

# Back-Projection 알고리즘 기반 SAR 복원영상 비틀림 왜곡 보정기법

## Skewed SAR Image Correction Technique Based on the Back-Projection Algorithm

황 지 환 · 김 덕 진

Ji-Hwan Hwang · Duk-Jin Kim

### 요 약

본 논문에서는 역투영(back-projection) 알고리즘 기반 SAR(synthetic aperture radar) 복원영상의 비틀림 왜곡 특성을 바로잡기 위한 보정기법에 관해 설명한다. 역투영 알고리즘은 기본적으로 비선형 경로를 포함한 SAR 원시신호를 별도의 이동보상 없이도 영상복원이 가능한 장점이 있으나, 실제 비선형 경로에 의해 발생되는 비틀림 왜곡 특성은 복원된 영상 속에 그대로 존재한다. 이는 최적경로에 의해 재설정된 좌표정보와 그로 인한 스캔 각도 성분변화를 보정하여 역투영 알고리즘 기반 SAR 영상 품질을 개선할 수 있다. 비선형 경로에 의한 비틀림 왜곡 특성과 이를 보정하기 위해 제안된 보정기법 적용 결과는 모의실험과 실제 항공기 탑재 FMCW(frequency modulated continuous wave)-SAR 원시자료를 통해 분석 · 검증하였다.

### Abstract

A skewed synthetic aperture radar (SAR) image correction technique based on a back-projection algorithm is presented in this paper. The back-projection algorithm can generally reconstruct a SAR image, including a non-linear flight path, without an additional motion error compensation process. However, typically, the signal distortion owing to the non-linear path remains after reconstructing the SAR image. The skewness of the SAR image can be relieved by a rotated coordinate using an optimum path and a squint-angle compensation. The distortion compensation of the SAR image based on the back-projection algorithm and the proposed deskewing technique were analyzed and verified using simulation and the raw data of the airborne frequency modulated continuous wave (FMCW)-SAR system.

Key words: FMCW-SAR, BPA, Non-Linear Flight Path, Deskewing Technique

### I. 서 론

역투영(back-projection) 알고리즘 기반 SAR 영상복원기법은 크게 정합필터(matched filtering) 과정과 역투영합산(back-projection sum) 과정으로 구성되어 다양한 입력조건에서도 안정적으로 영상복원이 가능한 장점이 있다<sup>[1]~[4]</sup>.

이는 역투영 알고리즘 특유의 신호처리과정의 단순성과 강건함으로 다양한 연구에 활용되기에 적합하다. 하지만, 그런 고유한 신호처리 특성이 반영된 느린 연산속도와 위상오차를 포함한 복원영상 품질 등은 개선이 필요한 부분으로 여러 연구가 진행되고 있다<sup>[5],[6]</sup>.

본 연구는 역투영 알고리즘의 영상품질 개선을 위한

「본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원을 받아 차세대 SAR 특화연구실을 통해 수행되었음.」

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

· Manuscript received March 14, 2021 ; Revised April 5, 2021 ; Accepted May 8, 2021. (ID No. 20210314-024)

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

것으로 실제 SAR 시스템 운용 중 발생하는 비선형 비행 경로에 의한 SAR 복원영상 비틀림(skewness) 왜곡 특성 분석과 이를 개선하기 위한 보정기법에 대해 설명한다.

비선형 비행경로를 포함한 SAR 원시신호는 RDA, CSA 등과 같은 알고리즘의 경우, 영상복원을 위해 요동 보상의 신호처리과정이 반드시 필요하지만, 역투영 알고리즘의 경우, 정합필터 과정에서 비행경로와 영상복원을 위한 좌표정보가 동시에 적용되어 비선형 경로에 의한 상대적 거리변화가 보정되는 특성이 있다. 하지만, 기준 경로를 벗어난 위치정보를 이용해 복원된 SAR 영상은 실제 비행경로 특성이 반영된 왜곡특성을 갖게 되고, 이를 보정하기 위한 별도의 신호처리과정을 필요로 한다. 그래서, 본 연구에서는 비틀림 왜곡특성 보정을 위한 신호처리과정을 역투영 알고리즘에 입력좌표 설정단계에 일체화시켜 기존 역투영 알고리즘의 연산과정과 호환성을 유지한 보정기법을 제안한다. 비선형 비행경로에서 기인한 수신신호의 비틀림 왜곡 특성은 경로 오차를 최소화하기 위해 재설정된 기준경로와 좌표 정보를 이용해 보정되며, 이때 변환된 영상좌표와 수신신호 간 상대적 스캔트 성분변화를 분석·보정하는 과정을 포함한다. 비선형 경로를 포함한 SAR 복원영상의 비틀림 왜곡 보정과정은 모의 실험과 실제 항공기 탑재 FMCW-SAR 시스템의 원시신호(raw data)를 이용해 분석·검증하였다.

## II. 비선형 경로 SAR 신호

실제 SAR 시스템의 비행경로를 반영한 SAR 수신신호 특성 변화는 다음과 같이 기준경로 대비 sin함수로 근사화된 경로오차를 추가한 모의실험을 통해 분석될 수 있으며<sup>[7]</sup>, 역투영 알고리즘 기반 영상복원 좌표설정과 변환된 신호특성을 도식화하여 본 연구에서 제안하는 보정기법의 접근방법에 대해 상세히 설명한다.

### 2-1 비선형 경로를 갖는 SAR 시스템

비선형 경로를 갖는 SAR 시스템은 다음 그림 1과 같이 모의실험을 위해 설정된다. 직선의 기준경로 대비 비선형의 경로 오차는 sin함수를 이용해 근사화하였으며, 편의상 3차원 SAR 시스템 기하구조 내에서 xy-평면의 변위만

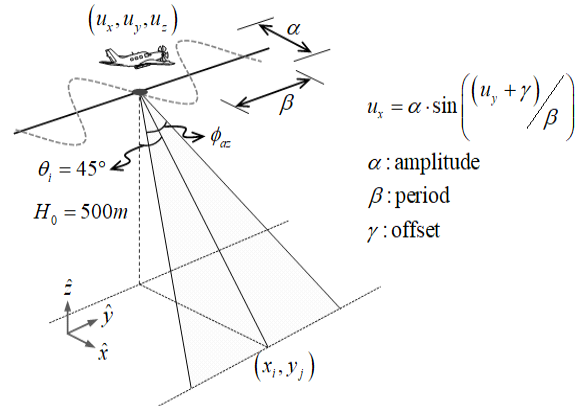


그림 1. 비선형 경로를 포함한 SAR 시스템 기하구조  
Fig. 1. Geometry of a SAR system with non-linear path.

을 갖도록 설정되었다. 경로 오차의 크기( $\alpha$ ), 주기( $\beta$ ), 중심점 이동( $\gamma$ )을 이용해 모의실험을 위해 설정된다. 실제 항공기 SAR 시스템의 실험설정을 고려해 기준 고도 500 m와 입사각  $45^\circ$  설값을 반영한다. 또한, 역투영 알고리즘 기반 영상복원을 위해 안테나 위치( $u_x, u_y, u_z$ )와  $ij$ -번째 목표물 위치( $x_i, y_j$ )가 반영된 연산과정을 수행한다.

$$s_r(t, u) = A(u) \cdot \exp\{-j2\pi f_0 \tau_{ij}(u)\} \quad (1)$$

$$M(u) = \exp\{j2\pi f_0 \tilde{\tau}_{ij}(u)\} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} f(x_i, y_j) &= \sum_{p=1}^P [s(t, u_p) \cdot M(u_p)] \\ &= \sum_{p=1}^P [A(u_p) \exp\{-j2\pi f_0 (\tau_{ij}(u_p) - \tilde{\tau}_{ij}(u_p))\}] \end{aligned} \quad (3)$$

$$f(x, y) = \sum_{i=1}^M \sum_{j=1}^N f(x_i, y_j) \quad (4)$$

식 (1)~식 (4)는 역투영 알고리즘 기반 영상복원과정을 요약한 것으로 수신신호 식 (1)과 정합필터 식 (2)를 이용한  $ij$ -번째 픽셀 복원결과, 식 (3)을 나타낸다(여기서,  $A(u)$ 는 수신신호 크기,  $f_0$ 는 중심주파수). 특히,  $p$ -번째 펄스 위치( $u_p$ )에서  $ij$ -번째 목표물까지의 전파지연시간( $\tau$ )은 실제 수신신호의 지연시간( $\tau(u_p)$ )과 GPS(global positioning system) 정보로부터 추정된 지연시간( $\tilde{\tau}(u_p)$ )으로 표현될 수 있으며, 모든 픽셀에 대해 역투영한 영상복원 결과는 식 (4)와 같다.

## 2-2 BPA 기반 영상복원 좌표설정

역투영 알고리즘 기반 SAR 영상복원은 식 (3)과 같이 안테나와 특정 목표물 간 상대거리를 기반으로 한 정합 필터 과정을 거친 신호들의 합으로 이루어지며, 영상복원을 위해 다양한 좌표계 적용이 가능하다. 그러나 일반적으로 직선의 기준경로를 기준으로 설정된 3차원 공간의 국부좌표계(local coordinate)를 설정하여 영상복원을 위한 안테나 위치정보와 복원영상 좌표정보를 나타낸다. 이와 같은 좌표변환 및 설정과정은 그림 2에서 도식화된다.

SAR 영상복원을 위해 적용되는 다양한 영상복원 알고리즘은 모두 비선형 경로 오차 보정을 위해 항공기 GPS 정보를 참조한다. 특히 역투영 알고리즘의 경우, 영상복원을 위한 좌표설정이 더 자유로운 특징이 있어 최적 영상복원을 위한 적절한 좌표설정이 중요하며, 이는 기준경로에 의존한 좌표설정이 일반적이다. 그림 2(a)는 GPS를 통해 수집된 위치정보를 UTM(universal transverse mercator) 좌표계를 이용해 나타낸 것이며, 그림 2(b)는 SAR 시스템 운용계획에 따라 설정된 기준경로( $\hat{y}$ )와 빔주사 방향( $\hat{x}$ )을 나타낸 것이다. 각각의 기준경로 방향과

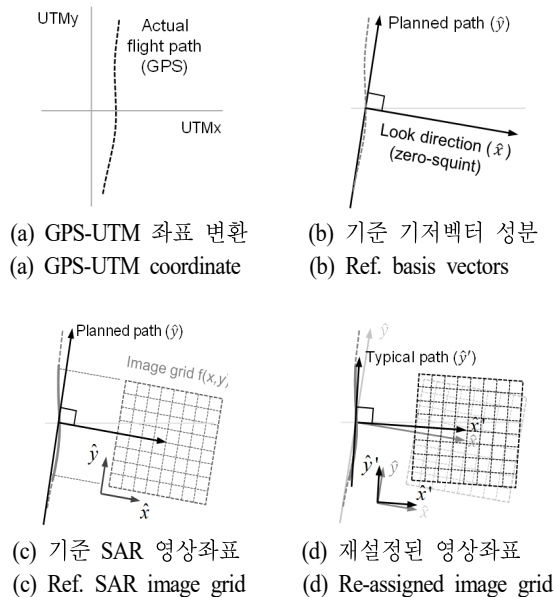


그림 2. Back-projection 알고리즘 기반 SAR 영상좌표 설정  
Fig. 2. SAR image grid set based on the back-projection algorithm.

빔주사 방향은 역투영 알고리즘 기반 영상복원을 위한 영상좌표의 기저벡터 성분이 되어 그림 2(c)와 같이 영상좌표를 설정할 수 있다. 이때, 영상복원을 위한 특정 구간의 비선형 경로오차가 재설정된 기준경로 방향( $\hat{y}'$ )에 더욱 최적화된다면 이를 기준으로 한 영상좌표는 그림 2(d)와 같이 회전특성을 포함한 새로운 영상좌표로 재설정될 수 있다. 요약하면, 그림 2는 역투영 알고리즘 기반 영상복원 과정 중 GPS로부터 수집된 위치정보를 이용한 좌표계 설정과 복원영상 좌표설정과정을 설명한 것이며, 추가로 최적 영상복원을 위해 재설정된 기준경로 적용 시 좌표계 변화와 이에 따른 영상좌표 수정과정으로 요약될 수 있다.

## 2-3 비선형 경로 SAR 신호 특성

다음으로 비선형 경로에 의한 SAR 신호특성 변화를 그림 3과 같이 도식화할 수 있다. 이는 앞선 그림 2에서와 같이 비선형 경로와 이에 상응하는 수신신호 샘플을 역투영 알고리즘 기반 영상복원을 위한 기저벡터 성분을 기준으로 나타낸 것이다. 단, 비선형 경로의 빔주사 방향

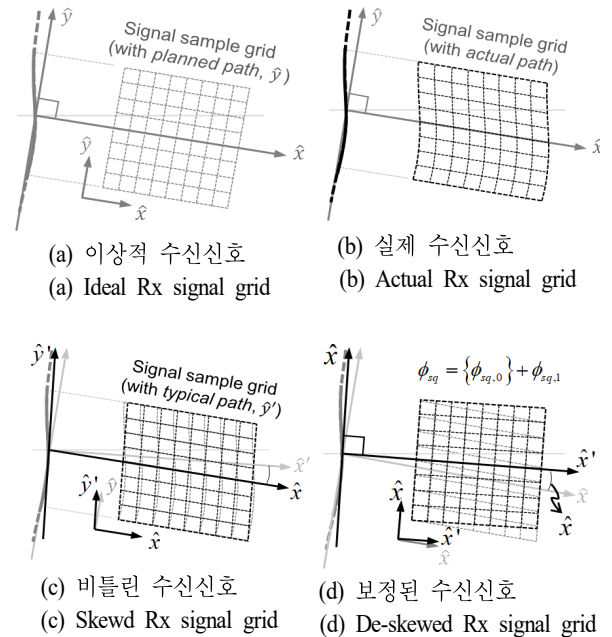


그림 3. 비선형 경로를 갖는 SAR 신호 특성  
Fig. 3. SAR signal property with a non-linear path.

( $\hat{x}$ )은 고정된 경우이다.

그림 3(a)는 기준경로( $\hat{y}$ )를 따라 수신된 이상적인 신호 샘플이며, 이에 반해 그림 3(b)는 실제 비선형 경로 오차를 반영한 수신신호 샘플로 안테나와의 상대거리는 그대로 유지된다. 그림 3(c)는 비선형 경로에 의해 발생하는 수신신호 샘플의 비틀림 왜곡을 보정하기 위해 재설정된 기준경로( $\hat{y}'$ )를 기준으로 표현된 수신신호 샘플의 비틀림 왜곡 특성을 나타낸다. 이 단계는 본 연구에서 제안한 보정기법의 기본 개념으로 비선형의 경로 오차를 최소화하는 새로운 기준경로( $\hat{y}'$ )가 재설정될 때, 실제 빔주사 방향( $\hat{x}$ )에 의한 전체적인 수신신호의 비틀림 왜곡 정도( $\phi_{sq}$ )를 분석할 수 있다. 그림 3(d)는 새로운 기저벡터 성분( $\hat{x}', \hat{y}'$ ) 적용으로 비틀린 신호를 이를 이용해 바로잡는 과정을 나타낸다. 이때, 비틀림 왜곡 정도는 좌표변환에 의한 빔주사 각 변화량( $\phi_{sq,l}$ )에 의존적이며, 추가적으로 수신신호 자체의 스캔트 성분( $\phi_{sq,0}$ )이 포함될 수 있다. 수신신호 자체의 스캔트 성분은 FMCW-SAR 신호특성에서 기인한 연속이동효과(continuous motion effect)<sup>[8],[9]</sup>와 시스템 운용중 발생한 스캔트 성분 등이 포함된 것으로 도플러중심(Doppler centroid) 추정기법<sup>[10]</sup>을 적용해 수신신호에 포함된 스캔트 성분( $\phi_{sq,0}$ )을 분석할 수 있다. 또한, 이 과정에서 분석된 수신신호에 포함된 모든 스캔트 성분은 비틀림 왜곡 보정을 위한 스캔스 성분 보정단계에서 함께 보정처리되는 장점을 갖게 된다.

### III. 비틀린 신호(Skewed Signal) 보정기법

항공기 SAR 시스템의 비선형 경로로 인한 수신신호 비틀림 왜곡 특성은 경로 오차 성분을 최소화하기 위해 재설정된 기준경로( $\hat{y}'$ )를 이용해 역투영 알고리즘 기반 영상복원을 위한 영상좌표와 수신신호 특성을 재정의할 수 있으며(그림 2(d)와 그림 3(c) 참조), 단계별 수신신호 특성과 영상복원 특성 변화는 모의실험을 통해 확인·검증하였다. 표 1은 본 연구를 위해 적용된 FMCW-SAR 시스템 제원을 나타낸다.

#### 3-1 비선형 경로에 의한 비틀림 효과

비선형 경로에 의한 역투영 알고리즘 기반 영상복원

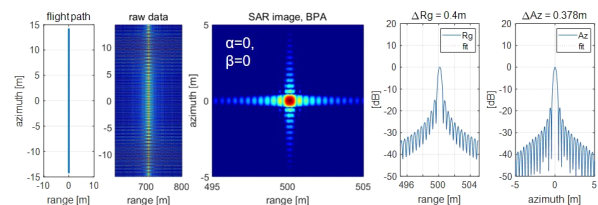
표 1. FMCW-SAR 시스템 제원

Table 1. Specification of FMCW-SAR system.

Items	Setup values	Note
Frequency	10~10.5 GHz	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
Altitude	500 m	-
Beamwidth	$\theta_{\text{ev}}=50^\circ$ , $\varphi_{\text{az}}=2.3^\circ$	(For simulation)
Incidence angle	$\theta_{\text{inc}}=45^\circ$	-

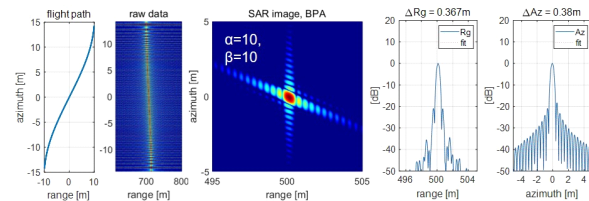
특성은 그림 1과 같은 모의실험 설정을 적용해 비교·분석하였다.  $\sin$  함수로 근사화된 비선형 비행경로는 크기( $\alpha$ ), 주기( $\beta$ ), 중심점 이동( $\gamma$ )의 변수를 조정하여 이상적인 선형의 기준경로와 최대  $\pm 10$  m의 오차를 갖는 비선형 경로를 적용한 모의실험을 수행하였다.

그림 4는 비선형 경로에 의한 비틀림 효과를 분석하기 위한 모의실험 결과로써 이론적 기대성능에 부합되는 이상적 기준경로의 경우(그림 4(a))와 비선형 경로를 갖는 경우(그림 4(b))를 각각 나타낸다. 이때, 비선형 경로에 의한 수신신호는 앞선 그림 3(b)와 같이 안테나와 목표물 간 상대거리가 유지되어 영상복원에는 무리가 없지만, 그



(a) 선형 경로 SAR 원시신호 및 복원영상

(a) SAR raw data and image with linear trajectory



(b) 비선형 경로 SAR 원시신호 및 복원영상

(b) SAR raw data and image with non-linear trajectory

그림 4. 비선형 경로에 의한 비틀림 효과 모의실험

Fig. 4. Geometry of squint-SAR system for analyzing azimuth components.

림 3(c)에서 표현된 평균적인 비틀림 효과가 수신자료에 포함되고, 그 결과, 복원영상 내 일정량의 스퀀트 성분이 반영된 복원영상을 확인할 수 있다. 그림 4(b)는 기준경로  $y$ 축을 기준으로 평균적 방향성분( $\hat{y}'$ )이 약  $34^\circ$  회전된 비선형 경로를 적용한 결과로 비선형 경로에 의한 수신신호 비틀림 효과와 그로 인한 복원영상 내 스퀀트 성분을 확인할 수 있다.

### 3-2 기준경로 재설정

수신신호 비틀림 효과는 비선형 경로의 평균적 방향성분( $\hat{y}'$ )과 기준경로( $\hat{y}$ )가 이루는 각도에 비례한 왜곡특성이 복원영상에 반영되므로 실제 비행경로의 평균적 방향( $\hat{y}'$ )으로 영상복원을 위한 좌표정보를 재설정하여 복원영상의 왜곡특성을 최적화할 수 있다(그림 2(d)).

그림 5는 재설정된 기준경로를 적용한 역투영 알고리

즘 기반 복원영상을 하나의 좌표평면에 복원한 것으로 회전변환으로 재설정된 영상좌표와 목표물 IRF(impulse response function) 패턴 변화를 확인할 수 있다. 약  $6^\circ$ 의 비틀림 효과를 포함한 수신신호의 복원영상과 기준경로 재설정으로 회전된 복원영상을 비교한 것으로 좌표변환으로 인해 변경된 빔주사 방향( $\hat{x}'$ )에 대한 부정합 특성이 반영된 기존 방위방향 해상도  $0.38$  m 대비 약  $0.45$  m의 해상도 변화를 확인할 수 있다.

### 3-3 스퀀트 각도( $\phi_{sq}$ ) 성분 보정기법

수신신호 비틀림 효과는 비선형 경로오차에 의한 SAR 시스템 기하구조 변형으로 기인한 스퀀트 성분( $\phi_{sq,1}$ )과 시스템 운용상 수신신호에 포함된 스퀀트 성분( $\phi_{sq,0}$ )으로 구분될 수 있으며, 두 성분을 포함한 스퀀트 성분( $\phi_{sq}$ )은 다음과 같은 신호처리를 통해 바로잡을 수 있다.

$$k_{u_c} = 2k_0 \sin(\phi_{sq,0} + \phi_{sq,1}) \quad (5)$$

$$FFT[s(\omega, u) \cdot \exp\{jk_{u_c} u\}] = s(\omega, (k_u - k_{u_c})) \quad (6)$$

기준경로 재설정으로 발생한 스퀀트 성분은 식 (5)를 적용해 스퀀트 각도 성분에 대응하는 도플러주파수( $k_{uc}$ ) 성분으로 변환되며<sup>[1]</sup>, 식 (6)과 같이 수신신호의 비틀림 효과 보정을 위해 적용된다.

그림 6은 앞선 그림 5의 수신신호에 FMCW-SAR 시스템의 연속이동효과에 준하는 약  $1^\circ$ 의 스퀀트 성분을 추가한 것으로 좌표변환을 통해 복원한 결과와 스퀀트 성분에 대한 보정과정을 거친 영상복원 결과를 나타낸 것이다. 그림 6(a)는 수신신호의 스퀀트 성분 추가로 복원능력이 나빠진 결과를 확인할 수 있으며, 그에 반해 그림 6(b)는 앞서 설명한 스퀀트 보정과정이 추가된 결과로써 회전된 복원영상과 복원능력을 확인할 수 있다(예, 방위방향 해상도 보정 전 약  $0.38$  m, 보정 후 약  $0.39$  m).

또한, 앞선 모의실험을 통해 제안된 비틀림 왜곡 보정기법은 수신신호에 포함된 기존 스퀀트 성분( $\phi_{sq,0}$ )도 별도의 신호처리과정 없이도 보정될 수 있음을 확인하였다.

## IV. FMCW-SAR 영상복원 비틀림 보정 결과

비선형 경로에 의해 발생된 비틀림 왜곡특성을 보정하

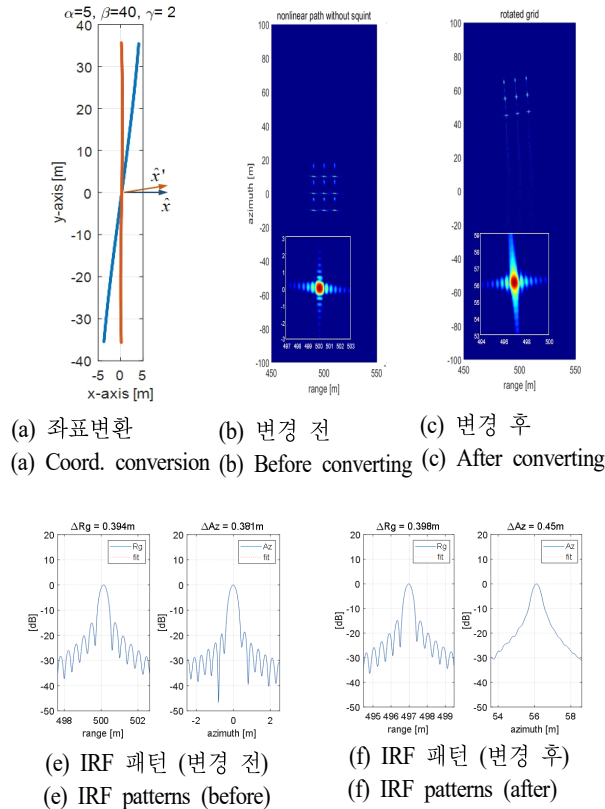


그림 5. 재설정된 기준경로를 이용한 SAR 영상복원  
Fig. 5. SAR image reconstructed by the typical path.

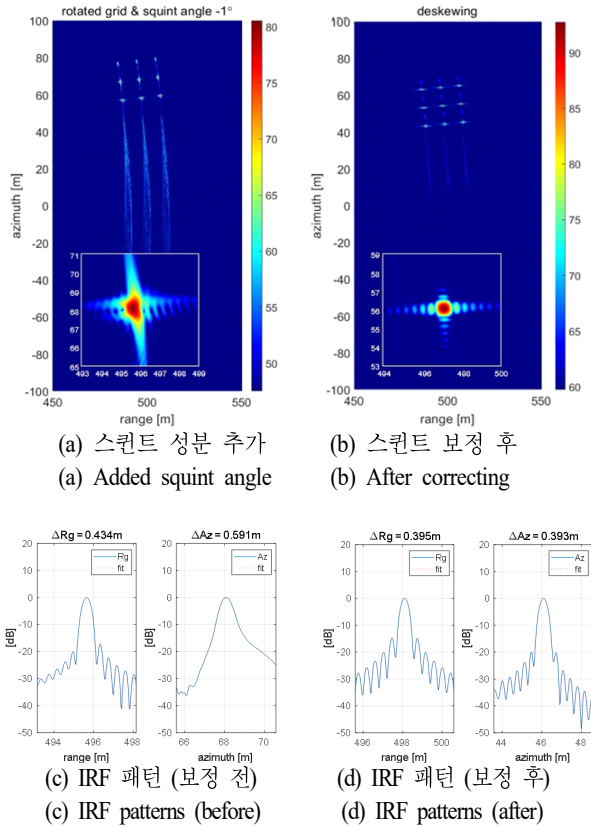


그림 6. 수신신호 내 스윙트 각도( $\varphi_{sq}$ ) 성분 보정결과  
Fig. 6. Correcting the squint angle( $\varphi_{sq}$ ) of Rx signal.

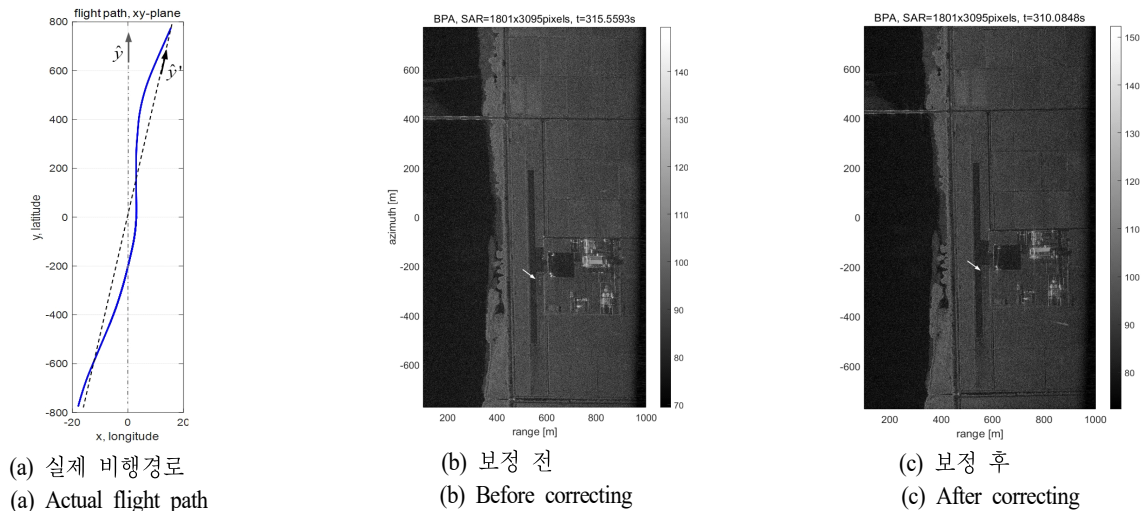


그림 7. 항공기 탑재 FMCW-SAR 시스템 원시자료를 이용한 비틀림 왜곡 보정기법 적용 결과 비교  
Fig. 7. Comparison result of applying the deskewing technique to a raw data of an airborne FMCW-SAR system.

기 위해 제안된 보정기법을 실제 항공기 탑재 FMCW-SAR 시스템으로부터 획득된 원시자료에 적용해 그 보정 성능을 검증하였다(FMCW-SAR 시스템 제원과 실험설정은 표 1 참조).

#### 4-1 BPA 기반 FMCW-SAR 영상복원

그림 7은 동일한 항공기 탑재 FMCW-SAR 시스템 원시자료를 이용한 수신신호의 비틀림 왜곡 보정 전·후 영상복원 결과를 비교한 것으로 역투영 알고리즘 기반 영상복원과정의 입력자료에 대한 보정 처리와 실제 비행경로에 최적화된 기준경로와 영상좌표 재설정 과정을 적용한 보정 결과이다.

그림 7(a)는 비선형의 실제 비행경로를 나타낸 것으로 GPS 정보를 UTM 좌표로 변환한 것이며, 이를 기존 역투영 알고리즘에 그대로 적용한 것이 그림 7(b)에 해당한다. 도로와 교차로 그리고 건물 외곽지역 경계를 통해 복원 영상이 미세하게 비틀려 있음을 확인할 수 있다. 그림 7(c)는 제안된 보정기법을 적용한 결과로써 실제 비행경로의 평균적 비행방향을 고려해 재설정된 기준경로와 이를 기준으로 변환된 영상복원 좌표정보를 적용하였으며, FMCW-SAR 원시신호의 스윙트 성분을 분석·보정하여 역투영 알고리즘 기반 영상복원과정의 입력자료로 이용

하였다. 이는 기존 역투영 알고리즘 기반 영상복원과정에 대한 수정 없이 입력자료에 대한 보정처리와 영상복원을 위한 영상좌표 수정만으로 비틀림 왜곡 특성에 대한 보정처리가 가능함을 나타낸다.

제안된 보정기법 적용 결과, 그림 7(c)는 재설정된 기준경로와 이를 기준으로 변환된 새로운 좌표평면에 재구성된 복원영상으로 안테나와 목표물 간 거리 변화 없이 미세하게 회전된 좌표변환과 신호처리에 의한 도플러중심 이동으로 보정된 빔주사 방향이 반영된 결과이다. 복원영상 전체에 대한 비틀림 왜곡 특성 보정 정도는 정사각형에 가까운 건물 외곽지역 경계를 통해서도 보정 전·후 특성을 쉽게 확인할 수 있다.

#### 4.2 목표물 분산전력패턴 분석

앞선 보정 결과를 보다 정량적으로 분석하기 위해서 실험지역 내 설치된 삼각수동전파반사기(trihedral corner reflectors)(그림 7 복원영상 내 화살표 참조)를 이용한 분산전력패턴 분석을 수행하였다.

그림 8은 보정 전·후 SAR 복원영상 내 삼각수동전파반사기를 위치시킨 실험지역을 확대한 것이며, 4개의 목표물 중 가장 위에 위치한 목표물에 대한 분산전력패턴을 나타낸 것이다. 보정 전·후 해상도 변화는 각각 거리 방향 약 1.78 m에서 약 0.58 m, 방위방향 약 0.44 m에서 약 0.19 m로 개선된 것을 확인할 수 있다. 실제 항공기 탑재 FMCW-SAR 시스템 운용주파수 대역폭과 방위방향 반전력빔폭(예,  $BW=470$  MHz,  $\varphi_{az}=10^\circ$ ) 기준 이론적 해상도는 각각 약 0.45 m와 0.17m 이다. 또한, 제안된 보정기법 적용 후 거리, 방위방향 각각 약 -34.2 dB, -24.3 dB 이하의 PSLR(peak-side lobe ratio) 특성을 갖는다.

역투영 알고리즘 기반 복원영상은 복소수 형식의 원시자료에 대한 정합필터와 역투영 합산 과정을 거치게 되므로 위상오차가 최소화되도록 잘 복원된 영상일수록 특정 위치의 목표물 응답특성이 집중되는 특성이 있다. 실제로 복원된 SAR 영상(그림 7 참조) 내 최대값 변화는 본 연구에서 제안된 보정기법을 적용 후 약 3 dB 이상 개선된 결과를 확인할 수 있다(표 2).

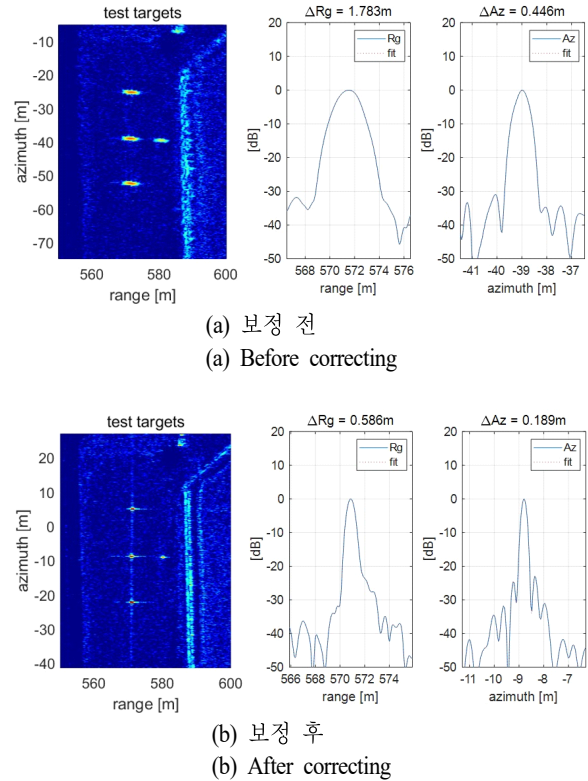


그림 8. 비틀림 왜곡 보정기법 성능분석 결과

Fig. 8. Performance analysis result of the deskewing technique.

표 2. 보정 전·후 성능분석 결과

Table 2. Comparison result of before & after correcting.

Items		Before	After	Theory
Resolution	Range	1.783 m	0.586 m	(0.45 m)
	Azimuth	0.446 m	0.189 m	(0.17 m)
PSLR	Range	-31.5 dB	-34.2 dB	-
	Azimuth	-30.6 dB	-24.3 dB	-
Max. value (BPA)		149.2 dB	152.3 dB	-

#### V. 결 론

본 논문에서 비선형 경로에 의한 SAR 수신신호의 비틀림 효과를 완화하기 위한 보정기법에 관해 설명하였다. 제안된 보정기법은 역투영 알고리즘 기반 영상복원과정에서 입력신호의 비틀림 효과를 보정하기 위해 최적 경

로로 재설정된 기준경로와 이를 기준으로 변환된 좌표정보를 이용한 영상복원을 수행하였으며, 좌표변환으로 발생한 스캔트 성분과 수신신호에 포함된 스캔트 성분을 제거하는 신호처리 과정을 적용하였다. 따라서, 역투영 알고리즘 기반 영상복원과정의 영상좌표 변환과 보정된 입력신호로 기존 역투영 알고리즘 연산과정의 변화 없이 개선된 복원영상을 얻을 수 있었다. 추가로, 본 연구에서 제안된 보정기법은 최적경로 설정과 스캔트 성분 제거를 위한 수치적 최적화 알고리즘과의 협업으로 더욱 높은 정확도의 보정결과를 얻을 수 있을 것으로 기대된다.

### References

- [1] M. Soumekh, *Synthetic Aperture Radar Signal Processing with Matlab Algorithm*, New York, NY, John Wiley & Sons, pp. 72-136, 1999.
- [2] A. Ribalta, "Time-domain reconstruction algorithms for FMCW-SAR," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 8, no. 3, pp. 396-400, May. 2011.
- [3] M. I. Duersch, D. G. Long "Analysis of time-domain back-projection for stripmap SAR," *International Journal of Remote Sensing*, vol. 36, no. 8, pp. 2010-2036, Apr. 2015.
- [4] J. N. Ash, "An autofocus method for backprojection imagery in synthetic aperture radar," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 9, no. 1, pp. 104-108, Jan. 2012.
- [5] L. M. H. Ulander, H. Hesten, and G. Stenstrom, "Synthetic-aperture radar processing using fast factorized back-projection," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 39, no. 3, pp. 760-776, Jul. 2003.
- [6] J. H. Hwang, D. J. Kim, J. W. Kim, J. W. Ok, H. S. Shin, and E. N. You, "Simplified factorizing-technique for airborne FMCW-SAR image reconstruction," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 28, no. 9, pp 723-732, Sep. 2017.
- [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] 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.
- [9] J. H. Hwang, J. K. Jung, D. J. Kim, J. W. Kim, H. S. Shin, and J. W. Ok, "Correction of continuous motion effects for airborne FMCW-SAR system," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 28, no. 5, pp. 410-418, May. 2017.
- [10] I. G. Cumming, F. H. Wong, *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data*, Artech House, Boston, MA, pp. 504-509, 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: 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