

논문 2017-54-7-10

# 스퀀트 모드 SAR 영상 형성을 위한 역투영 알고리즘에서의 자동초점 기법 적용 연구

( A Study on Autofocus Method for Back-Projection Algorithm  
under the Squint Mode in Synthetic Aperture Radar )

황 정 훈\*, 김 환 우\*\*

( Jeonghun Hwang and Whan-Woo Kim<sup>©</sup> )

## 요 약

요동이 존재하는 환경에서, 요동 측정 오차에 의한 성능 저하를 극복하기 위한 신호처리 방식의 자동초점(Autofocus, AF) 기법의 적용은 필수적이다. 본 논문에서는 스퀀트 모드에서 획득한 합성 개구면 레이더 데이터에 역투영 알고리즘(back-projection algorithm, BPA)으로 영상을 형성하고, AF를 효과적으로 적용하기 위한 방식을 연구하였다. 자동 초점 기법의 효과적인 적용을 위해 BPA 영상을 회전한 상태로 형성하는 방식을 제안하며, 이때 필요한 후처리 도플러 위치 정렬 함수를 유도하였으며, 비행시험을 통해 획득한 SAR(Synthetic Aperture Radar, SAR) 원시 데이터에 적용하여 성능 개선을 확인함으로써, 실 데이터에서도 유효한 방식임을 확인하였다.

## Abstract

Autofocus(AF) Method is essential to overcome the performance degradation due to motion measurement errors under airborne SAR environment. In this paper, back-projection algorithm(BPA) is applied to SAR raw data acquired under the squinted mode, and preprocessing algorithm of AF for BPA is investigated. To apply AF to SAR image effectively, image backplane rotation method and doppler location alignment function for BPA are proposed. The proposed method is applied to SAR raw data acquired in a flight test and shows excellent performance improvement in real data.

**Keywords** : SAR, Squint Mode, Back-Projection Algorithm, Autofocus

## I. 서 론

합성 개구면 레이더 또는 영상 레이더는 전자파를 이용하여 영상을 형성하는 기술로서, 주야간 및 날씨에 상관없이 운용 가능하며, 광대역 신호 발생 기술 및 디지털 H/W의 비약적인 발전으로 서브 미터 급 고해상도 영상 획득 또한 가능하게 되어, 최근 민간/군사적 목적으로 그 활용도가 크게 주목받고 있다. SAR 탑재체를 탑재한 비행체가 방위 해상도 및 부엽 성능 측면에

서 성능 저하 없는 SAR 영상 획득을 위해서는 이상적인 직선 비행을 해야 하나, 유/무인 비행체에 탑재하는 경우, 난기류나, 바람의 영향 등으로 인해 비행체는 이상적인 직선 궤적에서 벗어나는 요동을 경험하게 되며, SAR 안테나 위상 중심점 위치(Antenna Phase Center, APC)를 정확히 측정하여 요동을 보상하지 않을 경우, 심각한 성능 저하가 발생하게 된다<sup>[1]</sup>. APC의 측정은, 보통 GPS/IMU에 의해서 이루어지게 되나, 그 정확도가 SAR에서 요구되는 파장 길이보다 훨씬 작은 크기 이하가 되기는 실제 불가능 하므로, 잔여 요동에 의한 성능 저하는 필연적으로 발생하며, 이를 극복하기 위해서 신호처리 방식의 자동초점 기법 적용은 필수적이라고 할 수 있다.<sup>[1-2]</sup>

역투영 알고리즘 (back-projection algorithm, BPA)은 이상적으로는 요동에 의한 성능 저하가 없는 시간

\* 정회원, \*\* 평생회원 충남대학교 전자공학과  
(Department of Electronics Engineering Chungnam National University)

© Corresponding Author (E-mail : wwkim@cnu.ac.kr)

※ 이 연구는 충남대학교 학술연구비에 의해 지원되었음.

Received : February 17, 2017 Revised : May 31, 2017

Accepted : June 12, 2017

영역 SAR 영상 형성 알고리즘이며, Standard BPA의 경우 연산량이 매우 큰 단점에도 불구하고, 큰 요동이 존재하는 환경에서도 해상도 및 부엽 성능 측면에서 가장 정확한 영상 형성이 가능하다고 알려져 있으며, 연산량을 크게 감소시킬 수 있는 방안 또한 제안 되었다<sup>[3~5]</sup>. 요동 추정 오차가 전혀 존재하지 않는 이상적인 가정에서조차 직선 비행 궤적 대비 요동의 크기가 커질수록 공간 변이 위상 오차(spatially varying phase error)<sup>[6~7]</sup>에 의해 SAR 영상 품질 저하가 생기게 되는 RMA(Range Migration Algorithm), PFA(Polar Format Algorithm)과 달리, 요동에 의해 성능 저하가 거의 없는 영상 형성이 가능하므로 새로운 SAR 영상 형성 알고리즘 개발 시 성능 비교의 잣대로서 중요한 역할을 수행할 수 있다.

BPA에 AF를 적용하는 연구 결과로서 maximum image sharpness criterion에 의해 방위 위상 오차 추정을 하고, 보상하는 방식<sup>[7~8]</sup>과, PGA(Phase Gradient Autofocus) 기반의 방식<sup>[9]</sup> 등이 있으나, 스킨트 모드에서 획득한 BPA 영상에 어떻게 AF를 적용하는지에 대해서는 언급하지 않았다.

이 논문에서는 스킨트가 존재하는 spotlight 모드에서 획득한 SAR 원시데이터를 BPA로 형성 하고 PGA 기반의 AF를 적용하는 방법을 새롭게 제안하고자 한다. 먼저 스킨트 모드로 획득한 영상에 AF를 적용하기 위해서 영상 형성 면(image backplane)의 회전을 통해 영상을 형성하며, BPA에 PGA를 적용하기 위해서는 반드시 도플러 정렬 함수를 구하여 SAR 영상에 먼저 적용하고 나서 PGA를 적용해야만, AF에 의한 성능 개선이 가능함을 비행 시험을 통해 획득한 SAR 원시 데이터를 활용해 입증하도록 한다.

## II. 본 론

### 1. SAR 영상 획득 기하 모델

SAR 영상 획득을 위한 기하 모델을 그림 1에 나타내었다. 방위 방향(azimuth)으로 비행체 비행 중 레이더 펄스의 송신 및 수신은 등 간격 위치에서 이루어질 수 있도록 PRF(Pulse Repetition Frequency) 실시간 제어를 수행하게 된다. 엄밀히 말하면, 비행체는 계속 이동하면서 레이더 펄스를 송신하고 수신하게 되나, “Start and Stop 근사화”를 이용하여, 고정된 위치에서 펄스를 송신하고 수신하였다고 가정한다. 이는 SAR 필드에서 일반적으로 사용하는 가정으로, 비행체의 속도가 전자

파의 이동속도(=빛의 속도)보다 느릴수록 타당해진다. 요구 해상도를 달성하기 위해서 합성 개구면 거리(Synthetic Aperture Length, SAL)를 비행하면서 데이터를 획득하게 되며, Spotlight 모드로 영상을 획득하기 위해서 영상 획득 동안, SAR 안테나가 영상 중심 점(scene center)을 바라보며 데이터 획득이 가능하도록, 전자적 또는 기계적 방식을 통해 빔을 실시간 조향하면서 수신신호를 획득하게 된다. 실제로는 난기류나, 바람 등의 영향으로 인해 이상적인 직선 궤적(ideal linear trajectory)에서 벗어나게 되는 요동을 경험(actual trajectory)하며 비행 하게 된다.

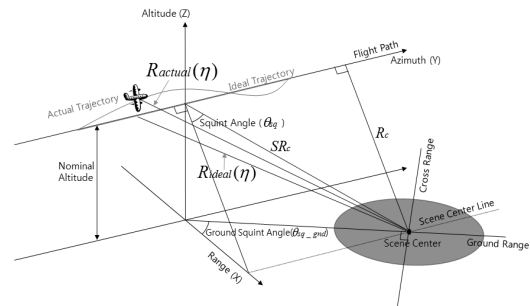


그림 1. SAR 영상 획득 기하 모델

Fig. 1. SAR data acquisition geometry model.

### 가. 수신 신호 모델

우리는 LFM(Linear Frequency Modulation) 펄스를 송신 신호로 사용하고, 시선 거리 방향(radial range)으로 dechirp을 적용한 시스템 (dechirp on receive)에서 BPA를 적용하기로 하였으므로, dechirp 연산을 통해 거리 압축을 수행하게 되며, range deskew 연산을 통해서 residual video phase를 제거<sup>[1]</sup>한 수신 신호 신호를 아래 수식 (1)처럼 표현할 수 있다.

$$s_{rd}(\tau, \eta) = A_1 w_a(\eta - \eta_c) w_r(\tau - 2SR_c/c) \exp(j\Phi_{rd}(\tau, \eta))$$

where

$$\Phi_{rd}(\tau, \eta) = -\frac{4\pi\gamma}{c} \left( \frac{f_c}{\gamma} + \tau - \frac{2SR_c}{c} \right) (R(\eta) - SR_c) \quad (1)$$

$\tau$ 는 거리 방향 시간,  $\eta$ 는 방위 방향 시간,  $\eta_c$ 는 방위 방향의 합성 개구면 시간(Synthetic Aperture Time, SAT)의 중심,  $c$ 는 빛의 속도,  $f_c$ 는 캐리어 주파수,  $\gamma$ 는 chirp rate,  $A_1$ 은 반사 표적 RCS (Radar Cross Section)의 Square Root,  $R(\eta)$ 는 위치 측정 오차가 없는 이상적인 APC와 표적들 사이의 거리,  $SR_c$ 는 이상적인 궤적의 중심점에서 표적 지역 중심점 사이 경사거

리,  $w_a$ 는 방위 방향 윈도우,  $w_r$ 은 거리 방향 윈도우를 나타낸다. 이 신호는 표적 지역에서 반사되어 들어온 표적 신호들의 중첩(superposition) 이므로, dechirp 연산의 중심 거리  $SR_c$ 에 위치한 표적을 중심으로 수신 윈도우 내 다른 시선 거리에 있는 신호들의 거리 차이 만큼 선형 위상 차이로 나타나는 신호들의 중첩이 된다.

### (1) 거리 압축 신호

(1) 수식은 거리 방향 dechirp에 의한 정합 필터(matched filter)가 이루어진 수신 신호이므로,  $\tau$  도메인은 시간 영역이 아닌 거리 방향 주파수 도메인으로 해석해야 하고, 이를 거리 압축 신호로 표현하기 위해서는 거리 방향으로 역푸리에 변환을 적용해야 하며, 그 결과는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$s(f_r, \eta) \approx w_a(\eta - \eta_c) \text{sinc}\left(\frac{2B(R(f_r, \eta) - SR_c)}{c}\right) \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda}(R(f_r, \eta) - SR_c)\right] \quad (2)$$

$f_r$ 는 역푸리에 연산에 의한 거리 방향 인덱스이며, dechirp 연산에 의하여 주파수로 나타나는 표적 지역 표적들의 위치를 거리로 변환할 때 사용한다. 수신 신호의 크기 및 상수 항등은 논문 전개에 영향을 주지 않으므로 여기서는 고려하지 않기로 한다. 즉 송신펄스의 대역폭  $B$ 로 해상도가 결정되는 windowed sinc 함수가 거리 압축 신호이다.

## 2. 역투영 알고리즘 (BPA)

BPA는 펄스 방사 시점의 위치와 영상 표적들 사이의 거리를 안다고 했을 때, 그 거리를 이용하여 모든 표적들의 거리 압축 신호를 각각 요동 보상하면서, 동시에 방위 압축을 수행하는 시간 영역 알고리즘이다.

### 가. BPA 원리

쉽게 설명하기 위해, 영상 중심에 있는 하나의 표적에 대해서만 고려한다. 그 위치를  $T_c(X_c, Y_c, Z_c)$ 라고 하면, SAL 동안 APC와  $T_c$  사이의 거리를  $R_{T_c}(\eta)$ 라고 한다. 각 펄스 방사 위치에서 획득한 수신 신호 벡터에서  $R_{T_c}(\eta)$ 와  $SR_c$  사이의 차이만큼 거리 압축 신호를 이동 시킨 후, 위상 보상을 수행하여 SAL 동안의 방위 샘플 개수인  $L$ 개의 거리 방향 벡터로부터 획득한 펄스에 대해서 코히런트 합을 구하면 방위 압축 신호를 얻

게 된다. 방위 압축 필터를  $h_p$ 라고 하면 수식 (3)을 통해  $T_c$ 에 위치한 표적의 방위 압축 신호를 구하게 된다.

$$I(T_c) \approx \int \text{sinc}\left(\frac{2B(R_{T_c}(\eta) - SR_c)}{c}\right) \cdot \exp\left[-j\frac{4\pi}{\lambda}(R_{T_c}(\eta) - SR_c)\right] \cdot h_p^*(\eta) d\eta$$

where  $h_p(\eta) = \exp(-j\frac{4\pi}{\lambda}(R_{T_c}(\eta) - SR_c))$  (3)

기호 \*는 켈레 복소수(complex conjugate)를 의미하며, 실제로 우리는 PRI(Pulse Repetition Interval)에 의해 샘플링 된 신호를 획득하게 되므로 다음 수식 (4)로 표현할 수 있다.

$$I(T_c) \approx \sum_{l=1}^L \text{sinc}\left(\frac{2B(R_{T_c}(\eta_l) - SR_c)}{c}\right) \cdot \exp(-j\frac{4\pi}{\lambda}(R_{T_c}(\eta_l) - SR_c)) \cdot h_p^*(\eta_l)$$

where  $h_p(\eta_l) = \exp(-j\frac{4\pi}{\lambda}(R_{T_c}(\eta_l) - SR_c))$  (4)

즉 하나의 표적에 대하여 방위 방향 펄스 압축하기 위해서 위와 같은 연산을 수행하게 되며, 표적 지역을 거리 방향으로  $M$ 개, 방위 방향으로  $N$ 개 만큼의 표적이 존재한다고 정의한다면,  $N \times M$ 개의 표적에 대해서 위 수식 (4)를 이용하여 동일한 연산을 반복 수행할 경우, 영상 형성이 가능 하다. 실제로 획득한 데이터에 BPA를 적용할 경우에는, 그 표적 지역의 DEM (Digital Elevation Model) 정보를 활용 할 수 있다면, 비행체 방사 위치와 표적 지역 사이의 거리를 좀 더 정확히 알 수 있게 되어, 정확한 영상 형성이 가능하나, 이 논문에서 표적 지역은 영상 중심 지역을 기준으로 관측측 내에서 편평하다고 가정(flatness assumption)하였다. 거리 방향 샘플링 주파수에 의해서 이산적인 수신 신호를 획득하게 되는 데, BPA에서는 안테나 위상 중심점 위치와 표적들 사이의 거리와  $SR_c$  사이의 거리차가 샘플링 위치 사이의 값으로 표현해야 하는 경우가 대부분 이므로, 반드시 거리 방향 내삽(interpolation) 연산을 충분히 크게 수행해서 거리 압축 신호를 정밀하게 이동 시켜야 샘플링에 의한 오차를 줄일 수 있다.<sup>[4]</sup>

### 나. 위치 측정 오차에 의한 열화

앞에서는 요동 측정 오차를 고려하지 않고 BPA 원리에 대해서 설명하였다. GPS/IMU에 의한 측정 위치



엄밀히 말하면,  $h=0$  일 때, 영상 형성면 상에서의 거리, 방위 부엽의 방향과 영상의 거리 축, 방위 축 방향이 일치 하게 되며,  $h \neq 0$  일 때에는 축이 정확히 일치하지 않게 된다. 하지만,  $SR_c$ 가  $h$ 보다 훨씬 크다는 가정 ( $SR_c \gg h$ )은 SAR 체계 설계 및 운용 관점에서 매우 타당하며, 그 차이가 크면 클수록  $\theta_{sq\_gnd}$ 와  $\theta_{sq}$ 의 차이는 작아지게 되므로, 영상 형성면 상에서의 거리, 방위 부엽의 방향과 영상의 거리 축, 방위 축은 AF가 충분히 가능 한 수준, 즉 방위 방향 도플러 신호가 거리 방향 해상도 셀 간격(range bin) 이내로 들어오게 된다.

### 3. BPA 영상의 PGA 적용 방법

PGA는 가우시안 잡음이 존재한다는 가정 하에 ML(Maximum Likelihood) 관점에서 최적이라고 잘 알려진 신호처리 기반의 위상 오차 추정 알고리즘이다<sup>[1~2]</sup>.

위의 수식 (6)에서처럼 요동 측정 오차는 방위 위상 오차와 잔여 RCM(Range Cell Migration)에 의한 위치 오차로 나타나게 된다. 잔여 RCM에 의한 성능 저하는 방위 방향 도플러 신호가 거리 방향 해상도 셀 간격 이내로만 위치한다면, 실제 방위 압축 성능 저하에 미치는 영향이 매우 작게 된다. 따라서 이를 보상하지 않는 것이 대부분의 AF 접근 방식에서 하는 가정이며, PGA에서도 성능 저하에 예민한 영향을 미치는 방위 위상 오차만 보상하게 된다.

PGA는 반복 적용(iterative method) 방식에 의해서 추정 성능을 높이게 되며 이론적으로는 오차에 대한 모델링이 필요 없으므로 고차항의 위상 오차까지도 추정이 가능하다. 좋은 점표적 후보(Region of Interest. ROI)들을 일부 선정하는 기법<sup>[10]</sup>을 적용하여 알고리즘을 수행할 경우, 영상 전체에 대한 PGA 적용 시 보다, 매우 빠르게 수렴하면서도 견고한 성능을 기대할 수 있다. 다만 PGA는 기본적으로 방위 dechirp에 의한 영상 형성을 수행하는 PFA에 적합한 형태로 개발된 알고리즘<sup>[2]</sup>이므로 PFA와 달리 방위 방향 최종 영상 도메인이 시간 영역이 되는 경우에는 별도의 고려가 필요하다. 예로, RMA 같은 다른 SAR 영상 형성 알고리즘에 적용하기 위해서는, 일반적인 PGA 적용 전에 전처리 연산을 반드시 수행하여야 원하는 성능 개선 효과를 기대할 수 있다.<sup>[11]</sup>

가. Extended Phase Gradient Autofocus (EPGA)  
W. L. Van Rossum은 RMA에 의한 영상 형성 이후

일반적인 PGA 적용 전, 전처리 연산을 통해서 PGA 적용이 RMA에 대해서도 가능하고 전체 영상에 대해 효과적인 성능 개선이 가능함을 보였다<sup>[11]</sup>.

Spotlight 모드로 획득한 데이터에 주파수 영역 알고리즘에 의한 영상 형성 결과, SAL의 중심 위치로부터 같은 거리에 위치하고 방위 방향으로 서로 떨어져 있는 두 개의 표적은, 방위 푸리에 변환을 통해 주파수 영역에서 보면, 영상 중심 위치로부터 거리 차이의 함수로 표현 가능한 도플러 주파수만큼 서로 떨어진 위치에 동일한 형태의 위상 오차 응답 특성을 갖게 된다. PGA는 여러 표적들의 위상 오차 응답 특성들을 수집하여 평균적으로 오차를 추정하는 알고리즘이므로, 위상 오차 응답 특성들은 반드시 서로 정렬하여 존재하여야 정확한 위상 추정에 의한 성능 개선이 가능하다. 방위 방향 위상 오차 응답 특성을 영상 중심 위치한 표적의 도플러 대역으로 정렬하기 위한 도플러 위치 정렬 함수 수식은 다음과 같다<sup>[11]</sup>. 이 수식 (8)은 스캔트가 존재하더라도 비행체 진행 방향과 영상의 방위 방향이 같은 경우, RMA에 의한 경사 평면 영상을 위한 수식이다.

$$\Phi = \exp\left(-j \frac{2\pi \cos^2(\theta_{sq})}{\lambda \overline{SR}} \frac{y^2}{2}\right) \quad (8)$$

여기서  $\overline{SR}$ 은  $1 \times M$  경사거리 벡터,  $\bar{y}$ 는  $N \times 1$  방위 방향 중심을 기준으로 한 관측폭 위치 벡터가 되며, 도플러 위치 정렬 함수  $\phi$ 는  $N \times M$  행렬이 된다.

#### 나. BPA 적용 위한 전처리 함수 설계

대표적인 거리-방위 시간 영역 알고리즘인 BPA에 의한 영상 형성 과정과 거리-방위 주파수 영역 알고리즘인 RMA에 의한 영상 형성 과정은 서로 반대 도메인에서 이루어지는 완전히 다른 알고리즘이지만, 최종 영상이 형성되는 방위 영역은 시간 영역으로 동일하다. 이는 Spotlight 모드로 획득한다고 했을 때, 두 알고리즘에 의한 최종 영상 형성 결과를 각각 방위 푸리에 변환을 통해 도플러 대역에서 관찰할 경우, 신호 특성이 동일할 수 있음을 의미한다. 이는 RMA에 PGA 적용을 위한 전처리 연산이 필요하다고 했을 때, BPA에서도 PGA 적용을 위해선 마찬가지로 전처리 연산이 필요함을 유추할 수 있다.

우리는 BPA에 의한 영상 형성 결과 방위 방향 표적 위치가 다를 때, 그 간격의 함수로 도플러 대역에서 떨어지게 됨을 보이고, 스캔트 모드를 위해 선언한 영상

형성면을 고려해서 BPA용 방위 도플러 위치 정렬 함수를 새롭게 유도하고, 이의 적용을 통해 도플러 위치 정렬이 가능함을 보인다.

SAL 동안 방위 방향으로 서로 떨어져 있는 세 개의 표적  $T_n, T_c, T_f$  이 있다고 하자. 세 개의 표적이 각각 겪게 되는 도플러 대역폭은 각각 아래 수식 (9)의 도플러 주파수를 중심으로 나타나게 된다. 여기서  $v$  는 비행체 진행 방향의 속도이다. 이를 그림으로 표현하면 그림 4과 같다.

$$f_{T_n} = \frac{2v}{\lambda} \sin(\theta_{sq_n}) \quad (9)$$

$$f_{T_c} = \frac{2v}{\lambda} \sin(\theta_{sq_c})$$

$$f_{T_f} = \frac{2v}{\lambda} \sin(\theta_{sq_f})$$

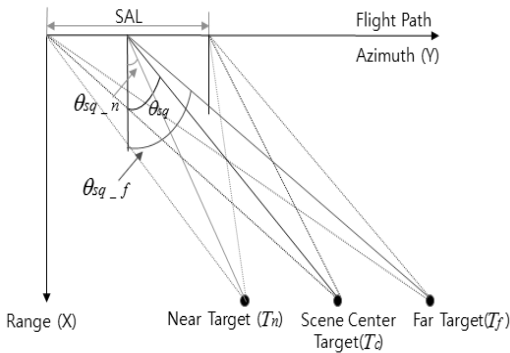


그림 4. 표적위치에 따른 도플러 대역폭 생성 기하  
Fig. 4. Doppler bandwidth acquisition geometry depending on the target locations.

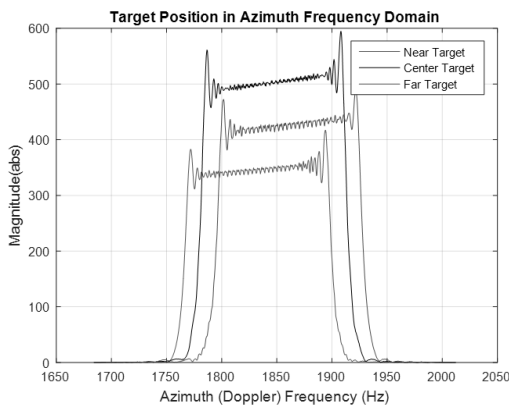


그림 5. 표적위치에 따른 도플러 대역폭 위치  
Fig. 5. Doppler bandwidth location geometry depending on the target locations.

이를 확인하기 위해  $\theta_{sq} = 35^\circ$  일 때, 그림 4와 동일한 조건으로 시뮬레이션 하여 BPA에 의한 영상 형성 후

방위 푸리에 변환을 적용하여 방위 주파수 영역에서 각 표적의 위치를 그림 5에 나타내었다. 방위 방향의 서로 떨어져 있는 표적은 방위 도플러 영역에서도 동일한 대역폭을 갖으며 스킨트에 의한 중심 주파수 차이만큼 떨어져서 나타나고 있음을 확인할 수 있다.

즉 BPA에서도 PGA를 적용하기 위해서는 방위 도플러 위치 정렬이 반드시 필요함을 유추할 수 있으며, 방위 도플러 위치 정렬 함수를 유도하기 위한 기하는 그림 3에 나타내었다.

수식 (9)로 부터 도플러 주파수  $f_d$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$f_d = \frac{2v}{\lambda} \frac{y}{SR_c} = \frac{2v}{\lambda} \frac{y}{\sqrt{R_c^2 + y^2}} \quad (10)$$

영상 형성면은 스킨트를 고려해서 정의 되었으므로, 최종 영상의 방위 축은 더 이상 Y 축이 아닌 GC 축이 되므로 방위 도플러 위치 정렬 함수 또한 수식 (8)과 달리 GC 축 방향으로 유도하여야 한다. GC 축 방향 단위 거리  $\Delta u$  에 차이에 해당하는 도플러 주파수에서의 차이는 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\Delta f_d = \frac{df_d}{du} \Delta u \quad (\because u = y \cos(\theta_{sq\_gnd}))$$

$$= \frac{2v}{\lambda} \frac{d}{du} \frac{u}{\cos(\theta_{sq\_gnd})} \Delta u$$

$$= \frac{2v}{\lambda} \frac{1}{\cos(\theta_{sq\_gnd})} \left( \frac{1}{SR_c} - \frac{u \left( \frac{u}{\cos^2(\theta_{sq\_gnd})} \right)}{SR_c^3} \right) \Delta u$$

$$= \frac{2v}{\lambda} \frac{1}{\cos(\theta_{sq\_gnd})} SR_c \left( 1 - \frac{u^2}{\cos^2(\theta_{sq\_gnd}) SR_c^2} \right) \Delta u$$

$$= \frac{2v}{\lambda} \frac{1}{\cos(\theta_{sq\_gnd})} SR_c \left( \frac{SR_c^2 - y^2}{SR_c^2} \right) \Delta u$$

$$= \frac{2v_u}{\lambda} \frac{\cos^2(\theta_{sq})}{\cos^2(\theta_{sq\_gnd})} SR_c \Delta u \quad , (\because v_u = v \cos(\theta_{sq\_gnd})) \quad (11)$$

수식 (11)에서의 유도한 도플러 주파수로부터 도플러 위치 정렬 함수인 수식 (12)를 구하게 된다.

$$\begin{aligned}
 \bar{\phi} &= 2\pi \int \Delta f dt \\
 &= \frac{2\pi}{\lambda} \int \frac{2v_u \cos^2(\theta_{sq})}{\cos^2(\theta_{sq\_gnd}) SR_c} \Delta u dt \\
 &= \frac{2\pi}{\lambda} \int \frac{2v_u \cos^2(\theta_{sq})}{\cos^2(\theta_{sq\_gnd}) SR_c} v_u \Delta t dt (\because \Delta u = v_u \Delta t) \\
 &= \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\cos^2(\theta_{sq})}{\cos^2(\theta_{sq\_gnd}) SR_c} (v_u \Delta t)^2 \\
 &= \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\cos^2(\theta_{sq})}{\cos^2(\theta_{sq\_gnd}) SR_c} \bar{u}^2
 \end{aligned} \tag{12}$$

$\bar{u}$ 는  $N \times 1$  벡터이며, 수식 (12)에서  $SR_c$  대신 거리  $1 \times M$  경사 거리 벡터  $\overline{SR}$ 로 대치하면, 관측폭 시작부터 끝까지의 경사 거리의 차이를 반영한  $N \times M$  도플러 위치 정렬 함수 행렬  $\Phi_{BPA\_sq}$  을 수식 (13)처럼 표현할 수 있다. 수식 (8)과 달리 지상 스핀트 영상 형성면의 축 정의로 인해, 달라진 방위 축과, 지상 스핀트 각도가 함수에 포함되어 나타남을 알 수 있다.

$$\Phi_{BPA\_sq} = \exp\left(-j \frac{2\pi}{\lambda} \frac{\cos^2(\theta_{sq}) \bar{u}^2}{\cos^2(\theta_{sq\_gnd}) \overline{SR}}\right) \tag{13}$$

수식 (13)을 앞서 BPA 영상 형성 시뮬레이션으로 생성한 3개의 점표적 영상에 전처리 도플러 위치 정렬 함수로 적용한 결과를 아래 그림 6에 나타내었다. 도플러 위치 정렬 함수 적용 전 방위 주파수 영역에서 서로 떨어져 있던 3개의 표적 모두  $f_{Tc}$ 를 중심 주파수로 하는 위치로 정렬되고 있음을 확인할 수 있다.

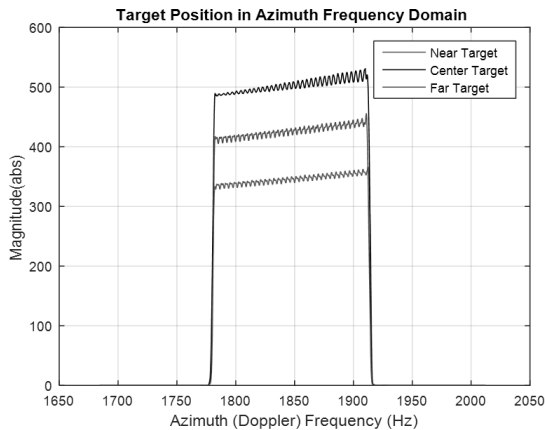


그림 6. 도플러 위치 정렬 함수 적용 결과  
Fig. 6. The result by applying doppler location alignment.

도플러 위치 정렬 함수에 의한 전처리가 끝나고 나면 기존에 잘 알려진 PGA에 의한 AF를 수행이 가능하며, 이로 인한 잔여 방위 위상 오차의 보상이 가능하다.

이 논문에서 제안한 영상 형성 전체 과정을 블록 다이어그램으로 표현하면 다음 그림 7과 같다.

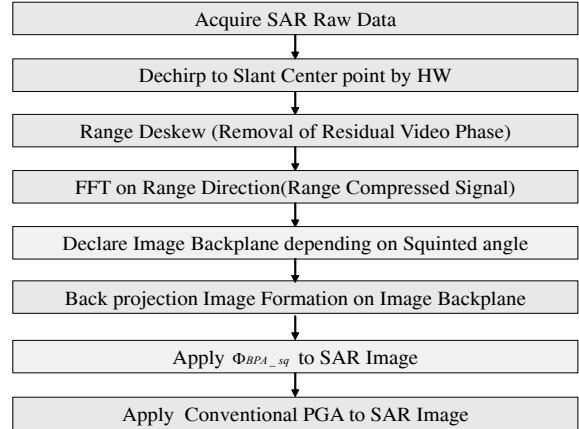


그림 7. BPA 영상 형성 블록 다이어그램  
Fig. 7. BPA image formation block diagram.

### III. 실험

우리는 제안한 방식의 성능을 입증하기 위해, 비행 시험을 통해 획득한 SAR 원시 데이터를 활용하였다. 그림 8에 보는 것처럼 PIPER(PA31-350) 항공기를 선정 하여, 배면에 SAR 장비를 장착하였다. 비행체의 고도는 약 3 km 이며, 경사거리 33 km, 스핀트 각도 43 deg에서 획득한 SAR 원시데이터에 BPA를 적용하여 서브 미터급 영상 형성을 수행 하였다. 거리, 방위 윈도 위로 Taylor 윈도우를 적용 하였고, 이를 통해 영상 해상도와 PSLR (Peak Side Lobe Ratio), ISLR (Integrated Side Lobe Ratio)등의 부엽 성능 사이를 trade-off 하게 된다.



그림 8. SAR 원시데이터 획득용 항공기  
Fig. 8. Airplane for SAR raw data acquisition.

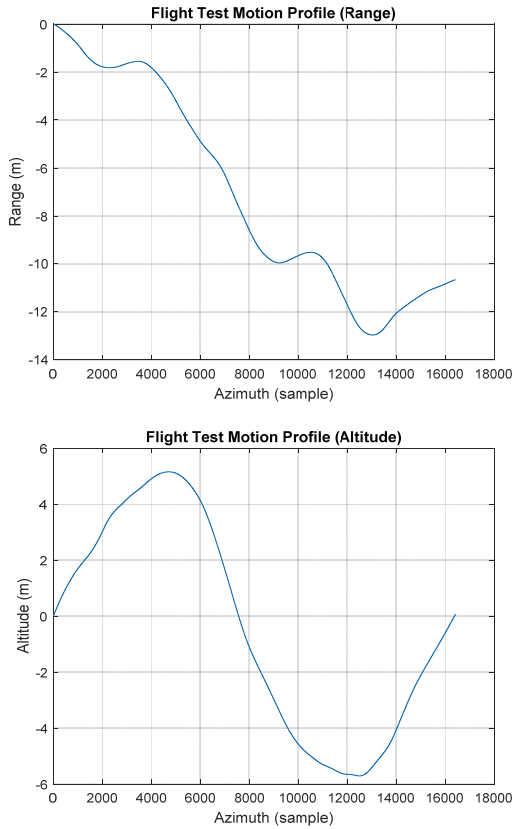
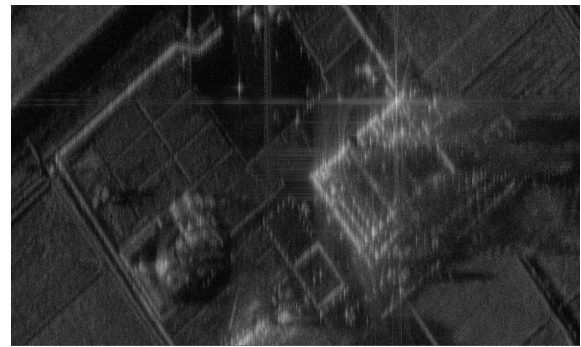


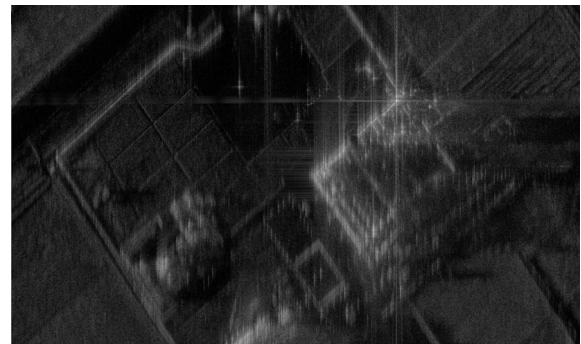
그림 9. 요동 측정 결과 (거리, 고도 방향 분해)  
 Fig. 9. Motion measurement results (range, altitude direction decomposition).

그림 9에 SAL 동안 비행체가 경험한 요동을 나타내었다. 거리 방향으로 약 13m, 고도 방향으로 약 11m 정도의 진폭을 갖는 요동을 경험하였음을 확인하였다. SAR의 최종 영상 형성 평면은 경사 평면 또는 지상 평면이기에, 고도 방향 요동 보다는 거리 방향 요동의 크기 및 주파수 특성 등이 방위 영상 품질에 큰 영향을 미치게 된다.

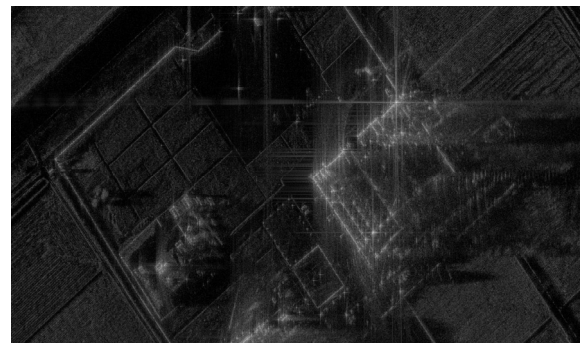
그림 10은 스킨트 각도를 고려해서 영상 형성면을 정의하고 영상 형성을 수행한 결과로서 가로축은 지상 거리(GR) 축이며, 세로축은 지상 방위(GC) 축을 의미한다. (a)는 PGA를 적용하지 않은 SAR 영상 형성 결과이다. 잔여 오차로 인한 방위 방향 영상 품질 저하가 뚜렷하게 나타나고 있음을 쉽게 확인할 수 있다. (b)는 BPA 영상 형성 이후 도플러 위치 정렬 함수를 적용하지 않은 채, PGA를 바로 적용한 결과이다. (a) 대비 영상의 상단 부분은 일부 성능 개선이 된 것으로 나타나고 있으나, 영상의 하단 부분은 오히려 (a) 대비 영상 품질이 저하되어 나타나고 있음을 뚜렷하게 확인할 수 있으므로 이는 PGA에 의한 방위 방향 성능 개선이 되었다고 판단하기 어렵다. (c)는 본 논문에서 제안한 도플러 위치



(a) SAR image without PGA(no autofocus)



(b) SAR image with PGA, without doppler position alignment processing



(c) SAR image with doppler position alignment processing, and PGA (proposed method)

그림 10. BPA+PGA에 의한 SAR 영상 형성 결과  
 Fig. 10. SAR image formation results by BPA+PGA.

정렬 함수를 영상 형성 후 영상 영역에서 적용하여, 도플러 영역의 위치 정렬을 수행하고 나서, PGA를 적용한 결과이다. (a)와 비교해서 보면, 영상 전체적으로 방위 방향 성능이 크게 개선되어 선명한 영상을 형성할 수 있음을 확인할 수 있으며, 동일한 PGA를 적용한 (b)와 비교해서도 PGA에 의한 성능 개선이 크게 이루어졌음을 확인하였다.



### IV. 결 론

요동이 존재하는 환경에서, 요동 측정 오차에 의한 성능 저하가 필연적인 항공기 탑재용 SAR의 경우, 이를 신호처리로 보상하는 기법인 AF의 적용은 필수적이다. Broadside 모드와 달리 스윕트 모드에서는 동일 해상도를 위해 필요한 SAL이 증가하게 되므로, 더 많은 요동을 경험하게 되고, 이로 인해 요동 측정 오차에 의한 열화가 심각하게 발생할 수 있다. 본 논문에서는 스윕트 모드에서 AF의 직접 적용이 가능한 형태의 BPA 영상 형성 방식을 제안하고, 또 효과적으로 PGA를 적용하기 위한 BPA용 전처리 함수를 유도하였고, 제안한 방식의 필요성 및 성능 개선 효과를 자체 비행 시험을 통해 획득한 실제 SAR 원시데이터에 적용하여 입증하였다.

향후에는, 연산량이 많은 Standard BPA 대신 Fast BPA 등의 연산량 개선 알고리즘에 제안한 방식을 적용할 예정이며, DEM 적용 등도 고려하여, 영상 품질 개선과 연산 성능 개선 등을 지속적으로 수행할 예정이다.

### REFERENCES

- [1] Walter G. Carrara, Ron S. Goodman and Ronald M. Majewski, Spotlight Synthetic Aperture Radar Signal Processing Algorithms, Artech House, 1995.
- [2] C.V. Jakowatz, et al, Spotlight-Mode Synthetic Aperture Radar: A Signal Processing Approach, KUEWER ACADEMIC PUBLISHERS, 1996.
- [3] Mehrdad Soumekh, Synthetic Aperture Radar Signal Processing with Matlab Algorithms, JOHN WILEY & SONS, INC, 1999
- [4] Ali F. Yegulalp, "Fast Backprojection Algorithm for Synthetic Aperture Radar", In Proceedings 1999 IEEE Radar Conference, Waltham, MA, pp. 60-65, April 20-22, 1999.
- [5] LARS M. H. ULANDER, HANS HELSTEN and GUNNAR STENSTRÖM, "Synthetic-Aperture Radar Processing Using Fast Factorized Back-Projection", IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems, Vol. 39, no. 3, pp. 760-776, July, 2003
- [6] Karlus A. Camara de Macedo and Rolf Scheiber, "Precise Topography- and Aperture-Dependent Motion compensation for Airborne SAR", IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, Vol. 2, No. 2, pp. 172-176, April, 2005
- [7] Lei Ran, et al, "Multiple Local Autofocus Back-Projection Algorithm for Space-Variant

- Phase-Error Correction in Synthetic Aperture Radar", IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters, Vol. 13, No. 9, pp. 1241-1245, September, 2016.
- [8] Joshua 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, January, 2012
- [9] WeiXian TAN, DaoJing LI and Wen HONG, "Airborne Spotlight SAR Imaging with Super High Resolution based on Back-Projection and Autofocus Algorithm", in Proc. IEEE IGARSS, boston, MA, USA, vol. 4, pp. IV-1300-IV-1303 July, 2008.
- [10] Hian Lim Chan and Tat Soon Yeo, "Non-iterative Quality Phase-Gradient Autofocus (QPGA) Algorithm for Spotlight SAR Imagery", IEEE Trans. Geoscience and Remote Sensing, Vol. 36, No. 5, pp. 1531-1539, September, 1998.
- [11] W. L. Van Rossum, M. P. G. Otten and R. J. P. Van Bree, " Extended PGA for Range Migration Algorithms", IEEE Trans. Aerospace and Electronic Systems, Vol. 42, No. 2, pp. 478-488, April, 2006.

### — 저 자 소 개 —



황 정 훈(정회원)

2003년 한양대학교 전자전기컴퓨터공학부 학사 졸업.  
2005년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사 졸업.  
2005년 국방과학연구소 선임 연구원(현).

2015년 충남대학교 전자공학과 박사 과정(현).  
<주관심분야: SAR 신호처리, SAR 체계 설계>



김 환 우(평생회원)-교신저자

1977년 서울대학교 전자공학과 학사 졸업.  
1979년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 석사 졸업.  
1988년 University of Utah 전자공학과 박사 졸업.

1980년~현재 충남대학교 전자공학과 정교수.  
<주관심분야: 레이더/SAR 신호처리, 디지털 신호처리, 디지털 통신>