

Squint 빔 분할을 통한 고해상도 SAR 영상 구현

Squint Beam Segmentation for High-Resolution SAR Imaging

문민정 · 이우경 · 한승훈* · 조재형* · 문효이*

Minjung Moon · Wookyung Lee · Seung-hoon Han* · Jae-Hyoung Cho* · Hyoi Moon*

요 약

항공기 SAR(Synthetic Aperture Radar)에서 실시간 고해상도 영상을 획득하기 위해 전방관측 모드로 운용할 경우, 기하학적 왜곡에 의한 영향을 받게 된다. 일반적인 SAR 영상 처리 알고리즘 중에서도 항공 탑재체의 요동 보상에 유리한 PFA(Polar Format Algorithm)는 제한된 영역에서 높은 영상 품질과 고속 연산 효율성을 갖는다. 반면 전방 관측 모드에서의 데이터 왜곡의 증가로 PFA의 주 알고리즘인 보간 계산의 오차가 증가하여 영상의 품질이 저하되며, 이는 고해상도 영상 확장에 제한이 된다. 본 논문에서는 PFA 알고리즘의 오차를 개선하기 위해 안테나 빔 조향 영역을 분할한 후 제한된 영역의 서브 영상을 병합하여 SAR 영상을 생성하는 알고리즘을 제시한다. 서로 다른 영역의 SAR 신호를 저대역에서 취합하고, 고대역에서 정합하여 전방관측 모드에서의 왜곡을 억제하면서 광역의 고해상도 영상을 생성할 수 있음을 보인다.

Abstract

Airborne synthetic aperture radars(SARs) are vulnerable to geometric distortion when operated in the squinted mode. The polar format algorithm(PFA) is preferred owing to its convenient motion compensation, good image quality, and efficient computational performance. As a major drawback of the conventional PFA, the increase in data distortion under the forward-looking mode results in interpolation errors, thereby deteriorating image quality. In this paper, we propose a high-resolution SAR processing method based on the sub-aperture division PFA. In this approach, multiple antenna beams are imposed on extended areas divided by sub-aperture regions. Antenna beam steering is implemented from multiple platforms to simultaneously collect raw data from the sub-apertures. Thereafter, multiple sub-data images, each featuring low-resolution qualities, are processed in parallel to compensate for phase distortion and further merged to obtain a complete SAR image over an extended area. The results show that the synthesized SAR image yields an improved quality with enhanced resolution.

Key words: High Resolution SAR, PFA, Squint Beam

I. 서 론

초기 SAR 시스템에 적용된 알고리즘은 시간 영역에서 개발되어 위성과 같은 안정된 경로를 따르는 탑재체에서

중저해상도의 영상획득에 효과적으로 활용되었다. 그러나 고해상도 영상에 대한 수요가 증가하고 빔지향도가 다변화되는 모드가 개발되면서 영상품질 개선을 위한 알고리즘이 주파수 영역에서 순차적으로 발전되어 왔다^{[1][2]}.

「이 논문은 2019년도 한화시스템(주)의 재원을 지원 받아 수행된 연구임(계약번호 U-19-002).」

한국항공대학교 항공전자공학과(Department of Electronic Engineering, Korea Aerospace University)

*한화시스템 항공레이다팀(Avionics Radar Team, Hanwha Systems)

· Manuscript received February 11, 2020 ; Revised March 5, 2020 ; Accepted April 20, 2020. (ID No. 20200211-011)

· Corresponding Author: Wookyung Lee (e-mail: wklee@kau.ac.kr)

하지만, 항공기 기반의 SAR 탑재체가 고해상도의 표적을 획득하기 위해서는 복잡한 경로 조건과 안테나 빔지향각의 변화를 극복해야 하며, 이는 전통적인 시간-주파수 기반의 알고리즘으로 충족하기는 어렵다. 특히, 항공기 SAR에 대하여 전방 관측 조건에서 광역의 고해상도 영상을 생성하는데에는 한계가 발생한다^[3].

일반적으로 고해상도 항공기 SAR는 위성 기반 탑재체에 비해 훨씬 높은 정밀도를 요구한다. 동일한 성능을 목표로 하는 탑재체일지라도 위성 기반에 비해 기체 요동 보상과 안테나 빔지향각 보상 과정이 어려워 추가적인 신호처리 체계가 선행되어야 한다^{[1]~[3]}.

일반적으로 SAR 영상의 해상도는 신호의 대역폭에 비례한다. 거리 방향의 해상도는 레이다 신호의 대역폭을 기계적으로 증가시켜 성능을 개선할 수 있으나, 방위 방향의 해상도는 안테나의 빔폭, 도플러 해상도와 PRF(Pulse Repetition Frequency)의 상호 제약에 의해 인위적인 개선이 어렵다. 항공 SAR에서 고해상도 영상을 얻기 위해서는 방위 방향으로의 빔폭이 확장되어야 한다. 안테나 빔 방위각의 증가는 도플러 폭의 증가를 유발하여 해상도를 향상시키지만, 펄스방식으로 데이터를 수집하는 SAR 영상 처리과정에서 부엽이 증가하여 영상 품질이 저하되거나 SAR 시스템의 요구 사양이 복잡해져서 실제로 구현하는 것은 제약이 따른다. 기존의 대부분의 SAR 영상 처리 알고리즘은 제한된 구간에서 존재하는 빔폭을 가정하여 구현되기 때문에 확장된 빔폭은 영상 처리의 과정에서 복잡한 오차 보정을 요구하게 된다. 이러한 문제를 해결하는 방안으로는 넓은 영역에 대한 방위빔을 분할하여 독립적으로 처리한 후 합성하는 방식이 대안으로 제시되고 있다^[4].

일반적인 스트립맵 모드에서는 거리-도플러 기반의 RDA(Range Doppler Algorithm) 방식으로 적용하는 것이 편리하다. 그러나 항공기 탑재 시 발생하는 요동 보상을 시간 영역에서 수행하면서 요구되는 위상 보상 과정이 복잡하고, 시간 지연이 발생할 수 있어서 불리하게 된다. 관측 시 획득되는 SAR 원시 자료는 표적 위치에 따른 위상 보정을 수행하는 것이 더욱 복잡해지며, 이를 해결하기 위해 시간 영역에서 수행되는 위상 보상을 주파수 영역에서 수행하는 것이 편리하다. 과거 CSA(Chirp Scaling

Algorithm)에 기반하여 스폿 모드 등에 적용되었으나, 계산이 간편하여 유리한 반면, 경로가 복잡해지거나 요구해상도가 높아질수록 성능이 저하되는 단점이 있다. PFA와 RMA는 고해상도에서 경로의 보상을 수행하면서도 높은 품질을 획득하기 위해 사용된다. RMA(Range Migration Algorithm)는 넓은 구간에서의 위상 보정이 유리하여 상대적으로 고해상도 SAR 영상획득에 상대적으로 유리하다^{[5][6]}.

스폿 모드나 전방 관측 모드에서의 SAR 영상 품질은 넓은 표적 영역에서 나타나는 위상 왜곡을 균일하게 보정하는 정확도에 의해 주로 결정된다. 알려진 대부분의 방식들은 거리-방위 정도 데이터를 각각 주파수영역으로 변환하는 알고리즘 방식에 기반하며, 기본적인 처리를 수행한다. 거리 방위 방향의 변수를 각각 주파수 영역으로 변환한 후 방위 방향으로 보간법을 적용하여 신호 왜곡을 보정 처리하는 것이 기본 알고리즘이며, 탑재체 경로의 복잡도나 전방 관측각, 영상 해상도의 요구 조건에 따라 각 과정에서 품질 향상을 위한 추가 알고리즘을 적용하게 된다. 하지만 기존 PFA 알고리즘은 실제 구형 파면은 평면에 가깝다고 가정하여 근사화를 수행한다. 평면 파형의 근사화는 잔류 위상 오차를 유발하고, 영상의 크기가 확장되면 표적의 압축 성능이 저하된다^{[3][6][7]}. 광대역 빔을 처리하기 위해 서브빔 분할을 취하는 방식이 도입되기도 하는데, 전체 영상을 전처리하고 이를 다시 분할하여 정합하는 과정이 반복되면서 시간 소요가 증가한다^[8].

본 논문에서는 고해상도 SAR 영상을 획득하기 위해 빔폭을 늘려 해상도를 개선하는 방안을 제시한다. 이를 위해 PFA 방식의 알고리즘을 여러 개의 서브 빔으로 구성되는 복수의 SAR 데이터에 독립적으로 적용한 후 주파수 영역에서 통합 처리하는 과정을 제시한다. 안테나 빔폭이 증가함에 따라 동시에 증가하는 스캔트 각 성분을 보상하여 영상 처리 과정에서의 오차를 상쇄하였다. PFA는 항공기의 복잡한 요동을 보상하는데 적합한 구조를 갖고 있으며, 이는 스캔트 각이 서로 다른 서브 데이터를 처리하는데 용이한 방식으로 적용될 수 있다.

본 논문에서는 빔 조향이 가능한 항공 SAR에서 서브영역으로 분할되어 지향되는 좁은 빔을 통해 복수의 데

이터를 확보하고, 이를 통합처리하여 고해상도의 SAR 영상을 얻는 알고리즘을 제시한다. 구현된 알고리즘을 점표적 모의실험을 통해 보이고, 이를 실제 SAR 영상 자료에 적용하여 검증한다.

II. 다중 빔 분할 알고리즘

2-1 고해상도 SAR 다중 빔 운용 시나리오

스트립 맵 모드 SAR에서는 항공기가 비행경로를 따라 이동하면서 영상을 생성한다. 하지만 스트립 맵 모드는 방위 방향의 해상도는 안테나 크기의 절반으로 제한된다. 방위 방향의 해상도를 개선하기 위해서는 표적에 대한 신호 수집 구간이 길어져야 한다. 이를 위한 방법으로는 쉽게 안테나의 빔폭을 늘리거나 빔을 인위적으로 조향하는 스폿라이트 모드 방식을 사용할 수 있다.

안테나 빔폭을 늘리는 것은 정해진 고도에서 펄스 반복 주기 조건으로 인해 제한되므로 스폿모드를 운용하는 것이 선호된다. 그러나 단일 SAR 플랫폼이 일정한 고도에서 획득하는 스폿모드 데이터 역시 비행기의 속도와 안테나 빔 지향 속도 등에 의해 일정 한계를 넘어서지 못한다. 특히 스퀀트 각을 증가시켜 전방 SAR를 구현하는 방식을 사용할 경우, 거리 변화에 따른 기하 왜곡이 증가하여 PFA 알고리즘의 근사적 계산 정확도가 저하되고, 이는 영상 품질 저하로 이어진다.

고해상도 모드에서 늘어지는 방위 빔 구간 데이터 처리 과정에서 정확도를 개선하기 위해서는 구간 분할 방식을 사용하는 것이 유리하다. 이때 단일 플랫폼이 아닌 다중 플랫폼을 사용할 경우 추가적인 대역폭의 증가 효과로 더욱 향상된 해상도 품질을 기대할 수 있을 것이다. 단일 플랫폼의 경우라면 안테나의 빔을 분할하여 다중 서브 빔을 동시에 운용하는 방식으로 구현할 수 있다.

그림 1은 N 개의 서브빔을 운용하는 항공 SAR에서 고해상도 모드 영상을 획득하는 시나리오를 보인다. 고해상도 스폿모드에서는 한 번에 획득할 수 있는 영역이 제한되어 있으나, 복수의 서브 빔을 운용할 경우 관측 영역을 확장하는 것이 가능하다. 각 분할된 서브 빔을 사용해서 생성한 영상을 병합하면 넓은 반경에서 고해상도의 영상

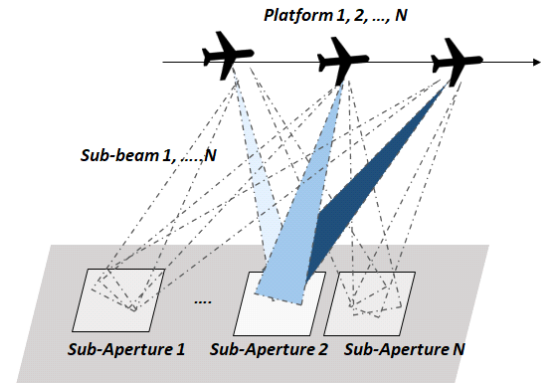


그림 1. 스퀀트 빔 분할에 관측 영역 확대 모드

Fig. 1. Squint beam segmentation for extended surveillance.

을 획득할 수 있다^{[9]~[11]}.

2-2 수신 신호 모델

예측 불가능한 요동의 영향을 받는 항공기 SAR의 영상을 생성하기 위해서는 거리 및 방위 방향의 데이터를 독립적으로 다루는 알고리즘이 선호된다. 특히 고해상도 영상에서 요구되는 정밀도 수준이 높아지는데, PFA 알고리즘은 스폿 모드 처리를 위해 고안된 이후 오랫동안 항공용 SAR에 활용되어 왔다. PFA는 데이터를 가시선 방향으로 보정하므로, 스퀀트 모드에서 거리 이격(migration)에 대응하기 용이하여 스퀀트 각이 증가하는 환경에서도 높은 영상처리 정확도를 보인다.

RDA와 같은 시간-도플러 방식은 스퀀트 모드 데이터를 처리하기 위해 방위방향 곡률을 시간 영역에서 위상 보정한다. PFA는 far-field 평면파를 가정하고 시간순으로 수집된 데이터를 극좌표 형태로 변환한다. PFA는 영상 중심으로부터 같은 거리에서 극좌표 형태로 수신되는 신호를 이차원 푸리에변환을 수행하기 위해 직계좌표 형태로 변환한다. 변환된 신호는 2단계의 보간법이 요구된다. 하지만 기존 PFA는 알고리즘 구현 시 근사화로 공간 가변 성분이 남아 파면 곡률(wavefront curvature)이 나타난다. 파면 곡률은 영상의 크기가 커질수록 비례하여 나타나 영상의 품질이 저하된다. 또한 기하 오차에 의한 영상의 왜곡이 증가하여 추가적인 보정이 필요하다^{[6],[10]}.

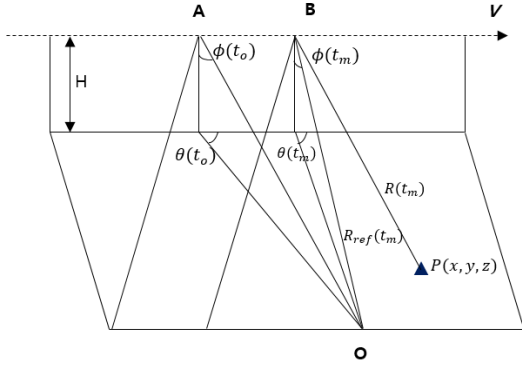


그림 2. 스쿼트 SAR 데이터 획득 구조

Fig. 2. Data acquisition geometry for squint SAR.

그림 2는 스쿼트 모드에서의 SAR 영상 원시자료를 획득하는 기하 구조를 보인다. 레이더 펄스 폭이 T_p , 파장이 λ , 칩 기울기가 γ 인 LFM 신호를 사용할 때, 거리 R_m 인 표적에서의 반사 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$s_r(\tau, t) = \text{rect}\left(\frac{t}{T_a}\right) \text{rect}\left(\frac{\tau - 2R_m(t)/c}{T_p}\right) \cdot \exp\left(-j\frac{4\pi}{\lambda} \cdot R_m(t)\right) \exp\left[j\pi\gamma\left(\tau - \frac{2R_m(t)}{c}\right)^2\right] \quad (1)$$

여기서 τ 는 fast-time, t 는 slow time을 의미한다. 플랫폼에서 임의의 표적 m 에 대한 스쿼트각은 θ_m 으로 표현한다. 그림 1처럼 다중 빔 플랫폼이 존재하면 각 빔 영역마다 수신되는 복수의 신호들을 모두 취합하여 최종 영상을 생성한다. N 개의 서브 영역을 동시에 관측하기 위해서는 N 개의 서브 빔이 필요하다. 이렇게 수집된 데이터를 방위방향으로 나열한 후 독립적으로 분할 처리하고, 이를 다시 정합하여 최종 영상을 획득한다.

플랫폼의 수가 증대되거나 분할된 서브 빔의 수가 증가하면 이에 비례하여 해상도가 증가하는 효과를 얻을 수 있다. 다만, 서로 다른 서브 빔에 의해 획득된 데이터를 통합하는 과정에서 데이터의 정합이 중요해진다. 특히 주파수 변환된 (k_x, k_y) 영역에서 FFT를 수행하는 PFA 알고리즘에서는 서로 다르게 수집된 데이터들을 동일한 간격으로 정렬하는 정확도가 영상의 품질을 결정하게 된다.

이상적으로는 각 서브 빔들이 연속적으로 정렬되어 데

이터가 연속적으로 수집되어야 하지만, 실제 비행 플랫폼에서는 빔 조향의 정확도 및 플랫폼의 이동 속도에 의해 획득된 데이터에 불연속이 발생할 가능성이 높아지고, 이는 영상 품질을 결정하는 요인이 된다. 서로 다른 빔에 의해 수집된 영상 원시자료를 정합하는 것은 (k_x, k_y) 로 표현되는 웨이브 영역(wave domain)에서 보간을 수행하는 PFA 방식에서 수행하는 것이 편리할 것이다. N 개의 서브 빔을 통합한 신호 $S_T(\tau, t)$ 는 각 서브 빔 신호 $S_n(\tau, t)$ 의 총합과 같으며, 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$S_T(\eta, f_\tau) = \sum_{n=1}^N S_n(\eta, f_\tau) \quad (2)$$

방위축으로의 길이가 증가함에 따라 각 빔에서의 LFM 신호 기울기에서 왜곡이 발생하며, 이를 보정하기 위한 dechirp 과정이 필요하다. 이를 위한 dechirp 신호는 식 (1)에서 함수와 반대의 위상 기울기를 갖는 기준 함수이며, 모든 표적에 대해서 균일하게 적용하기 위해 관측 영역의 중심점 R_c 에서 수신된 신호로 정의한다.

높은 스쿼트 각과 확장된 빔폭에서는 오차가 증가할 수 있으나, 서브 빔으로 분할된 경우에는 이 과정에서의 오차가 크지 않게 유지될 수 있다. 그림 3은 서로 다른 빔에 의해 획득된 데이터들이 각각 다른 시간-주파수 영역에서 서로 다른 기울기를 갖고 있음을 보여준다. 이에 대해 dechirp 필터를 곱해 주면 다음과 같은 결과를 얻는다.

$$s_{if}(\tau, t) = \exp\left(j\frac{4\pi\Upsilon}{c^2}(R_m(t) - R_c(t))^2\right) \cdot \exp\left\{-j\frac{4\pi}{c}\left(f_c + \Upsilon\left(\tau - \frac{2R_c(t)}{c}\right)\right) \cdot (R_m(t) - R_c(t))\right\} \quad (3)$$

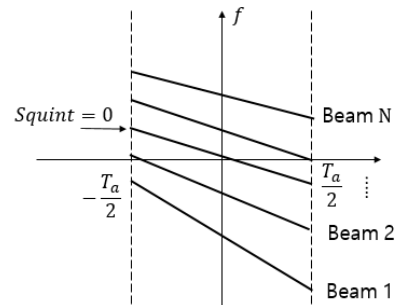


그림 3. 다중 서브 빔 영역에서의 LFM chirp 기울기 변화

Fig. 3. LFM chirp slopes over multiple sub-beams.

여기서 R_m 은 표적까지의 거리, R_c 는 빔 중심까지의 거리이고, 진폭 구간에 대한 rect 함수는 편의상 무시하였다. 이 신호를 시간-주파수 영역으로 치환하면 표적까지의 거리가 주파수로 환산된다. τ 는 fast-time 변수로서 표적 거리에 비례하고, $\tau = (R_m(t) - R_c(t))/c$ 와 같다. 식 (3)의 첫 위상항은 RVP(Residual Video Phase)로서 거리에 따른 위상 왜곡을 유발한다. 낮은 스캔트 각을 갖는 저해상도 영상에서는 큰 영향이 없으나, 스캔트 각이 증가하는 고해상도 SAR에서는 주요한 오차 요인이 되므로 보정이 필요하다. 이를 제거하기 위해 식 (4)로 표현되는 RVP 필터를 적용하면

$$f_{RVP}(\tau) = \exp\{-j\pi\Upsilon\tau^2\} \quad (4)$$

다음과 같은 결과를 얻는다.

$$s_{if}(\tau, t) = \exp\left\{-j\frac{4\pi}{c}\left(f_c + \Upsilon\left(\tau - \frac{2R_c(t)}{c}\right)\right)\left(\cdot(R_m(t) - R_c(t))\right)\right\} \quad (5)$$

항공기의 고도 z 를 무시하면 표적까지의 거리는 x_p, y_p 계수로만 표현할 수 있다. 이때 신호의 위상 정보를 주파수 영역 변수로 치환해서 표현하면

$$s_{if}(\tau, t) = \exp(-j[k_x x_p + k_y y_p]) \quad (6)$$

가 되고, 여기서 (k_x, k_y) 는 각각 다음과 같다.

$$k_x = \frac{4\pi}{c}(f_c + \Upsilon\tau)\sin\phi(m)\sin\theta(m) \quad (7)$$

$$k_y = \frac{4\pi}{c}(f_c + \Upsilon\tau)\sin\phi(m)\cos\theta(m) \quad (8)$$

이렇게 수집된 데이터는 일반적인 PFA 알고리즘에 대입하여 SAR 영상으로 변환될 수 있다. 높이 z 를 무시할 경우, 입사각 ϕ 를 90도로 가정하여 $\sin(\phi)=1$ 로 무시할 수 있다. 실제로는 빔 조향의 오차 및 플랫폼의 경로 요동에 의해 데이터 왜곡과 서브 빔 데이터의 손실이 발생할 것이다. 빔폭이 작고 스캔트 각의 범위가 크게 벗어나지 않은 경우에는 원시 데이터의 보간 과정에서 기하왜곡이 억제될 것이며, 따라서 근사화된 수식을 그대로 사용해도 무방하다. 그러나 광폭의 빔에서 스캔트 각이 증가할 경

우, 기하 왜곡은 증가되어 영상의 품질도 저하될 것이다. 특히 서로 다른 플랫폼에 의해 생성될 경우 속도 변화 등에 의해 영상 획득 샘플링 간격이 다를 수 있다. 데이터를 정렬하는 과정에서의 오차는 데이터 보간 과정의 정확도에 의해 결정되나, 연산 시간의 증가로 이어지기 때문에 효율성을 높이는 것이 필요하다.

CZT(Chirp-Z Transform)는 비균질하게 수집된 데이터에 대한 주파수 영역 변환과 데이터 보간처리를 신속하게 수행할 수 있는 알고리즘으로 PFA에 효과적으로 적용될 수 있다.

(k_x, k_y) 영역으로 변환된 식 (6)에서 각 서브 빔을 N_{az} 개의 샘플로 추출한다고 가정할 때 k_x 의 서브 빔 구간에서 데이터 빔의 균일 샘플 간격은 총 빔폭 $2\tan(\Delta\theta_{Naz}/2)$ 을 $(N_{az}-1)$ 로 나눈 값과 같다. 여기서 $\Delta\theta_{Naz}$ 는 N 번째 서브 빔의 빔폭에 해당된다. 서브 빔 내에서 m 번째 샘플에 대응되는 스캔트 지향각 θ_m 은 다음과 같다.

$$\theta_m = \text{atan}\left\{m\frac{2\tan(\Delta\theta_{Naz})}{N_{az}-1}\right\} \quad (9)$$

동일한 서브 빔 내에서는 빔폭 $\Delta\theta_{Naz}$ 이 크지 않을 때 방위방향으로 균일하게 샘플링이 되도록 설정할 수 있다. 반면, 서로 다른 서브 빔에서는 기하적 차이로 인해 동일한 샘플링 간격 $\Delta\theta_m = \theta_m - \theta_{m-1}$ 의 값에 편차가 생기게 된다. 이를 보정하기 위해 각 서브 빔 데이터에 대한 보간을 수행하여 전체 데이터의 배열을 균일하게 조정하고, 이에 대해 CZT를 적용한다. 그림 4는 RVP와 방위방향의 CZT가 순차적으로 구현되는 과정을 보인다.

2.3 서브 빔 영상 합성 알고리즘 구현

빔 분할에 따른 PFA 처리과정은 그림 5와 같다. 방위

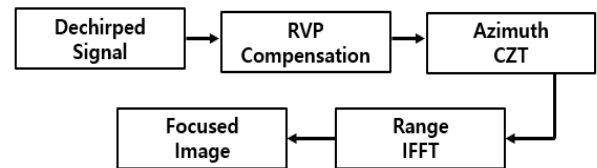


그림 4. 서브 빔 SAR 영상 병합을 위한 PFA 순서도
Fig. 4. PFA algorithm flow for sub-beam merged SAR.

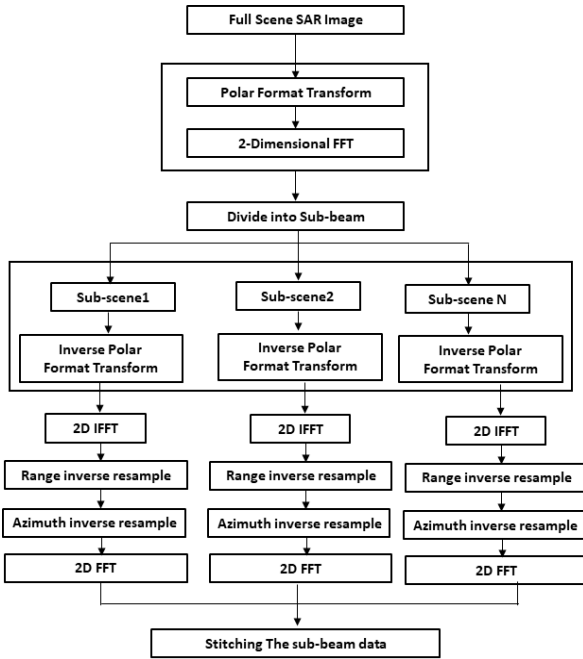


그림 5. 서브 빔 분할에 따른 PFA 알고리즘
Fig. 5. Parallel sub-aperture PFA algorithm.

각이 큰 전체 영상에 대한 SAR 영상처리를 수행할 경우, 각 서브 빔에 의한 기하 왜곡과 요동 보상의 증가도 영상 품질이 저하될 수 있다. 이때 각 영상을 분할하여 각각의 서브 영역에 대해 독립적으로 데이터를 획득하며, 기하 왜곡과 요동 보상에서의 오차 증가가 억제될 수 있을 것이다.

영상 정합 성능을 개선하기 위해 각 서브 영상의 데이터의 중심점에 기반한 요동보상을 수행한다. 요동 보상의 수행하기 위한 기준 함수는 다음 수식과 같이 놓을 수 있다.

$$\bar{S}_n(t, f_r) = \exp \left[j \frac{4\pi(f_c + f_r)}{c} [r_{n,o}(t) - r_o(t)] \right] \quad (10)$$

n 은 서브 빔의 수를 나타내며, 각 서브 빔 영역마다 다른 요동 보상 함수를 적용하게 된다. $r_{n,o}(t)$ 는 레이더에서 n 번째 서브 영상의 중심까지의 거리이다.

각 서브 영상의 중심점을 기준으로 요동을 보상하기 때문에, 각 서브 영상의 위치에 따라 요동 보상의 기준함수는 변하지 않지만, 서브 빔이 PFA의 유효 영상 반경 내에 영상의 크기가 좁게 설정된다면, 서브 영상 내에서 중

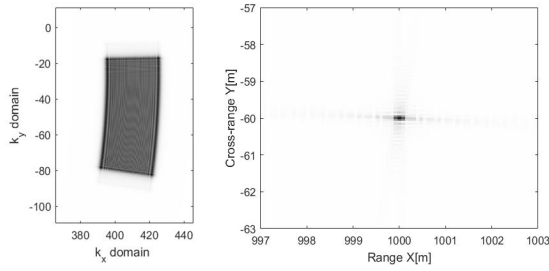
심점 외의 거리에 대한 잔류 오차는 무시할 수 있다. PFA의 유효 반경 내로 서브 영상의 크기를 제한하면 각 서브 영상에 대한 압축 성능을 향상시킬 수 있다. 각 서브빔에서의 영상 처리가 완료된 후, 서로 다른 영역을 병합하여 전체 영역에 대한 SAR 영상을 합성한다.

III. 모의 시뮬레이션 수행

본 장에서는 그림 1에서 제시한 N 개의 서브 빔 분할에 따른 PFA 통합 알고리즘을 기반으로 시뮬레이션을 수행하였다. N 은 3으로 설정하여 3개의 서브 빔 분할에 따른 서브 SAR 점표적 영상을 생성하였다. 시뮬레이션은 X밴드 SAR 시스템을 기반으로 진행하였다. 그림 6은 서브빔 3개에 대한 점표적 영상을 보인다. 상단부터 스캔트 각도는 각각 -3.4° , 0° , 3.4° 로 설정하여 각 서브 빔 영역에서 수집된 정보를 독립적으로 처리한 결과이다.

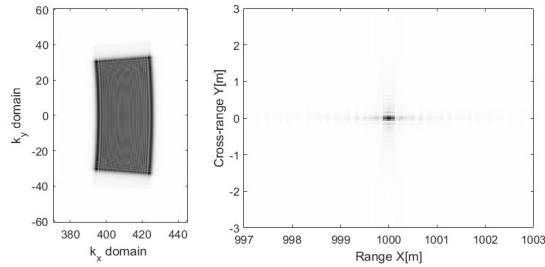
그림 7은 서브 빔 데이터의 3배의 빔 길이를 갖는 데이터의 점표적 영상이다. 빔의 길이가 3배 증가하여 해상도가 향상됨을 확인하였다.

빔 합성에 따른 영상의 품질을 분석하기 위해 빔 합성 과정에서 발생 가능한 데이터 손실을 고려하여 점표적 영상을 생성하였다. 그림 8은 실제 서브 빔 데이터의 합성 과정에서 발생할 수 있는 데이터 손실에 따른 점표적 영상이다. 3개의 서브 빔 데이터의 병합하는 과정에서 데이터의 손실이 발생하는 상황에 대하여 영상의 품질을 비교 분석하였다. 상단부터 서브 빔 데이터의 크기의 10%, 20%, 50%에 해당하는 데이터 손실을 가정하여 빔을 병합하여 점표적 영상을 생성하였다. 왼쪽 그룹은 (k_x, k_y) 주파수 영역에서 병합한 데이터를 나타내며, 오른쪽은 왼쪽 데이터를 기반으로 생성한 점표적 영상의 방위 방향 프로파일을 보인다. 서브 빔 데이터를 병합하는 과정에서 정확하지 않은 오버랩 오차에 의해 데이터의 손실이 발생하고 부엽 신호가 증가하여 영상의 품질이 저하된다. 따라서 다중 SAR 플랫폼을 운용하거나 영상을 통합 처리하기 위해서는 손실없이 데이터를 융합하는 것이 중요하며, 서브 빔 간의 오버랩이 되도록 설정하는 것이 필요하다.



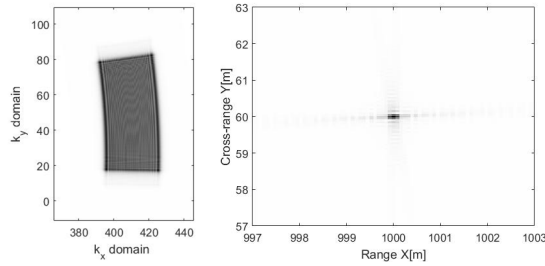
(a) 서브 빔 1: Squint angle=-3.4°

(a) Sub-beam 1: Squint angle=-3.4°



(b) 서브 빔 2: Squint angle=0°

(b) Sub-beam 2: Squint angle=0°



(c) 서브 빔 3: Squint angle=+3.4°

(c) Sub-beam 3: Squint angle=+3.4°

그림 6. 스퀀트 각의 변화에 따른 서브 빔 분할 영상 특성: (좌) 공간 주파수 영역 분포, (우) 점표적 영상

Fig. 6. Sub-beam image analysis vs squint angle variation: (left) wavedomain analysis, (right) SAR point target image.

IV. 알고리즘 성능 검증

앞 장에서 기술한 알고리즘을 검증하기 위해 실제 SAR 원시 자료에 대한 신호처리를 수행하였다. 실험 데이터는 AFRL(Air Force Research Lab)에서 항공기로 수집한 Gotcha지역 SAR 원시자료를 활용하였다. 항공기는 7.3

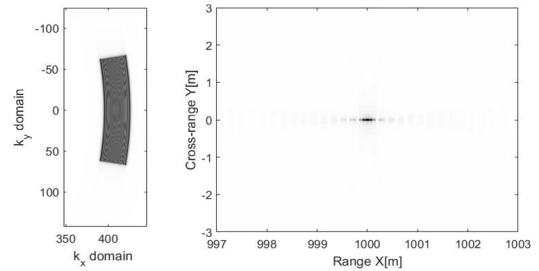
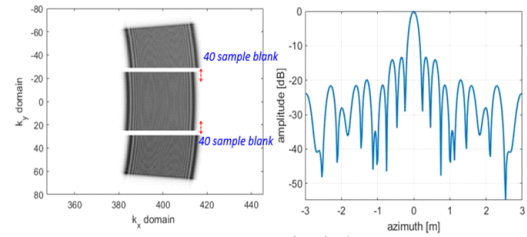


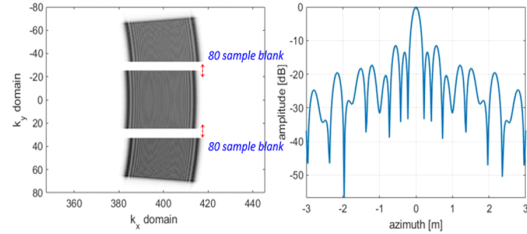
그림 7. 통합 빔 처리 결과: (좌) 공간 주파수 영역 분포, (우) 점표적 영상

Fig. 7. Full aperture beam image analysis: (left) wave-domain analysis, (right) SAR point target image.



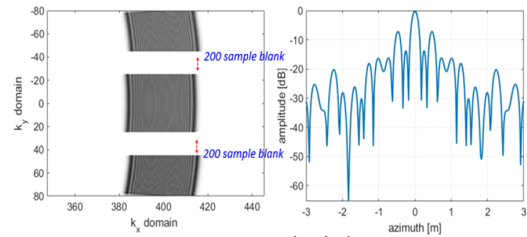
(a) 10 % 갭 발생

(a) 10 % mis-alignment error



(b) 20 % 갭 발생

(b) 20 % mis-alignment error



(c) 50 % 갭 발생

(c) 50 % mis-alignment error

그림 8. 서브 빔 오버랩 이격에 따른 영상 품질. (좌)공간 주파수 영역 분포, (우)점표적 영상

Fig. 8. SAR image quality affected by sub-aperture beam overlap mis-alignment error. (left) wavedomain analysis, (right) azimuth resolution.

km 고도에서 빔중심까지의 거리는 10 km, 빔조향각은 45도로 운행하면서 $6\text{ km} \times 6\text{ km}$ 의 지상 면적을 관측한다.

구현된 알고리즘은 동일 대상 지역에 대해서 빔 분할을 수행하여 3개의 빔을 합성하여 고해상도 영상을 합성하여 해상도를 개선한다. 동일 영역을 3개의 빔분할을 통해 나눠서 수집한 후 통합하여 신호처리를 수행하므로 방위방향 해상도가 3배 개선되는 효과를 기대할 수 있다. 그림 9는 서브빔 데이터를 합성하기 위해 선정한 점표적의 위치를 나타낸다. 해당 위치에서의 점표적 영상을 서브 빔 데이터 합성에 적용하였다.

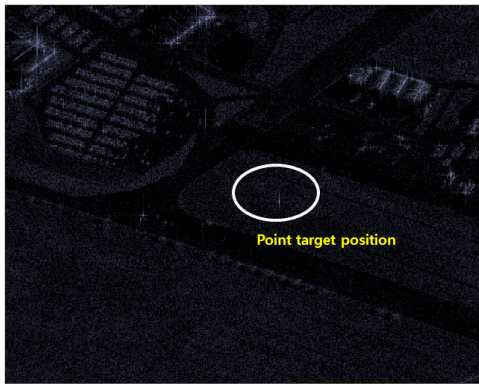


그림 9. SAR 영상에서의 점표적 위치
Fig. 9. Point target position in SAR image.

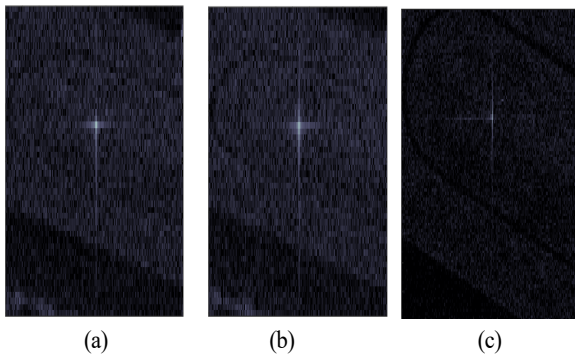
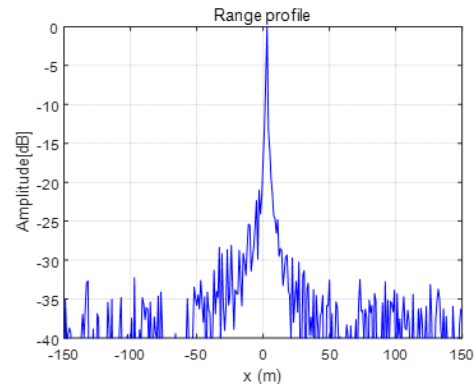


그림 10. 서브 빔 SAR 영상과 통합 SAR 품질 변화 비교. (a) 서브 빔 1, (b) 서브 빔 2, (c) 서브 빔 (1, 2, 3) 통합 영상

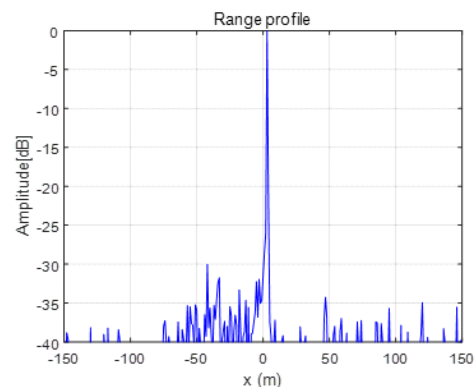
Fig. 10. Sub SAR images and image quality enhancement through sub-aperture merge. (a) sub-image 1, (b) sub image 2, (c) merged SAR image of sub-beam(1, 2, 3).

그림 10(c)는 3개의 서브 빔 데이터를 융합하여 생성된 결과를 보인다. 그림 10(a), (b)와 비교 시 상대적으로 점표적의 해상도가 개선된 것을 볼 수 있다. 이는 그림 7에서 서브 빔 합성에 의해 영상의 해상도가 개선되는 것을 반영한 것이라고 할 수 있다. 단일 서브 빔 데이터는 약 560 Mbyte의 크기를 갖고 있으며, 그림 10(c)의 원시 데이터는 서브 빔의 개수에 비례하여 3배인 1.6 Gbyte의 크기를 갖는다. PFA 알고리즘 연산 시간은 영상의 크기에 비례하여 증가한다.

실험에 사용된 PC는 AMD 라이젠 7 8-코어 프로세서 3.7 GHz 클럭 속도를 갖는 프로세서와 32 GB의 메모리의 사양을 갖고 매트랩으로 구현된 PFA를 구동하였다. 이때



(a) 단일 서브 빔
(a) A single sub-aperture case

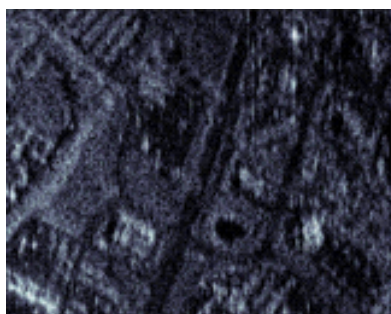


(b) 3개의 서브 빔 통합
(b) After 3 sub-aperture channels are merged

그림 11. 점표적 영상의 거리방향 프로파일
Fig. 11. SAR image range profile.

단일 서브 SAR 영상을 생성하는데 소요시간은 1.4초이고, 3개의 빔이 통합된 영상을 생성하는데 소요시간은 4.3초로 서브 빔의 개수에 정비례하는 결과를 보였다. 그림 11은 그림 10의 점표적에 대한 해상도 개선 효과를 정량적으로 분석하기 위해 거리 방향의 프로파일을 생성한 결과이다. 그림 11(b)는 3개의 서브 빔을 통합한 영상에 대한 결과로, 단일 서브 빔을 통해 생성한 그림 11(a)에 비해 영상의 품질이 향상된 결과를 나타낸다.

그림 12는 이와 같은 방식을 확장된 영역에 적용하여 빔 조향 합성에 의한 SAR 영상 품질 개선을 보여준다. 그림 12(a)는 약 500×500 [m] 크기의 관측 영역을 단일 서브 빔만을 사용하여 획득한 영상이다. 그림 12(b)는 이러한 서브 빔을 서로 다른 각도에서 조사하여 획득한 데이터를 통합하여 생성한 결과이다.



(a) 단일 서브 빔에 의한 저해상도 영상
(a) A single sub-aperture case



(b) 3개의 서브 빔 통합 영상
(b) After three sub-aperture channels are merged.

그림 12. 스윙트 각 변화에 따라 획득된 서브 빔 통합 SAR 영상 품질

Fig. 12. SAR image quality over the squinted aperture area generated.

그림 10에서 본 바와 같이 서브 빔 데이터의 융합을 통해서 SAR 영상의 해상도가 향상되고, 표적 탐지를 위한 품질이 개선됨을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 제시한 PFA 기반의 서브 빔 분할 및 통합 방식을 통해 제한된 레이다 하드웨어를 사용하여 영상의 해상도를 개선할 수 있음을 보였다.

이를 위해 전방관측 모드에서 광역의 고해상도 영상을 획득하기 위해 스폿라이트 모드에서 빔포밍에 기반한 PFA 알고리즘을 적용하였다. 분할된 서브 빔에 분리하여 데이터를 보정한 후 데이터를 융합하여 고해상도 영상을 확보하는 방안을 제시하였다. 해당 알고리즘은 잔차 오차의 수식을 도출하지 않으며, 넓은 영역에 대한 고해상도 영상을 확보할 수 있다. 기존 단순 PFA 알고리즘만을 사용한 경우에 비교하여 서브 빔을 분할하여 생성한 점표적 영상의 품질이 향상됨을 보였다. 서브 빔 데이터를 병합하는 과정에서 발생할 수 있는 데이터 공백에 따른 영상의 품질을 분석하였으며, 시뮬레이션에서 확장하여 실제 실험 데이터를 기반으로 다중 빔 데이터를 병합하여 영상의 품질을 향상함을 보였다. 향후 데이터 병합과정에서 발생할 수 있는 데이터 손실을 극복할 수 있는 방안이 추가로 구현될 경우, 스윙트 빔 조향을 통해 항공기 SAR 영상의 해상도를 개선할 수 있을 것으로 기대된다.

서브 빔의 수가 증가함에 따라 비례하여 증가하는 연산 소요 시간을 줄이기 위해 GPU를 접목한 연구가 필요할 것이며, 나아가 실시간 SAR를 기반으로 비디오 영상 생성 기술을 구현하는 토대가 될 수 있을 것이다.

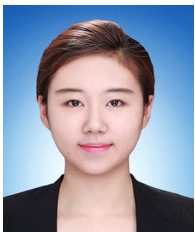
References

- [1] H. S. Shin, J. T. Lim, "Range migration algorithm for airborne squint mode spotlight SAR imaging," *IET Radar, Sonar and Navigation*, vol. 1, no. 1, pp. 77-82, 2007.
- [2] S. H. Park, J. I. Park, and K. T. Kim, "Motion compensation for squint mode spotlight SAR imaging using effi-

- cient 2D interpolation," *Progress in Electromagnetics Research*, vol. 128, pp. 503-518, 2012.
- [3] Y. Yuan, J. Sun, and S. Mao, "PFA algorithm for airborne spotlight SAR imaging with non-ideal motions," *IEEE Proceedings-Radar, Sonar and Navigation*, vol. 149, no. 4, pp. 174-182, 2002.
- [4] Y. Lin, W. Hong, W. Tan, and Y. Wu, "Extension of range migration algorithm to squint circular SAR imaging," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 8, no. 4, pp. 651-655, Jul. 2011.
- [5] D. Zhu, X. Mao, Y. Li, and Z. Zhu, "Far-field limit of PFA for SAR moving target imaging," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 46, no. 2, pp. 917-929, Apr. 2010.
- [6] Y. Wang, J. Li, J. Chen, H. Xu, and B. Sun, "A parameter-adjusting polar format algorithm for extremely high squint SAR imaging," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 52, no. 1, pp. 640-650, Jan. 2013.
- [7] B. D. Rigling, R. L. Moses, "Polar format algorithm for bistatic SAR," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 40, no. 4, pp. 1147-1159, 2004.
- [8] X. Nie, S. Shen, G. Guo, and L. Zhuang, "A beam segmentation based 2-step polar format algorithm for highly squinted SAR," in *2018 IEEE Radar Conference(Radar-Conf18)*, Oklahoma, OK, Apr. 2018, pp. 1472-1475.
- [9] X. Peng, W. Hong, Y. Wang, W. Tan, and Y. Wu, "Polar format imaging algorithm with wave-front curvature phase error compensation for airborne DLSLA three-dimensional SAR," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 11, no. 6, pp. 1036-1040, Jun. 2014.
- [10] C. V. Jakowatz, D. E. Wahl, P. H. Eichel, D. C. Ghiglia, and P. A. Thompson, *Spotlight-Mode Synthetic Aperture Radar: A Signal Processing Approach: A Signal Processing Approach*, New York, NY, Springer Science & Business Media, 2012.
- [11] J. P. Sun, Y. Lv, H. O. N. G. Wen, and S. Y. MAO, "The polar format imaging algorithm for forward-looking bistatic SAR," in *7th European Conference on Synthetic Aperture Radar*, Friedrichshafen, 2008, pp. 1-4.

문 민 정 [한국항공대학교/연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-3234-6191>



2016년 02월: 한서대학교 항공전자공학과 (공학사)
 2016년 03월~현재: 한국항공대학교 전자 및 항공전자정보공학과 (공학석사)
 [주 관심분야] SAR 신호처리, SAR 원격 탐사, 위성전자 레이더 탑재체

이 우 경 [한국항공대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-2092-2048>



1994년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자 공학과 (공학사)
 1996년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자 공학과 (공학석사)
 1999년 12월: 런던대학교(UCL) 전기전자 공학과 (공학박사)
 1999년 10월 ~ 2002년 12월: 한국과학기술원 인공위성센터 연구교수
 2004년 9월~현재: 한국항공대학교 항공전자정보공학과 교수
 [주 관심분야] 위성탐체, SAR 영상, 레이더 시스템 및 신호 처리

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

문 효 이 [한화시스템/연구원]

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



2014년 2월: 이화여자대학교 전자공학과 (공학사)
2016년 2월: 한국과학기술원(KAIST) 전기 및 전자공학과 (공학석사)
2016년 7월~현재: 한화시스템(주) 연구원
[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 3월~2017년 6월: 한국과학기술연구원 박사후연구원

2017년 6월~현재: 한화시스템(주) 전문연구원
[주 관심분야] RADAR System, Microwave Imaging