

## 항공기 탑재 SAR에서 거리 도플러 알고리즘을 이용한 Stripmap 데이터의 Spotlight SAR 처리 기법

### Spotlight SAR Processing of Stripmap Data using a Range Doppler Algorithm in Airborne SAR

황 정 훈 · 김 형 석 · 윤 상 호

Jeonghun Hwang · Hyung-Suk Kim · Sang-Ho Yoon

#### 요 약

광역 빔 폭으로 획득한 stripmap SAR 원시데이터에 대해서 RDA(range doppler algorithm)을 이용하여 spotlight SAR 영상 형성 시 필요한 고려 사항들을 제시한다. 항공기 탑재 SAR(synthetic aperture radar)에서 영상 품질 개선을 위해 필수적인 자동 초점(autofocus, AF) 기법 적용 시 RDA에 의한 spotlight 영상 형성 이후 필요한 전처리 기법들을 제안한다. 그리고 spotlight 영상 블록들의 방위 방향 매칭을 통해 광역의 stripmap SAR 영상 형성이 가능함을 보이도록 한다. 자체 비행 시험을 통해 확보한 stripmap SAR 원시데이터에 제안한 처리 기법을 적용한 결과를 통해 제안 기법의 유효성을 입증하도록 한다.

#### Abstract

This study presents the considerations needed to create a spotlight SAR image of wide beam stripmap data using a range doppler algorithm (RDA). We propose applying preprocessing methods to the conventional autofocus method, which is necessary for airborne SAR to spotlight images captured by the RDA. Finally, it is proven that a wide swath stripmap SAR image can be generated through the azimuth matching of spotlight image blocks. The wide beam stripmap raw data acquired by the flight test was used to validate the proposed processing method.

Key words: Stripmap, Spotlight, RDA, Autofocus, Airborne SAR

#### I. 서 론

SAR의 대표적인 운용 기법으로 spotlight, stripmap 모드가 있다. Spotlight 모드는 영상 획득 동안 SAR 안테나가 영상 중심점을 지향하도록 안테나 빔을 조향하며 획득하

기에 합성 개구면 각도(synthetic aperture angle)를 방위 빔 폭에 상관없이 증가시킬 수 있으므로 방위 방향으로 고 해상도 영상 획득이 가능한 반면, 영상의 방위 관측폭이 빔 폭에 의해서 제한된다<sup>[1]</sup>. 이와 달리 stripmap 모드는 안테나 방향은 비행체 진행 방향과 직교하는 측면 방향

국방과학연구소 레이더/전자전기술센터 (Radar & EW Technology Center, Agency for Defense Development)

· Manuscript received June 17, 2021 ; Revised July 15, 2021 ; Accepted August 18, 2021. (ID No. 20210617-063)

· Corresponding Author: Jeonghun Hwang (e-mail: jhhwang@add.re.kr)

(side-looking)으로 고정시켜 놓고 영상을 획득하게 되므로 방위 방향으로 관측폭 제한 없이 영상 획득이 가능하나, 방위 해상도가 안테나 유효 빔 폭에 의해서 제한된다<sup>[2]</sup>. 따라서 고해상도 모드로 집중 감시가 필요한 지역의 영상 획득 시에는 spotlight 모드의 운용을 고려하며, 넓은 지역에 대해 정찰 목적의 영상 획득 시에는 상대적으로 해상도를 낮춘 stripmap 모드 운용을 고려한다. 항공기 SAR의 경우, 임무 중 바람, 진동 등에 의한 요동을 경험하게 되며, GPS/IMU와 같은 항법 장치에 의한 요동 보상 이후 잔여 오차를 추정하여 제거하는 데이터 기반의 자동 초점(autofocus, AF) 기법을 반드시 적용해야 한다.

Stripmap 모드 데이터를 spotlight 모드로 처리하기 위한 연구가 수행<sup>[3]~[6]</sup>되었으나, 어떻게 AF를 적용해야 최종 성능 개선이 가능한지까지 포함하지는 않았다. 본 논문에서는 항공기 탑재 SAR에서 stripmap 모드로 획득한 데이터에 대해서 spotlight SAR 모드 형태의 데이터 처리 및 AF 적용 기법을 제시한다. Stripmap 모드의 요구 방위 해상도 대비 충분히 넓은 빔 폭 가정이 타당할 경우<sup>[5],[6]</sup>, stripmap 모드 알고리즘인 RDA를 이용한 spotlight SAR 처리 형태의 영상 형성 기법을 설명한다. 그리고 AF 전처리 함수 적용을 통해 기존의 AF 기법을 수정 없이 쉽게 적용할 수 있음을 보이며, 방위 방향 영상 품질 개선에 필수적임을 보인다. 그리고 spotlight SAR 처리한 영상 블록들의 방위 방향 병합을 통해 최종적으로 방위 방향으로 stripmap 모드의 연속 영상 형성이 가능함을 실제 비행시험을 통해 획득한 원시데이터를 처리하여 보이도록 한다.

## II. 본 론

### 2.1 시스템 설계 고려 사항

Stripmap 모드 원시 데이터를 spotlight 모드로 처리하기 위해서는 방위 해상도와 관측폭 사이의 관계 및 기하학적 제한 사항을 반드시 고려해야 한다. 이론적으로 stripmap 모드에서 점표적의 방위 해상도는 그림 1처럼 방위 방향 최대 유효 빔 폭인  $\theta_{eff}$ 으로만 제한되지만<sup>[2]</sup>, 그림 2와 같이 요구 해상도 대비 실제 안테나의 유효 빔 폭이 충분히 큰 경우라면, 요구 방위 해상도  $\rho_{az}$ 는 식 (1)처럼  $\theta_{eff}$  대신  $\theta_{syn}$ 의 함수로 표현할 수 있다<sup>[1]~[3]</sup>.

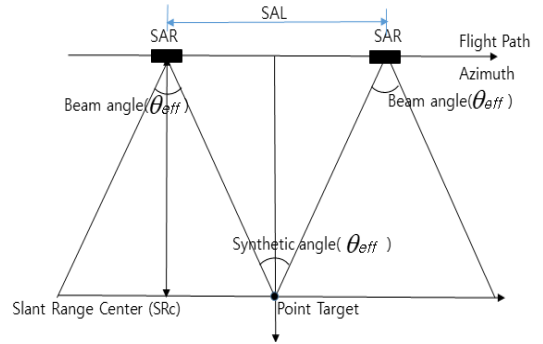


그림 1. 일반적인 stripmap SAR 모드  
Fig. 1. Conventional stripmap SAR mood.

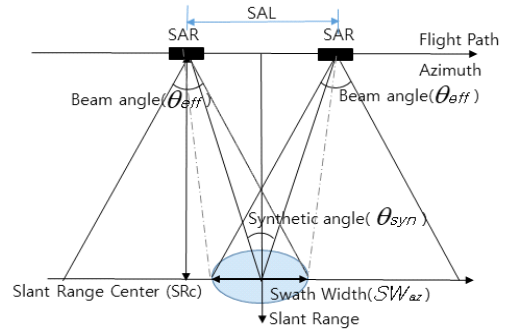


그림 2. Stripmap 모드의 spotlight 변환 기하  
Fig. 2. Geometry in stripmap to spotlight conversion.

$$\begin{aligned}\rho_{az} &\approx \frac{\lambda}{4\sin(\theta_{syn}/2)} \\ &\approx \frac{\lambda}{2\theta_{syn}}\end{aligned}\quad (1)$$

여기서  $\lambda$ 는 송신 주파수의 파장,  $\theta_{syn}$ 는 합성 개구면 각도를 의미한다.  $\theta_{syn}$ 는  $\theta_{eff}$ 보다 항상 작게 되며, spotlight 모드로 처리 가능한 방위 관측폭  $SW_{az}$ 는 그림 2에서처럼 나타나며, 식 (2)로 표현할 수 있다<sup>[3]</sup>.

$$SW_{az} = 2SR_c \left[ \tan\left(\frac{\theta_{eff}}{2}\right) - \tan\left(\frac{\theta_{syn}}{2}\right) \right] \quad (2)$$

작은 각도 근사(small angle approximation)로 위의 수식은 식 (3)과 같이 근사화해서 표현할 수 있다.

$$SW_{az} \approx SR_c [\theta_{eff} - \theta_{syn}] \quad (3)$$

식 (3)에서  $\theta_{eff}$ 과  $\theta_{syn}$ 이 같다면, 일반적인 stripmap 모

드 형태가 되어 spotlight 모드로 처리 가능한 관측폭은 이론적으로 전혀 발생하지 않으므로 본 논문에서 고려하지 않는 경우가 된다. 즉,  $\theta_{syn}$  이 작아질수록, 즉 요구 해상도를 낮출수록,  $SW_{az}$  은 커지게 된다. 요구 해상도 만족을 위한 합성 개구면 길이(synthetic aperture length, SAL) 동안 비행체가 이동하면서 stripmap 모드로 운용했을 때,  $SW_{az}$  이내의 모든 표적들에 대해서는 마치 spotlight 모드로 획득한 데이터로 간주할 수 있다. SAL 대비  $SW_{az}$  가 너무 작을 경우, 최종 방위 방향 영상 병합에 필요한 영상들이 많아져 연산량에 부담이 되므로, 요구 방위 해상도에 의해서 결정되는  $SAL(\approx SRc \cdot \theta_{syn})$  대비  $SW_{az}$  가 너무 작아지지 않도록 해상도와 관측폭 사이 trade-off를 체계 설계에 반드시 고려해야 한다.

## 2-2 Spotlight 모드 데이터의 RDA 처리

RDA는 stripmap 모드의 대표적인 영상 형성 알고리즘으로서 기본적으로 거리 압축, 거리-도플러 영역에서 거리 셀 이주 보상 RCMC(range cell migration correction), 마지막으로 방위 압축을 통해 방위 시간 영역에서 영상을 형성하게 된다. 일반적인 stripmap 모드의 RDA 방위 압축 시에는 유효 빔 폭에 의한 방위 대역폭을 모두 고려하므로, 방위 위치가 다른 표적들이 경험하는 도플러 대역폭이 하나의 중심 주파수(스퀀트가 없을 때  $0^\circ$ )를 기준으로 동일하게 나타난다<sup>[2]</sup>. 다만 각 표적 별로 필요한 SAL의 시작 위치와 종료 위치가 방위 방향 표적 위치 별로 모두 달라지므로 각 표적 별로 다른 SAL 동안 경험하는 요동의 형태는 모두 달라지며, spotlight SAR와 달리 AF에 의한 성능 개선이 크게 저하되는 주요 원인이 된다<sup>[7]</sup>. 이와 달리 그림 2의 관측폭  $SW_{az}$  내의 모든 표적들은 spotlight 모드처럼 SAL 동안 동일한 요동을 경험한다. 즉, 관심 영역  $SW_{az}$  에 대해서 SAL동안 RDA에 의한 영상 형성 시 고려 사항은 다음 2가지로 요약할 수 있다.

### 2-2-1 $\theta_{syn}$ 에 의한 방위 정합 필터 생성

RDA의 방위 정합 필터는 다음 식 (4)로 모델링된다.

$$h_p(\eta) = \exp\left(-j\pi \frac{2v^2}{\lambda R} (\eta - \eta_c)^2\right), \quad -2/SAL \leq \eta \leq 2/SAL \quad (4)$$

여기서  $\eta$ 는 방위 방향 시간,  $\eta_c$ 는 방위 방향의 합성 개구면 시간(synthetic aperture time, SAT)의 중심,  $v$ 는 비행체의 비행 속도,  $R$ 은 경사거리 벡터를 나타낸다. 전체 유효 빔 폭  $\theta_{eff}$ 을 고려해야 하는 stripmap RDA에서 SAL은  $\theta_{eff}$ 에 의해서 결정되나, spotlight 처리 시에는  $\theta_{syn}$ 에 의한 SAL만을 고려해서 생성해야 한다.

## 2-2-2 방위 압축 전 방위 방향 Zero-Padding 수행

$\theta_{eff}$ 에 의한 광역 빔 폭보다  $\theta_{syn}$ 이 작은 경우이므로 방위 압축 이전에 반드시 방위 방향 영상 형성 영역에 충분한 zero-padding을 수행하여야만 방위 압축 이후 영상에서 방위 방향 aliasing에 의한 열화를 회피할 수 있다.

## 2-3 Spotlight RDA에서의 AF 적용 기법

RDA에 의한 SAR 영상 형성 시 RCMC 이후 항법 장치에 의한 요동 보상을 수행한다<sup>[8]</sup>. 이를 통해 요동에 의한 위치 오차는 거리 셀 이내의 크기로 감소시킬 수 있기에 무시가 가능하나, 방위 방향 잔여 위상 오차 성분은 영상의 해상도, 부엽 품질에 민감한 영향을 미치며, 큰 열화 요인이 된다. 품질을 개선하기 위한 AF 기법의 적용은 반드시 필요하며, 잘 알려진 PGA(phase gradient autofocus)의 경우, PFA(polar format algorithm)와 같은 방위 dechirp에 의한 영상 형성 알고리즘에 최초 제안된 알고리즘<sup>[1],[9]</sup>이기에 방위 펄스 압축을 통해 시간 영역에 영상을 형성하는 RDA에 바로 적용할 수 없다. 이를 극복하기 위해 RDA 처리 과정 중 방위 dechirp 신호를 만들어 위상 오차를 추정 및 보상하고, 방위 압축 시 적용하는 형태의 알고리즘이 제시되었으나, 매우 복잡하고 연산량이 많다는 단점이 있다<sup>[7]</sup>. 방위 시간 영역에 영상을 형성하는 2차원 주파수 영역 알고리즘인 RMA(range migration algorithm), 2차원 시간 영역 알고리즘인 BPA(back projection algorithm) 등에 의한 spotlight SAR 영상 형성 결과에 PGA를 적용하기 위한 연구가 이전에 수행되었다<sup>[10],[11]</sup>. Spotlight 모드에서 방위 방향으로 서로 떨어진 표적들의 도플러 대역은 중심 표적 위치 대비 각 표적의 방위 위치 차이에 의한 도플러 주파수 차이만큼 이격되어 나타난다. 즉, 각 표적의 방위 도플러 대역폭이 영상 중심 도플러 주파수를 중심

으로 정렬이 되어야 AF에 의한 위상 오차 추정 및 보상이 가능하므로 AF 적용 전 도플러 전처리 연산 반드시 필요함을 입증하였다. 이를 통해 spotlight RDA 영상에서도 AF를 적용하기 위해서는 도플러 전처리 연산이 반드시 필요함을 추정할 수 있다. 스캔트가 없다고 할 때, 도플러 위치 정렬함수 수식은 다음과 같이 나타난다<sup>[10],[11]</sup>.

$$\Phi = \exp\left(-j\frac{2\pi}{\lambda R}\bar{y}^2\right) \quad (5)$$

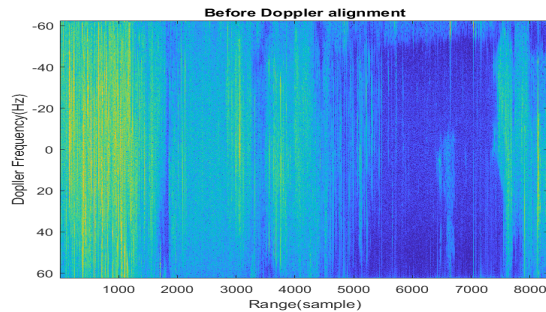
여기서  $\bar{R}$ 은  $1 \times M$  경사거리 벡터,  $\bar{y}$ 는  $N \times 1$  방위 방향 영상의 위치 벡터이다. 도플러 위치 정렬 함수  $\phi$ 는  $N \times M$  행렬이 되며, RDA 영상 영역에 적용할 경우, 방위 주파수 영역에서 도플러 정렬이 수행된 결과를 얻을 수 있으며, 이를 그림 3에 나타내었다. 거리 빈 별 모든 표적들이 각 표적들의 방위 위치에 따른 도플러 주파수 대역 위치에 나타나던 신호들이 도플러 위치 정렬 함수에 의

해 방위 방향 도플러 중심 주파수(영상 중심 위치)를 기준으로 정렬되었음을 알 수 있다. 다만, 도플러 대역폭이 경사거리가 멀어질수록 감소하는 이유는 SAL 동안 거리 별로 다른 위치에 있는 표적들이 경험하는 도플러 대역폭이 거리에 따라 달라지기 때문이며, 도플러 대역폭은 식 (6)과 같다 .

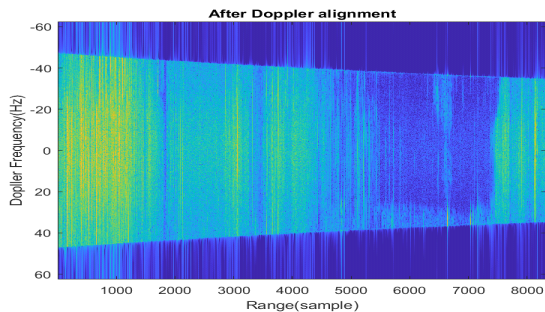
$$\begin{aligned} Dop\_BW &= \frac{2v^2}{\lambda R} SAT \\ &= \frac{2v}{\lambda R} SAL \end{aligned} \quad (6)$$

즉, 표적의 도플러 대역폭은 경사거리에 반비례하므로 경사 거리별 도플러 대역폭을 스케일링(scaling)하여야 서로 다른 거리에 위치한 표적들이 SAL 동안 경험한 동일 위상 오차 성분들을 정렬시킬 수 있으며, 이후 위상 오차를 추정해야 AF 적용 시 정확한 성능 개선을 이룰 수 있다. 거리 관측폭이 작을 경우, 경사 거리별 도플러 대역폭의 차이가 크지 않아 무시할 수 있는 정도라면 스케일링 없이 AF 적용을 고려할 수 있다. 그러나 거리 방향 관측폭이 커진다면 반드시 도플러 대역폭 스케일링 후 AF를 수행해야 정확한 위상 오차 추정이 가능하다. 그림 4는 그림 3(b)의 도플러 정렬 함수 적용 이후 결과에 대역폭 스케일링을 수행한 결과이다. 마치 모든 경사거리의 표적이 동일한 도플러 대역폭을 갖는 것처럼 스케일링되었음을 확인할 수 있다.

다음 그림 5는 도플러 위치 정렬함수와 대역폭 스케일링 함수를 적용한 SAR 영상이다. 영상에서 경사거리가 멀어질수록 방위 방향 영상 폭이 비례해서 감소한 것은



(a) 도플러 위치 정렬 함수 적용 전  
(a) Before applying Doppler alignment function



(b) 도플러 위치 정렬 함수 적용 후  
(b) After applying Doppler alignment function

그림 3. 도플러 위치 정렬함수 적용 전/후  
Fig. 3. Before/after applying Doppler alignment function.

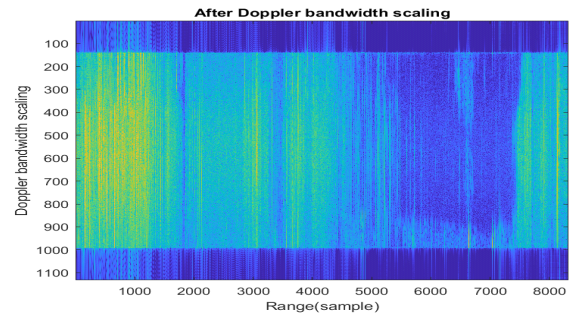


그림 4. 대역폭 스케일링 함수 적용 후  
Fig. 4. After applying bandwidth scaling function.

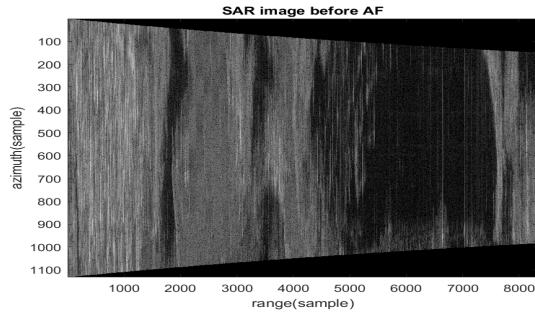


그림 5. AF 적용 전 SAR 영상

Fig. 5. SAR image before AF.

경사 거리가 멀어질수록 영상의 해상도가 낮아지므로(도플러 대역폭이 작아지므로) 영상 영역 zero-padding에 의한 도플러 영역 내삽(interpolation)으로 대역폭 스케일링을 수행하였기 때문이다. 전처리 연산이 끝난 SAR 영상에 대해서 기존 AF 기법을 수정 없이 적용할 경우, 완전한 성능 개선을 이룰 수 있게 된다. AF 적용 이후에는 도플러 영역에서 원래 표적들의 대역폭이 되도록 영상의 zero-padding 영역을 제거하는 리스케일링(re-scaling)을 반드시 적용해야 이후 영상 블록에 대한 매칭 기법 적용이 가능하다. 즉, SAL 동안 거리 방향으로 넓은 지역에 대한 영상 형성 시 근거리 지역보다 원거리 지역의 해상도가 점진적으로 저하되므로, 반드시 영상의 최대 거리에서 해상도 만족이 가능하도록 체계 설계를 수행해야 한다.

## 2.4 Spotlight RDA 영상의 Stripmap 영상화

Spotlight RDA 영상에 AF를 적용하여 영상 품질을 개선하는 방식의 영상 형성을 방위 방향으로 지속 수행할 경우, 광역 stripmap 영상을 형성할 수 있으며, 이를 아래 그림 6에 나타내었다. 다만 영상 블록 별 중첩을 반드시 고려해서 블록을 나누어야 중첩 부분 영상의 상호 상관(cross-correlation) 이용한 방위 이동 편차 보상 매칭 기법을 적용<sup>[12]</sup>할 수 있다. 이를 통해 stripmap 모드 운용의 장점인 방위 방향 연속 영상 형성이 가능해진다. 본 논문에서 제안한 항공용 SAR에서의 spotlight RDA처리 기법을 이용한 stripmap SAR 영상 형성 기법에 대한 블록 다이어그램을 기존(conventional) RDA 처리 과정을 포함하여 그림 7에 자세하게 나타내었다.

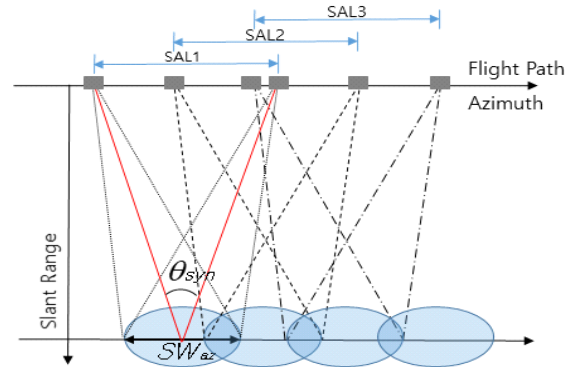


그림 6. Spotlight SAR 영상 블록의 stripmap 영상화

Fig. 6. Stripmap image using spotlight SAR blocks.

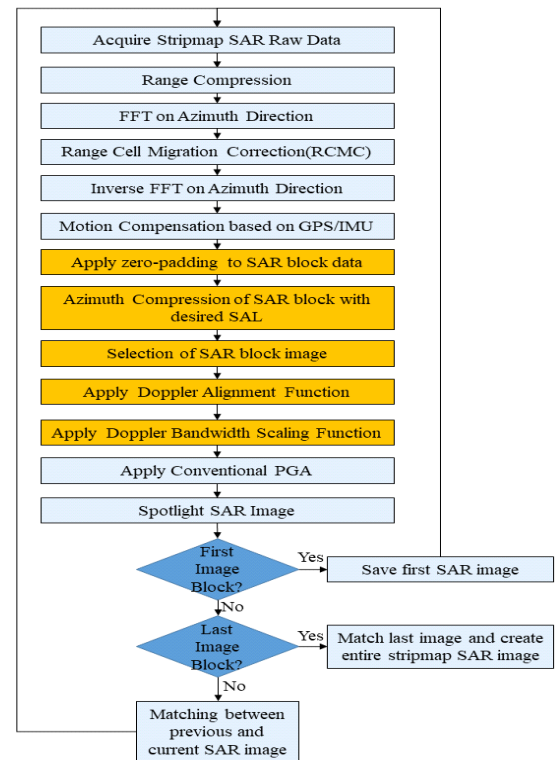


그림 7. Spotlight RDA에 의한 stripmap SAR 블록도

Fig. 7. Stripmap SAR block diagram by spotlight RDA.

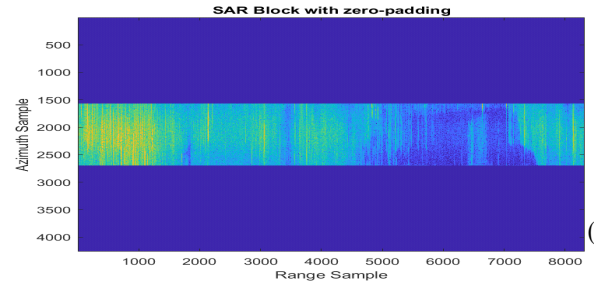
## III. 실험 결과 분석

본 논문에서 제안한 처리 기법을 자체 비행 시험을 통해 확보한 SAR 원시데이터를 활용<sup>[13]</sup>하여 검증하기로 한

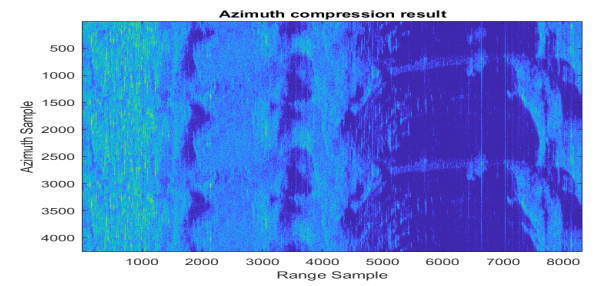


다. Stripmap 모드의 미터 급 요구 해상도를 위한  $\theta_{syn} \approx 1^\circ$  대비 방위 유효 빔 폭  $\theta_{eff}$ 는 약  $3^\circ$  이상으로 충분히 크기에 stripmap 데이터의 spotlight RDA 영상 형성 및 AF 적용이 가능하도록 체계 설계를 수행하였다. Stripmap SAR 영상 획득의 주요 운용 변수는 비행 고도 3.04km, 경사거리 약 20.59km, 스캔트 각도  $0^\circ$ , 전체 영상의 SAT는 약 57초, 각 영상 블록의 SAT는 약 9초이다. 스캔트가 발생하지 않도록 제어하였고, 도플러 중심 주파수가 0 Hz에 가깝게 되었기에 제로 도플러 변위를 위한 처리는 필요하지 않았다. 방위 방향으로 8개의 spotlight SAR 영상 블록이 되도록 중첩하여 처리하고, 방위 영상 매칭 기법을 적용하여 최종적으로 stripmap 모드 형태의 SAR 영상을 형성하였고, 전체 SAR 영상의 크기는 거리 방향 약 6.236 km, 방위 방향 약 2.25 km이다. RDA에 의한 spotlight SAR 영상 형성 방식은 앞서 언급한 2가지 고려 사항을 반영하여 처리한다면 그 외에는 일반적으로 잘 알려진 RDA 기법과 동일하다. 2가지 고려 사항에 대한 수행 과정은 다음과 같으며, 그림 8에 자세히 나타내었다. SAR 영상에서  $\theta_{eff}$  빔 폭에 의한 aliasing을 회피하려면 방위 압축 수행 전 영상 블록의 방위 방향으로 충분한 zero-padding 수행이 필요함을 강조하였다. 여기서는  $\theta_{eff}$ 에 의한 방위 방향 샘플 수에서  $\theta_{syn}$ 에 의한 방위 방향 샘플수를 빼고 난 샘플 수만큼 zero-padding을 수행한 결과를 그림 8(a) 나타내었다. 그리고 식 (4)의 정합필터를 생성하여 블록 데이터 방위 압축을 수행하여 SAR 영상을 형성한 결과를 그림 8(b)에 나타내었다. 실제 획득한 원시 데이터에서는  $\theta_{eff}$ 보다 큰 범위에서도 aliasing에 영향을 주는 신호가 유입될 수도 있으며, 그림 8(b)에서 보면 방위 방향 위 아래로 aliasing이 발생하였음을 확인할 수 있다. 그러나 방위 압축이 끝난 SAR 영상에서는 그림 8(c)에서처럼 오직  $\theta_{syn}$ 에 의한 중심 부근 SAR 영상 부분만 필요하며, 이 부분 그림 8(d)만 aliasing 열화를 회피하며 되기에 논문에서 제안한 처리 기법 적용 이후 열화가 없음을 확인하였다.

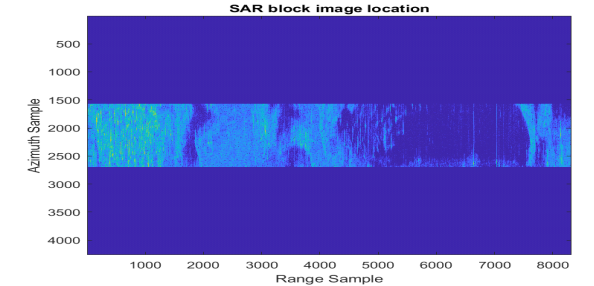
본 논문의 다음 실험 결과는 spotlight RDA에 의한 영상 형성 이후 AF를 적용하는 데 필수적인 도플러 전처리 함수 및 도플러 대역폭 스케일링 함수의 적용 전/후 결과를 단계적으로 비교 분석한다. 이를 통해 논문에서 제안



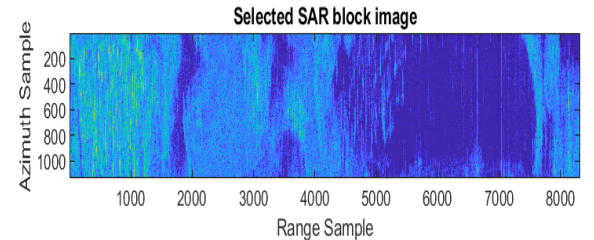
(a) Zero padding 된 SAR 블록 데이터  
(a) SAR block data with zero padding



(b) Zero padding SAR 블록데이터의 방위 압축 결과  
(b) Azimuth compression of SAR block data with zero-padding



(c) 1 SAL 동안의 SAR 영상 블록 위치  
(c) SAR block location in 1 SAL



(d) 유효 SAR 영상 블록 선택  
(d) Valid SAR block selection

그림 8. Zero-padding SAR 데이터의 방위압축 과정  
Fig. 8. Azimuth compression of SAR data with zero-padding.

한 spotlight RDA에 의한 영상 형성 및 AF 적용 기법의 유효성을 확인하는데 집중하기로 한다.

먼저 영상 획득 동안 비행체가 경험한 요동을 거리, 고도 방향으로 분석한 결과를 그림 9에 나타내었다.

첫 번째 영상 블록에 대해서 AF를 적용하지 않은 SAR 영상 형성 결과(a), 도플러 위치 정렬 함수/대역폭 스케일링 함수 적용 없이 PGA를 수행한 결과(b), 도플러 위치 정렬 함수만을 적용하고 대역폭 스케일링 함수는 적용하지 않고 AF를 수행한 결과(c), 도플러 위치 정렬 함수/대역폭 스케일링 함수를 모두 적용하고, AF를 수행한 결과(d)를 그림 10에 나타내었다. (a)를 보면 GPS/IMU에 의한 요동 보상을 수행한 결과이지만, 그림 9의 요동을 경험하면서 보상되지 않은 잔여 위상 오차에 의한 영상 품질 열화가 크게 발생한 것을 알 수 있다. (b) 영상을 통해 도플러 위치 정렬 함수 및 대역폭 스케일링 함수 적용 없이 PGA 바로 적용 시에, 영상의 품질이 (a) 영상 대비 일부 개선된 것처럼 보이나, 실제 SAR 영상의 활용성 측면에서 본다면 유의미한 개선이 있다고 보기 어렵다. (c) 영상은 (b) 영상 대비 개선이 더 이루어졌음을 확인할 수 있으나, 여전히 방위 해상도 및 부엽 품질 측면에서 크게 저하되어 있음을 확인할 수 있다. 논문에서 제안한 전처리 기법들을 모두 적용하고, PGA를 수행한 (d) 영상에서 성능 개선이 크게 이루어졌음을 쉽게 할 수 있다. 정량적인 분석을 위해 영상 내 서로 다른 위치 존재하는 임의의 밝은 표적 두 군데(1번 표적 : 좌측 상단, 2번 표적: 영상 중심)에 대한 성능 평가를 수행하였다. 코너 초점기(corner reflector, CR)가 없는 영상이라 해상도를 포함한 엄밀한 성능 분석은 불가하였고, PSLR(peak side lobe ratio), ISLR(integrated side lobe ratio)등의 방위 방향 부엽 성능

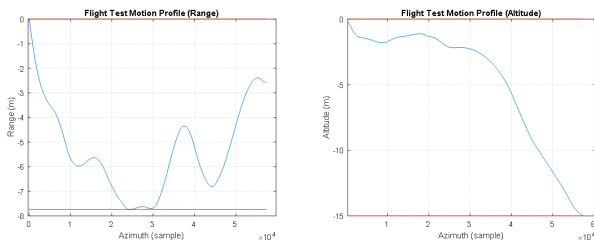
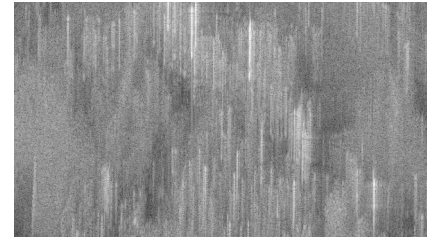


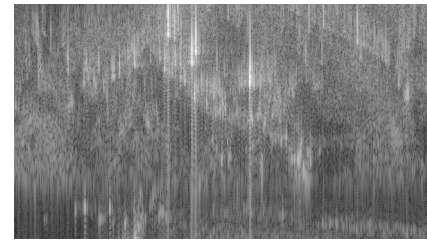
그림 9. 측정된 요동 (거리(좌), 고도(우) 방향)

Fig. 9. Motion measurement (range(left), altitude(right)).



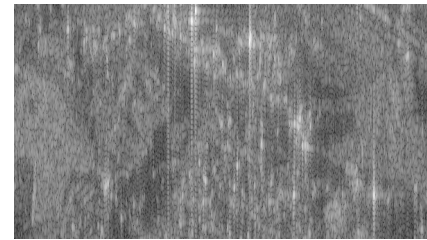
(a) AF 적용 전 SAR 영상

(a) SAR image before AF



(b) 도플러 위치 정렬/스케일링 함수 없이 PGA 수행 SAR 영상

(b) SAR image after PGA w.o Doppler alignment/scaling function



(c) 도플러 위치 정렬 함수만 적용 후 PGA 적용 SAR 영상

(c) SAR image after PGA with only Doppler alignment function



(d) 도플러 위치 정렬/스케일링 함수 적용 후 PGA 적용 SAR 영상

(d) SAR image after PGA with Doppler alignment/scaling function

그림 10. Spotlight RDA 영상 형성 및 PGA 적용 결과

Fig. 10. Spotlight RDA image formation and PGA results.

표 1. 방위 방향 부엽 성능 분석

Table 1. PSLR/ISLR in azimuth direction.

Azimuth sidelobe ratio	Fig 10(b)		Fig 10(c)		Fig 10(d)	
	PSLR (dB)	ISLR (dB)	PSLR (dB)	ISLR (dB)	PSLR (dB)	ISLR (dB)
1 <sup>st</sup> target	-0.49	6.26	-12.59	-10.74	-22.19	-18.46
2 <sup>nd</sup> target	-0.21	5.51	-14.73	-11.64	-19.48	-17.26

측정 결과를 표 1에 나타내었다.

(a) 영상의 품질은 심각하게 저하되어 1, 2번 표적을 식별할 수 없었기에 비교에서 제외하였다. 먼저 (b), (c) 영상 대비 (d) 영상의 부엽 성능이 크게 개선된 결과로부터 제안 기법의 유효함을 쉽게 확인할 수 있었다. 특히 (b) 대비 (c) 영상에서 부엽 성능이 상대적으로 큰 개선이 이뤄졌음을 확인할 수 있다. (c)의 경우 (d) 대비 해상도 측면에서 큰 열화가 발생하였음을 SAR 영상을 통해 확인할 수 있는데, 즉 해상도가 저하로 인해 상대적으로 주엽이 넓어지다 보니 부엽 성능이 영상의 품질 대비 상대적으로 양호하게 측정되었다고 볼 수 있다.

최종적으로 8개의 영상 블록에 대해서 방위 매칭 기법을 통해 stripmap SAR 영상 형성한 결과를 그림 11에 나타내었다.

#### IV. 결 론

Stripmap 모드에서 획득에서 SAR 원시데이터에 대해

서 spotlight RDA의한 영상 형성 및 AF 적용 기법에 대한 연구를 수행하였다. 대표적인 stripmap 모드 영상 형성 알고리즘인 RDA를 적용하여 spotlight 모드 영상 형성 시 반드시 필요한 고려 사항을 제시하였다. 그리고 RDA에 의한 spotlight 영상 형성 결과에 AF를 적용하기 위해서는 도플러 위치 정렬 함수 및 대역폭 스케일링 처리가 필요함을 식별하고, 실제 비행시험을 데이터를 통해 제안 처리 기법의 유효성을 입증하였다. 광역의 방위 빔 폭과 방위 요구 해상도의 trade-off를 통해 stripmap 모드 영상 형성 시에도 AF에 의한 성능 개선에 매우 유리한 spotlight RDA 영상의 블록 매칭 기법 적용을 통해 광역의 영상 형성이 가능함을 확인하였다.

#### References

- [1] W. G. Carrara, R. S. Goodman, and R. M. Majewski, *Spotlight Synthetic Aperture Radar, A Signal Processing Algorithms*, Boston, MA, Artech House, 1995.
- [2] I. G. Cumming, F. H. Wong, *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation*, Boston, MA, Artech House, 2005.
- [3] T. S. Yeo, N. L. Tan, Y. H. Lu, C. B. Zhang, W. Hong, and D. Hu, et al., "A stripmap to spotlight data converting algorithm," in *IGARSS '98 Sensing and Managing the Environment: 1998 IEEE International Geo-*

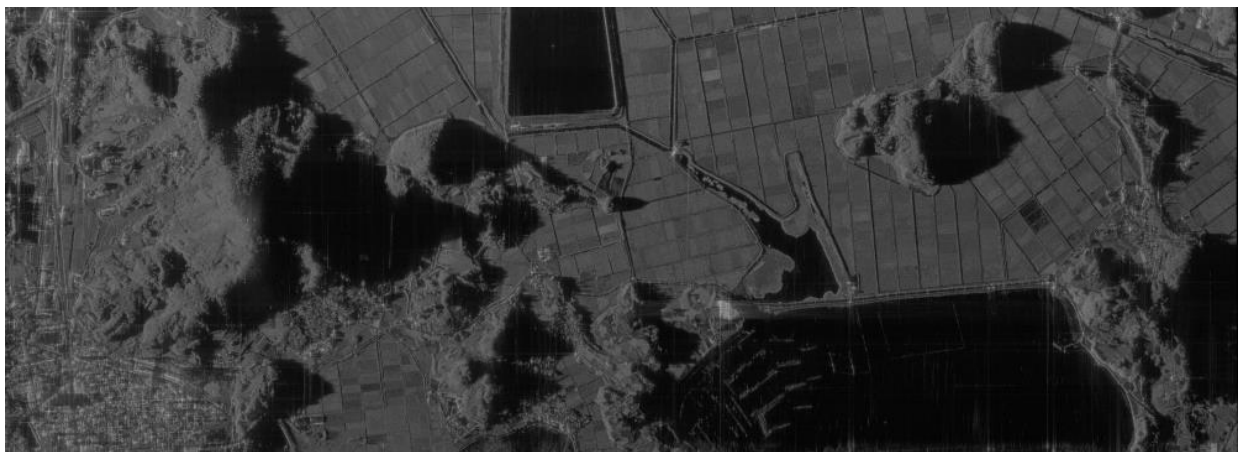


그림 11. Spotlight RDA 영상 블록 병합에 의한 stripmap SAR 영상 형성 결과 (거리×방위=6.236 km× 2.25 km)

Fig. 11. Stripmap SAR image formation results by using spotlight RDA image block merging (Rg×Az= 6.236 km×2.25 km).



- science and Remote Sensing*, Seattle, WA, Jul. 1998, vol. 2, pp. 1168-1170.
- [4] M. Soumekh, "Digital spotlighting and coherent subaperture image formation for stripmap synthetic aperture radar," *Proceedings of 1<sup>st</sup> International Conference on Image Processing*, Austin, TX, Nov. 1994, vol. 1, pp. 476-480.
- [5] J. Mittermayer, A. Moreira, and O. Loffeld, "Spotlight SAR data processing using the frequency scaling algorithm," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 37, no. 5, pp. 2198-2214, Sep. 1999.
- [6] J. Mittermayer, A. Moreira, and O. Loffeld, "Spotlighting processing of wide-beam stripmap SAR data using the frequency scaling algorithm," in *IGARSS '98 Sensing and Managing the Environment, 1998 IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium*, Seattle, WA, Jul. 1998, vol. 2, pp. 1177-1179.
- [7] S. H. Yoon, B. Y. Koh, Y. Kong, and H. S. Shin, "PGA implementation technique for stripmap SAR signal processing," *Korean Journal of Remote Sensing*, vol. 27, no. 2, pp. 151-161, Apr. 2011.
- [8] D. H. Kim, S. H. Park, and K. T. Kim, "SAR motion compensation using GPS/IMU," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 22, no. 1, pp. 16-23, Jan. 2011.
- [9] C. V. J. Jakowatz, D. E. Wahl, P. H. Eichel, D. C. Ghiglia, and P. A. Thompson, *Spotlight-Mode Synthetic Aperture Radar: A Signal Processing Approach*, Boston, MA, Springer Science & Business Media, 1996.
- [10] W. L. Van Rossum, M. P. G. Otten, and R. J. P. Van Bree, "Extended PGA for range migration algorithms," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 42, no. 2, pp. 478-488, Apr. 2006.
- [11] J. Hwang, W. W. Kim, "A study on autofocus method for back-projection algorithm under the squint mode in synthetic aperture radar," *Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers*, vol. 54, no. 7, pp. 1069-1077, Jul. 2017.
- [12] J. Hwang, W. W. Kim, "Autofocus method based on the partitioned SAR image for spatially variant phase error compensation," *Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers*, vol. 56, no. 5, pp. 574-581, May. 2019.
- [13] H. I. Shin, K. I. Kwon, S. H. Yoon, H. S. Kim, J. Hwang, and Y. C. Ko, et al., "SAR test-bed to acquire raw data and form real-time image," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, vol. 20, no. 2, pp. 181-186, Apr. 2017.

황 정 훈 [국방과학연구소/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-4768-8642>



2003년 2월: 한양대학교 전자전기컴퓨터 공학부 (공학사)  
 2005년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자 공학과 (공학석사)  
 2020년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학 박사)  
 2005년~현재: 국방과학연구소 책임연구원  
 [주 관심분야] SAR 신호처리, SAR 체계 설계,

김 형 석 [국방과학연구소/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-8193-1736>



1997년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학사)  
 1999년 2월: 경북대학교 전자공학과 (공학 석사)  
 2006년~현재: 국방과학연구소 책임연구원  
 [주 관심분야] SAR/GMTI 신호처리, SAR

요동보상

윤 상 호 [국방과학연구소/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-5557-6582>



1999년 2월: 포항공과대학교 전자전기공  
학과 (공학사)

2001년 2월: 포항공과대학교 전자전기공  
학과 (공학석사)

2004년 2월: 포항공과대학교 전자전기공  
학과 (공학박사)

2004년~현재: 국방과학연구소 책임연구

원

[주 관심분야] 레이더/SAR 시스템 및 신호처리