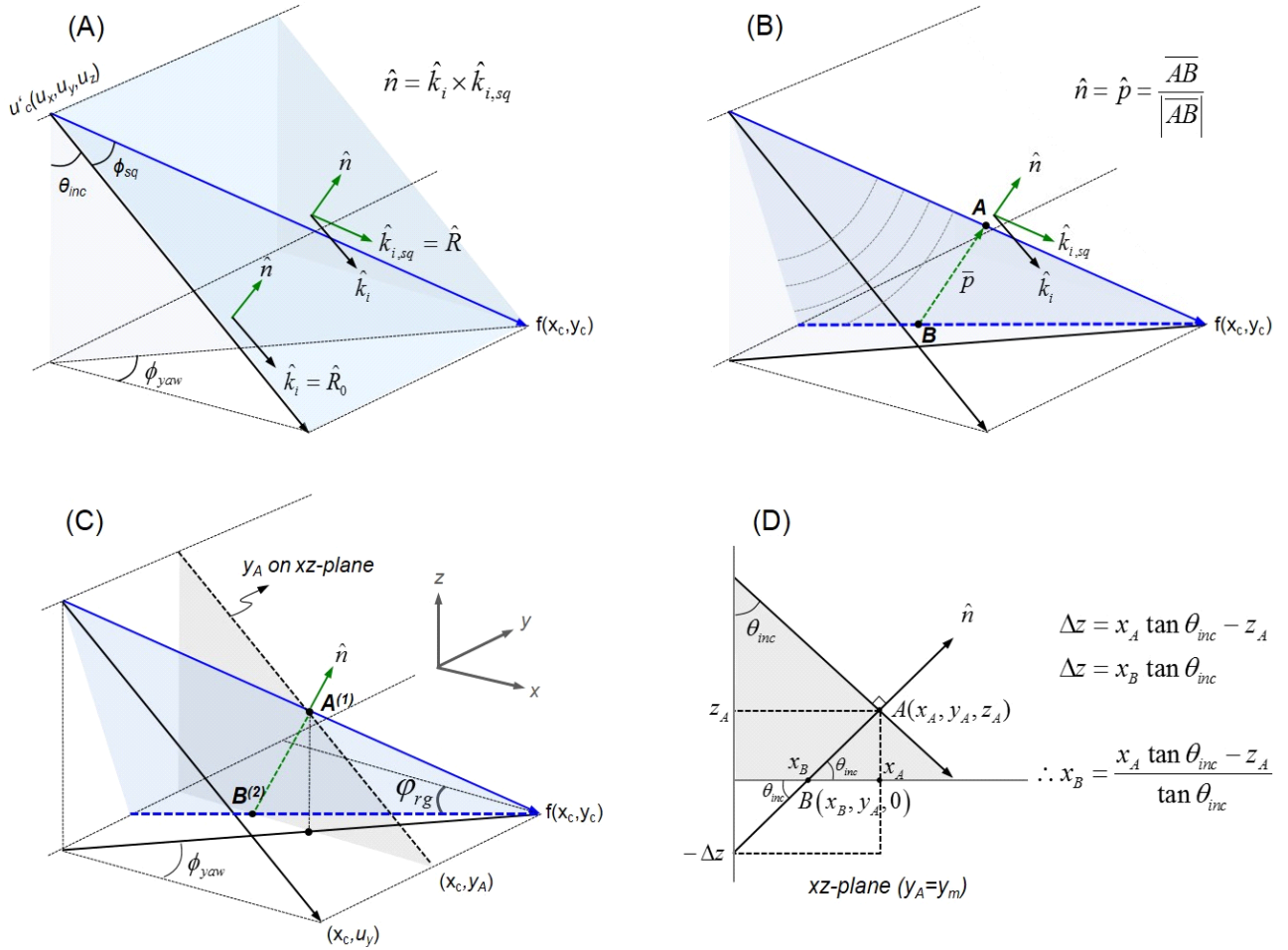


그림 4. Squint-SAR 시스템의 거리방향 성분 분석(지면에 투영된 전파 진행방향 궤적)

Fig. 4. Geometry of squint-SAR system for analyzing a range component(projected trace of the propagating-wave onto ground plane).

을 갖는다. 지향각도 만큼 이동한 전파진행방향($\hat{k}_{i,sq}$) 벡터 성분의 수직방향 동위상면은 지면을 기준으로 수직이 아닌 공간적으로 다소 복잡한 방향으로 기운 평면(그림 4(B) 어두운 삼각형 영역)이 된다. 그리고 이 기운 평면은 squint-SAR 시스템 입사파의 수직방향 동위상면이 되어 지면과 접하는 접선(그림 4(B) 점선)을 따라 거리방향 전파진행의 흔적들이 분산전력패턴으로 지면에 투영된다.

따라서 squint-SAR 시스템의 목표물 분산전력패턴 거리방향 특성변화 예측은 이 기운 수직방향 동위상면과 지면 사이의 교점을 찾아 회전성분(ϕ_{rg})을 추정하는 단계로 요약될 수 있다. 회전성분(ϕ_{rg})은 목표물 위치와 점 B의 좌표정보를 이용해 쉽게 계산될 수 있다.

그림 4(C)와 (D)는 접선 위의 특정 점 B의 좌표를 계산하는 과정을 나타낸 것으로, 먼저 점 B의 좌표는 전파진행 경로 상의 임의의 점 A로부터 계산될 수 있다. 이때, 점 A와 점 B를 잇는 벡터성분(\vec{p})은 수직벡터(\vec{n})와 동일한 성분임을 알 수 있다. 점 A의 위치가 결정되면 이와 같은 수직벡터(\vec{n}) 성질을 이용해 지면과의 교점 B의 좌표정보를 계산할 수 있다.

식 (11) 및 식 (12)는 전파진행 경로 상에 위치한 점 $A(x_A, y_A, z_A)$ 의 좌표정보를 얻기 위한 과정을 수식으로 정리한 것으로 먼저 y_A 의 좌표정보를 ($u_y < y_A < y_c$) 범위 내의 한 점으로 정한 후(그림 4(C) 참조), 합성개구면 중심과 목표물 중심을 잇는 전파진행 경로($\vec{u}'f_c$) 상의 점 A를 식

(11)과 같은 조건식을 이용해 점 A의 좌표정보를 계산한다.

$$\overline{u'_c f_c} \times \overline{u'_c A} = 0 \quad (11)$$

$$x_A = \frac{y_A(x_c - u_x) - x_c u_y + y_c u_x}{(y_c - u_y)},$$

$$z_A = \frac{-x_A u_y + x_c u_z}{(x_c - u_x)} \quad (12)$$

식 (12)는 식 (11)의 조건식을 이용해 3차원 벡터성분의 크기를 0으로 하는 3개의 방정식을 풀 결과로 점 A의 x-좌표성분(x_A)은 앞서 정한 y-좌표성분 y_A 와 합성개구면 중심점(u_x, u_y, u_z) 그리고 목표물 중심점(x_c, y_c, z_c) 좌표로 정리되며, z-좌표성분(z_A)은 x_A 와 합성개구면 중심점을 이용해 정리 할 수 있다.

설정된 점 A의 좌표정보로부터 점 B의 좌표정보를 획득하는 과정은 그림 4(D)에서와 같이 ($y=y_A$)인 xz-평면 상의 기하구조로 도식화 될 수 있다. 점 B의 좌표정보(x_B, y_B, z_B)는 점 A로부터 수직벡터(\mathbf{n}) 성분의 연장선과 지면의 교점을 계산해 얻을 수 있으며, 이때 안테나 입사각도 설정값에 따라 변하는 점 B의 좌표정보를 확인 할 수 있다. 이때, 점 B의 좌표정보 중 y-,z-좌표성분은 점 A와 지면 좌표정보로부터 알 수 있고, 그림 4(D) 기하구조로부터 계산된 x-좌표성분(x_B)으로 점 B 좌표정보($x_B, y_B=y_A, z_B=0$) 모두를 계산 할 수 있게 된다. 식 (13)은 점 B x-좌표성분 계산을 위해 정리된 식이다. 이로써 지면에 투영된 전파진행경로 상의 점 B의 좌표정보를 점 A로부터 구할 수 있게 되었으며, 점 B($x_B, y_A, 0$)와 목표물 중심점 ($x_c, y_c, 0$) 좌표정보를 이용해 식 (14)와 같이 지면에 투영된 전파진행경로의 회전성분을 계산할 수 있다.

$$x_B = \frac{x_A \tan \theta_{inc} - z_A}{\tan \theta_{inc}} \quad (13)$$

$$\phi_{rg} = \tan^{-1} \left(\frac{y_c - y_A}{x_c - x_B} \right) \quad (14)$$

Squint-SAR 시스템 기하구조를 이용한 목표물 분산전력패턴 회전성분 분석결과를 요약하면, 안테나 지향각도(ϕ_{sq})에 의한 방위방향 분산전력패턴은 지면에 투영된 방위각(ϕ_{yaw}) 성분만큼의 회전성분이 반영된다(그림 2, 식

(6)). 그리고, 전파진행방향의 분산전력패턴은 기울어진 전파 동위상면(그림 4)과 지면의 접선방향으로 회전하는 특성이 있어 지면에 수직으로 투영된 방위방향 분산전력패턴의 회전특성과 다른 식 (14)의 결과를 확인하였다. 또한, 분석된 목표물 분산전력패턴 변화는 FMCW 신호모델과 back-projection 알고리즘을 이용한 모의실험을 통해 분석결과를 검증하였다.

IV. 모의실험

Squint-SAR 시스템의 전파특성 분석/검증을 위해서 FMCW 신호모델을 기반으로 한 원시신호 생성과 이를 복원하기 위해 back-projection 알고리즘을 적용하였다. 안정된 FMCW-SAR 원시신호 생성을 위해 안테나 지향각도 설정에 따른 목표물과 안테나 사이 전파진행거리 변화를 ‘delayed de-chirp’ 기법을 적용하여 빔 중심에 위치한 목표물 응답특성이 안정적으로 복원될 수 있도록 최적화된 지연시간(d)을 적용하였다. 또한, 안테나 지향각도 설정에 따른 안테나 방사패턴의 수정된 모델을 적용하여 방위방향 목표물 응답특성의 정밀도를 개선하였다.

4-1 FMCW-SAR 원시신호 생성 및 복원

안테나 지향각도 설정에 따른 FMCW-SAR 원시신호 생성은 표 1과 같은 squint-SAR 시스템 파라미터들과 식 (3), 식 (4) 중간주파수 수신신호, 그리고 식 (7) 크기함수를 이

표 1. 모의실험 FMCW-SAR 시스템 제원
Table 1. Specification of FMCW-SAR system.

Setup parameters	Values	Remarks
Operating 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, ($\Delta R \sim 30$ cm)
Azimuth bins	2,000 samples	-
Synthetic aperture length	200 m	-
Altitude	500 m	-
Beam width	$\theta=10^\circ, \phi=50^\circ$	HPBW θ, ϕ
Incidence angle	$\theta_{inc}=10^\circ$	-
Squint angle	$\phi_{sq}=0^\circ \sim 50^\circ$	-

용해 계산될 수 있으며, 생성된 원시신호는 **bac-projection** 알고리즘을 이용해 SAR 영상으로 복원된다. 이때, **back-projection** 알고리즘 기반의 영상복원을 위해 식 (15), 식 (16)과 같은 정합필터(matched filter) 과정과 목표물 지연 시간을 적용하였다^[10](여기서, W_p 는 window함수를 포함한 p -번째 신호의 크기함수이며, u_p 는 p -번째 안테나 위치, 그리고 (x_i, y_j) 와 t_{dij} 는 각각 ij -번째 목표물 위치와 지연시간을 나타냄).

$$f(x_i, y_j) = \sum_{p=1}^P \left\{ W_p s_{IF,r}(\omega, u_p) s_M^*(t_{dij}(u_p)) \right\} \quad (15)$$

$$t_{dij}(u_p) = \frac{2\sqrt{(x_i - u_x)^2 + (y_j - u_y)^2 + u_z^2}}{c} \quad (16)$$

4.2 목표물 분산전력패턴 분석방법

그림 5는 안테나 지향각도($\phi_{sq}=45^\circ$) 설정 조건 하의 모의실험 결과를 나타낸 것으로, 점 목표물의 SAR 원시신호(그림 5(a))와 복원영상(그림 5(b)) 그리고 squint-SAR 시

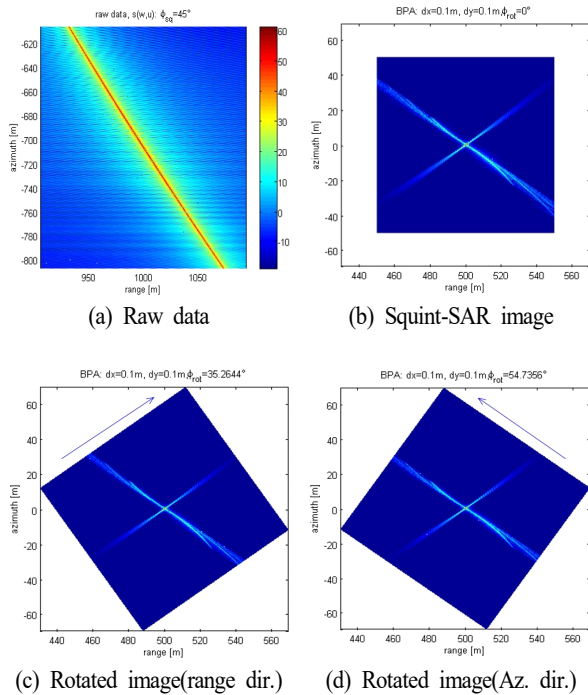


그림 5. Squint FMCW-SAR 시스템 모의실험 결과
Fig. 5. Simulation results of the squint FMCW-SAR system.

스템의 목표물 분산전력패턴 회전성분을 거리와 방위방향에서 예측하여 회전시킨 복원영상(그림 5(c), 그림 5(d))을 각각 나타낸다. 안테나 지향각도 45° 의 설정 조건 하에서 목표물 거리방향과 방위방향의 분산전력패턴 회전성분은 각각 35.2° 와 54.7° 로 분석되었으며(식 (6), 식 (14) 참조), 분석결과와 복원영상 내 회전성분을 직관적으로 비교 분석하기 위해서 거리/방위방향 회전성분만큼 복원영상을 회전시킨 결과이다. 안테나 지향각도 설정에 의한 목표물 분산전력패턴 회전성분의 예측결과는 회전된 복원영상을 통해 거리방향(그림 5(c))과 방위방향(그림 5(d)) 모두에서 높은 계산 정확도를 확인하였다.

4.3 목표물 분산전력패턴 변형 특성분석

그림 6은 squint-SAR 시스템의 안테나 입사각도와 지향각도 설정($\theta_{inc}=10^\circ \sim 50^\circ$, $\phi_{sq}=0^\circ \sim 50^\circ$)에 따른 복원영상 내 목표물 분산전력패턴의 회전성분 변화를 거리와 방위방향에 대해 도식화한 것이다. 전파 입사각이 작은 경우(예, $\theta_{inc}=10^\circ$), 목표물 분산전력패턴 변화가 거리/방위방향에서 각각 큰 차이를 보이며 변화하지만, 전파 입사각이 큰 경우(예, $\theta_{inc}=50^\circ$) 목표물 분산전력패턴 특성변화가 안테나 지향각도 변화특성에 근접해짐을 알 수 있다. 이는 입사각이 커질수록 지면에 투영되는 전파진행의 3차원 공간적 특성이 2차원 평면적 특성으로 변하기 때문이다.

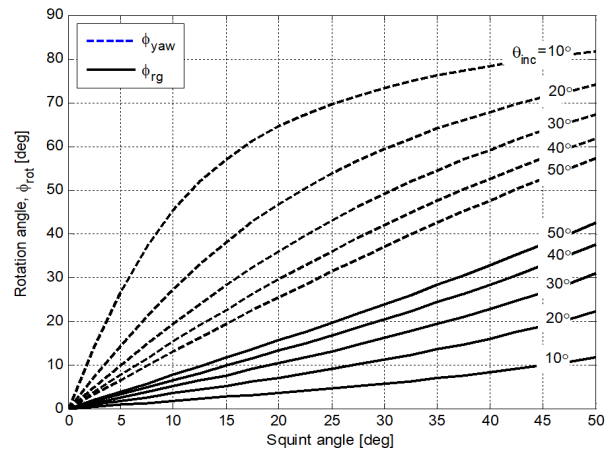


그림 6. Squint-SAR 영상 내 목표물 분산전력패턴 변형 특성
Fig. 6. Property of target's power-spill in a squint-SAR image.

V. 결 론

본 논문에서 squint-SAR 시스템의 공간적 전파진행특성과 이를 반영한 복원영상 내 목표물 분산전력 패턴변화를 SAR 기하구조를 이용해 수학적으로 분석하였다. 분석결과를 통해 목표물 분산전력패턴은 안테나 입사각과 지향각 설정에 따라 거리방향과 방위방향 회전 특성이 각기 독립적인 요인으로 변하게 되며, 지면에 투영된 합성개구면의 방위각 특성과 기울어진 전파동위상면의 기하구조 분석으로 정확한 예측이 가능함을 확인하였다.

Squint-SAR 시스템의 기하구조를 이용한 전파진행특성 분석기법은 안테나 지향각에 따른 변화를 정확히 분석/예측할 수 있어 다양한 SAR 복원영상 분석에 이용될 수 있다. 예를 들어 복원영상으로부터 SAR 시스템의 안테나 설치각도를 역산하기 위한 방법으로 시스템 운용성능 검증을 위해서도 활용이 기대된다.

References

- [1] A. Meta, P. Hoogetboom, 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] J. J. M. de Wit, A. Meta, and P. Hoogetboom, "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.
- [3] 황지환, 정정교, 김덕진, 김진우, 신희섭, 옥재우, "항공기 기반 FMCW-SAR 시스템의 연속이동효과 보정," 한국전자과학회논문지, 28(5), pp. 410-418, 2017년 5월.
- [4] 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.
- [5] G. Fornaro, G. Franceschetti, and S. Perna, "On center-beam approximation in SAR motion compensation," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 3, no. 2, pp. 276-280, Apr. 2006.
- [6] G. Fornaro, "Trajectory deviations in airborne SAR: Analysis and compensation," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 35, no. 3, pp. 997-1009, Jul. 1999.
- [7] 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.
- [8] I. G. Cumming, F. H. Wong, *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data*, Boston/London, Artech House, 2005, pp. 169-221.
- [9] X. Sun, T. S. Yeo, C. Zhang, Y. Lu, and S. Kooi, "Time-varying step-transform algorithm for high squint SAR imaging," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 37, no. 6, pp. 2668-2677, Nov. 1999.
- [10] M. Soumekh, *Synthetic Aperture Radar Signal Processing with Matlab Algorithm*, New York, John Wiley & Sons, 1999, pp. 212-230.
- [11] 황지환, 김덕진, 김진우, 옥재우, 신희섭, 유응노, "항공기 기반 FMCW-SAR 영상복원을 위한 간소화된 분할연산기법," 한국전자과학회논문지, 28(9), pp. 723-732, 2017년 9월.

황 지 환 (서울대학교/선임연구원)



2001년 2월: 홍익대학교 전파공학과 (공학사)
 2003년 2월: 홍익대학교 전파통신공학과 (공학석사)
 2003년 4월~2006년 5월: LG전자 단말연구소 주임연구원
 2007년 5월~2009년 3월: 한국 애질런트 테크놀로지스 기술지원부 과장

2009년 3월~2013년 2월: 홍익대학교 전자정보통신공학과 (공학박사)
 2015년 1월~현재: 서울대학교 기초과학연구원 선임연구원
 [주 관심분야] 마이크로파 원격탐사, 레이다, 전파산란

한 승 훈 (한화시스템/수석연구원)



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

김 덕 진 (서울대학교/교수)



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

조 재 형 (한화시스템/전문연구원)



2003년 2월: 광운대학교 전자공학과 (공학사)
 2009년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
 2017년 2월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사)
 2017년 3월~2017년 6월: 한국과학기술연구원 박사후연구원

2017년 6월~현재: 한화시스템(주) 전문연구원
 [주 관심분야] RADAR system, microwave imaging

이 승 철 (서울대학교/석박사 통합과정)



2017년 8월: 연세대학교 지구시스템학과 (이학사)
 2017년 9월~현재: 서울대학교 지구환경과학부 석박사 통합과정
 [주 관심분야] 마이크로파 원격탐사, 항공기 SAR, SAR Interferometry

문 효 이 (한화시스템/연구원)



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