

## 論文

J. of The Korean Society for Aeronautical and Space Sciences 44(10), 921-932(2016)

DOI: <http://dx.doi.org/10.5139/JKSAS.2016.44.10.921>

ISSN 1225-1348(print), 2287-6871(online)

## SAR 집중조사모드를 위해 전 개구면을 사용하는 수정된 FSA 기법

정영광, 나원상\*

A Modified FSA Technique Using Full-aperture  
for SAR Spotlight Mode

Young-Kwang Jung and Won-Sang Ra\*

Department of Mechanical &amp; Control Engineering, Handong University

## ABSTRACT

In this paper, a modified FSA(Frequency Scaling Algorithm) is proposed for KOMPSAT-5 high-resolution SAR image generation. In order to enhance performance of azimuth compression, degraded in sub-aperture processing due to the imperfect geometric parameter of data acquisition, the full-aperture signal processing algorithm is designed based on the exact time-frequency analysis. In addition, an azimuth scaling function is newly devised to make the full-aperture processing algorithm suitable for KOMPSAT-5 sliding-spotlight mode. Different from the previous sub-aperture FSA schemes, the suggested technique could accommodate the merit of unified signal processing structure regardless of operational modes of KOMPSAT-5. Through the point target simulation, it is verified that the suggested algorithm provides superior performance of azimuth compression over the existing full-aperture processing methods. The experimental results using real data acquired by KOMPSAT-5 are also given to demonstrate the effectiveness of our scheme as well.

## 초 록

본 논문에서는 아리랑 5호의 고해상 SAR(Synthetic Aperture Radar) 영상 생성을 위해 수정된 주파수 스케일링 알고리즘(FSA: Frequency Scaling Algorithm)을 제안한다. 부 개구면(sub-aperture) 처리 과정에서 부정확한 기하 파라미터의 사용이 야기하는 방위압축 성능 저하 문제를 개선하기 위해, 정확한 시간-주파수 분석을 통해 전 개구면(full-aperture) 신호처리 알고리즘을 설계한다. 이와 더불어, 아리랑 5호의 이동 집중조사(sliding-spotlight) SAR 신호처리에 적합한 전 개구면 신호처리 알고리즘을 위해 방위 스케일링 함수를 새롭게 제안하였다. 기존의 부 개구면 FSA 방식과 달리, 제안된 방법은 아리랑 5호의 모든 운용 모드에 적용 가능한 일관된 신호처리 구조를 제공한다는 장점이 있다. 점표적 모의실험을 통해, 제안된 알고리즘이 기존의 전 개구면 데이터 처리 기법들에 비해 우수한 방위압축 성능을 제공함을 확인한다. 또한 아리랑 5호에서 획득된 실 데이터 처리 결과를 제시함으로써 제안된 기법의 유용성을 검증한다.

**Key Words :** High-resolution SAR(고해상 영상레이더), Sliding-spotlight(이동 집중조사), KOMPSAT-5(아리랑 5호), Full-aperture processing(전 개구면 신호처리)

† Received : May 16, 2016      Revised : September 8, 2016      Accepted : September 10, 2016

\* Corresponding author, E-mail : [wonsang@handong.edu](mailto:wonsang@handong.edu)

## 1. 서론

합성개구면레이더(SAR: Synthetic Aperture Radar) 신호처리는 이동 안테나로부터 획득되는 레이더 신호의 상관성(coherency)을 이용하여 2차원 레이더 영상을 생성하는 것을 목적으로 한다. SAR 기술을 적용하는 경우 작은 크기의 안테나를 사용하더라도 방위방향으로 높은 분해능을 얻을 수 있는 장점이 있다. 또한 주야 및 전천후 센서로서 금속성 표적을 쉽게 탐지할 수 있는 특성으로 인해 광학센서와 함께 감시정찰임무에 중요하게 사용된다. 민수분야에서도 SAR의 다양한 운용주파수 특성과 광역 모니터링 이점을 활용하여 재해/재난감시, 농작물 작황분석, 조류 분석 등 다양한 연구가 진행되고 있다[1].

SAR 센서는 주로 항공기나 인공위성과 같은 비행체에 탑재되는데, 이는 작은 크기의 안테나를 비행시킴으로써 큰 합성개구면의 효과를 얻기 위함이다. 특히 인공위성 SAR는 항공 SAR에 비해 운영환경이 안정적이며 광범위한 지역을 탐사할 수 있어 그 활용도가 높다. 국내에서는 고해상 위성 SAR 시스템을 자체 확보하기 위해, 2013년 8월에 이탈리아 TASI(Tales Alenia Space Italy)와의 기술협력을 통해 SAR 탑재체가 장착된 아리랑 5호(KOMPSAT-5: the fifth of KOREA MultiPurpose SATellite)를 발사한 바 있다[2,3].

아리랑 5호 SAR 탑재체는 다양한 크기와 해상도를 갖는 SAR 영상을 제공한다. 이때, 레이더 운용 방법은 Fig. 1에 도시한 바와 같이 레이더 빔 조향 방법에 따라 표준(ST: Standard), 광역(WD: WiDe swath), 고해상(HR: High Resolution) 모드로 구분된다. 고해상 모드 SAR 영상을 획득하기 위해 일반적으로 레이더 빔을 동일 지역에 고정 집중조사(staring-spotlight)하는 방식이 사용되는데 반해, 아리랑 5호는 레이더 빔 조사 영역(footprint)을 비행방향으로 움직이도록 조향함으로써 방위방향의 촬영면적을 확장시키는 이동 집중조사(sliding-spotlight) 방식을 채택한다. 고해상 모드의 경우 다른 모드에 비해 표적의 도플러 주파수 대역폭이 커지며, 여기에 디지털신호처리 기법을 적용하기 위해서는 빠른 샘플러와 대용량의 저장장치의 복조기가 필요하다. 다행히 복조기를 거치기 전 역칩 수신(dechirp-on-receive) 방법을 적용하면 이러한 고성능 하드웨어 요구조건을 적절히 완화시킬 수 있는 것으로 알려져 있다[4]. 아리랑 5호 역시 동일한 방법을 사용하고 있으므로 고해상 영상 생성을 위해서는 역칩 수신신호 모델을 기반으로 한 레이더 영상

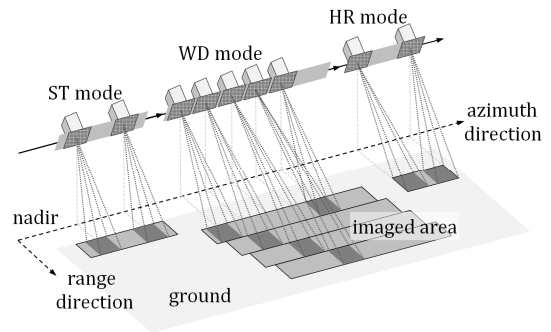


Fig. 1. Operational modes of KOMPSAT-5

생성 알고리즘 설계가 필수적이다. 역칩 수신신호로부터 고해상 SAR 영상을 생성하기 위해 FSA(Frequency Scaling Algorithm)의 적용을 고려해볼 수 있다[5]. 단, FSA는 기본적으로 거리압축(range compression)을 위한 일종의 RCMC(Range Cell Migration Correction) 기법이므로 2차원 레이더 영상 생성을 위해서는 별도의 방위압축 알고리즘이 요구된다. 전통적인 FSA 기반 알고리즘에서는 여러 부 개구면(sub-aperture) 데이터를 각기 압축하고 여기에 SPECAN(SPECTRAL ANALYSIS) 기법을 적용하여 고해상 영상으로 복원한다[5,6]. 하지만 기존의 FSA기법은 고정 집중조사 모드 SAR 영상생성을 목적으로 하고 있어, 이동 집중조사 모드에 적용할 경우 주파수 왜곡(wrap-around) 현상이 발생할 수 있다[7].

한편, FSA 기법에 후처리 알고리즘을 결합한 BAS(Baseband Azimuth Scaling) 알고리즘이 제안된 바 있다[7]. BAS 알고리즘은 FSA와 동일하게 부 개구면 데이터 처리 구조를 채택하고 있는데, 이는 각 부 개구면의 방위방향 신호 대역폭이 PRF(Pulse Repetition Frequency)보다 작아서 거리압축 과정에서 발생할 수 있는 주파수 중복(aliasing) 문제를 해결하고 계산량을 줄이기 위함이다. BAS 알고리즘은 전술한 FSA의 문제점을 해결하기 위해, 레이더 빔 회전에 따라 달라지는 표적 신호 대역폭을 고려하여 방위 스케일링 함수를 정의하고, 이를 방위압축 시 사용한다. 그러나 BAS 역시 분할된 각 부 개구면에 대해 추정된 유효속도(effective velocity)의 정확도와 부 개구면의 개수와 길이에 따라 방위압축 성능이 좌우되는 문제를 지니고 있다[8,9].

이러한 문제를 극복하기 위해 전 개구면(full-aperture) 신호처리 기법이 제안되었다[10]. 이 기법은 안테나와 표적 사이의 상대적인 기하 분석 결과로부터 방위신호의 주파수 범위를 계산한 후, 영삽입(zero-padding)을 통하여 방위 신호처

리 대역폭을 확장시키는 것이다. 이 경우 부 개구면 기법의 단점인 방위방향 주파수 중복 문제와 부 개구면 신호처리 시 요구되는 유효속도의 정밀 추정 문제를 고려할 필요가 없어지는 반면, 계산량이 증가하는 단점이 생긴다. 다행히 계산량 문제는 최근 개발된 GPU(Graphic Processing Unit) 기반 CUDA(Compute Unified Device Architecture)와 같은 병렬처리 기법을 사용하여 상당부분 해결 가능하다. 더욱이, 전 개구면 데이터 처리 기법은 부 개구면 데이터 처리 기법과 달리 신호처리 구조의 변경 없이 모든 레이더 운용 모드에서 적용이 가능하다. 이러한 이유로, Sliding-Spotlight, TOPS(Terrain Observation by Progressive Scans) 등 다양한 모드를 갖춘 최신 SAR 탑재체 신호처리 개발 시 전 개구면 데이터 처리 기법이 적극적으로 사용되는 추세이다[11,12].

앞서 언급한 장점에도 불구하고 현존하는 전 개구면 SAR 신호처리 알고리즘들은 RMA(Range Migration Algorithm), CSA(Chirp Scaling Algorithm), ECSA(Extended CSA) 등 역첩 수신신호를 사용하지 않는 거리압축 기법들을 기반으로 하고 있다[9-15]. 그러므로 아리랑 5호 고해상 SAR 영상을 생성하기 위해서는 역첩 수신신호 모델이 반영된 거리압축 기법에 기반한 새로운 전 개구면 데이터 처리 방안을 구현해야 한다.

이러한 요구사항에 따라, 본 논문에서는 아리랑 5호의 고해상 SAR 영상 생성에 적합한 전 개구면 데이터 처리 구조를 갖는 SAR 신호처리 알고리즘을 제안한다. 이를 위해 아리랑 5호 고해상 모드의 데이터 획득 기하 및 역첩 수신신호 모델을 기반으로 전처리 및 후처리 알고리즘을 설계한다. 이때 효과적인 방위압축을 수행하기 위해 기존 FSA의 방위 첩 모델을 고려하되 전 개구면 데이터 처리 구조에 기반한 이동 집중조사 SAR 영상생성이 가능하도록 방위 스케일링 함수를 새롭게 정의한다. 제안된 신호처리 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 먼저 가상 점표적에 대한 SAR 영상을 생성하고 그 결과를 분석한다. 이와 더불어, 실 데이터 처리를 통해 제안된 기법이 실제 아리랑 5호의 고해상 SAR 영상 생성에 적용 가능성을 보인다.

## II. 전 개구면 고해상 SAR 신호처리

### 2.1 고해상 모드 데이터 획득 기하

아리랑 5호는 고해상 SAR 영상획득을 위해

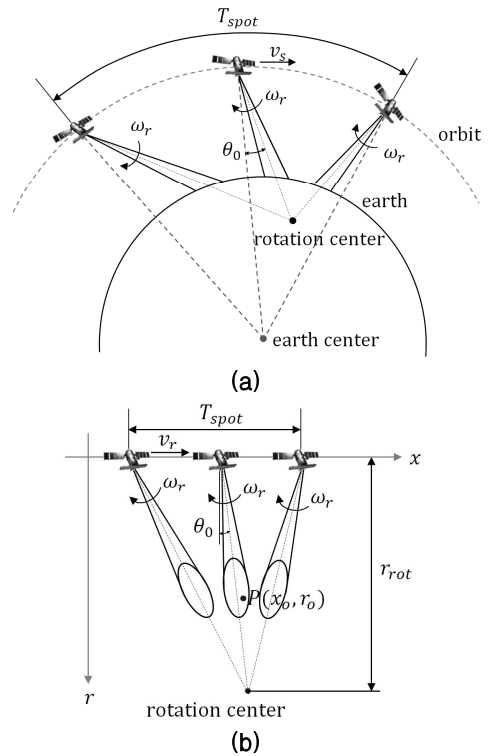


Fig. 2. Sliding-spotlight mode geometry with squint angle: (a) Curvature model (b) Rectilinear model

이동 집중조사(squinted sliding-spotlight) 방식을 채택하고 있다. 이때 아리랑 5호는 요 각을 조정하여 도플러 중심 주파수  $f_{DC}$ 가 0이 되도록 제어하지만, 불가피하게 방위방향으로 작은 크기의 편향 조향각(squint angle)이 발생한다. 편향 조향각을 갖는 이동 집중조사 모드에서 인공위성의 데이터 획득 기하를 경사(slant range)평면 상에서 나타내면 Fig. 2(a)와 같다[12]. 여기서  $v_s$ 는 위성속도,  $v_g$ 는 위성의 지면속도,  $\omega_r$ 은 레이더 빔 조향각 변화율,  $\theta_0$ 는 편향 조향각,  $r_{rot}$ 은 레이더 빔 조향 중심과 안테나 사이의 거리를 나타낸다. 레이더 신호를 획득하는 시간이 수 초 정도로 짧다면 궤도를 직선으로 근사화 하고 촬영영역을 평평한 지구(flat earth)로 가정해도 무방하다. 이러한 가정에 따라 근사화된 직각선형(rectilinear)의 데이터 획득 기하를 Fig. 2(b)에 보인다. 일반적으로 직각선형 기하 상에서 위성의 직선 궤적과 영상 중심 사이의 거리  $r_c$ 와  $r_{rot}$ 의 관계를 조향인수(steering factor)  $A$ 로 정의한다[12].

$$A = \frac{r_{rot} - r_c}{r_{rot}} \quad (1)$$

Fig. 2로부터 이동 집중조사 모드는  $0 < A < 1$ 이 만족됨을 알 수 있다. Fig. 2(b)에서 유효속도  $v_r$ 은 SAR 신호처리 시 중요하게 사용되는 파라미터이다.  $v_r$ 은 위성속도  $v_s$  및 위성의 지면속도  $v_g$ 와 다음의 관계를 갖는다[16].

$$v_r \approx \sqrt{v_s \cdot v_g} \quad (2)$$

또한, 직각선형기하에서  $v_r$ 은 도플러 변화율  $f_{DR}$ 과 다음 관계를 갖는다[12].

$$v_r \approx \sqrt{\frac{f_{DR}\lambda r_0}{2\cos^3\theta_0}} \quad (3)$$

Figure 2(b)에서 표적  $P$ 의 위치를  $(x_0, r_0)$ , 방위 절대시간을  $t_a$ , 표적  $P$ 의 영도플러(zero-Doppler) 방위 절대시간을  $t_{a,0}$ 라고 정의하면, 피타고라스의 정리에 의해  $t_a$  시점에 인공위성과 표적  $P$ 까지의 거리  $r$ 은 다음과 같다.

$$r = \sqrt{r_0^2 + v_r^2(t_a - t_{a,0})^2} \quad (4)$$

편향 조향각을 갖는 이동 집중조사 모드 신호의 시간-주파수 관계는 부록에 정리하였다.

## 2.2 고해상 SAR 신호처리 알고리즘

본 논문에서 제안하는 아리랑 5호의 고해상 모드 SAR 신호처리 알고리즘은 Fig. 3과 같이 세 단계로 구성된다[11,12]. Fig. 3에서 방위신호와 거리신호는 각각 아래첨자  $a$ 와  $r$ 로 표시되며 시간영역의 신호이면 소문자  $s$ , 주파수영역의 신호이면 대문자  $S$ 로 표시된다. Fig. 3을 통해, 전처리와 후처리 단계에서 방위신호를 처리하여 각각  $S_{a,pre}$ 와  $s_{a,post}$ 가 생성되며, 수정된 FSA를 이용하면 거리신호  $s_r$ 은  $S_{r,FSA}$ 로 변환됨을 알 수 있다.

전처리 과정은 수신된 신호에 대한 방위 대역폭 확장과 더불어 수신된 신호의 주파수를 모두 기저대역(baseband)으로 변환시키는 역할을 한다. 전처리 과정은 특정 칩 신호와의 방위 컨볼루션과 방위 FFT로 요약된다. 이때 특정 조건을 만족하도록 설계 파라미터를 설정하면 컨볼루션 연산이 간단하게 정리된다. 이러한 전처리 단계의 세부 내용은 2.2.1에 기술하였다.

거리신호 압축은 FSA를 기반으로 이루어진다. 다만, 본 논문에서 제안하는 알고리즘은 기존의 FSA와 다른 두 가지 중요한 특징을 지닌다. 즉, 1) 이동 집중조사 모드에 적합하도록 방위 스케일링 함수  $H_{AS}$ 가 재정의되며, 2) 방위 스케일링

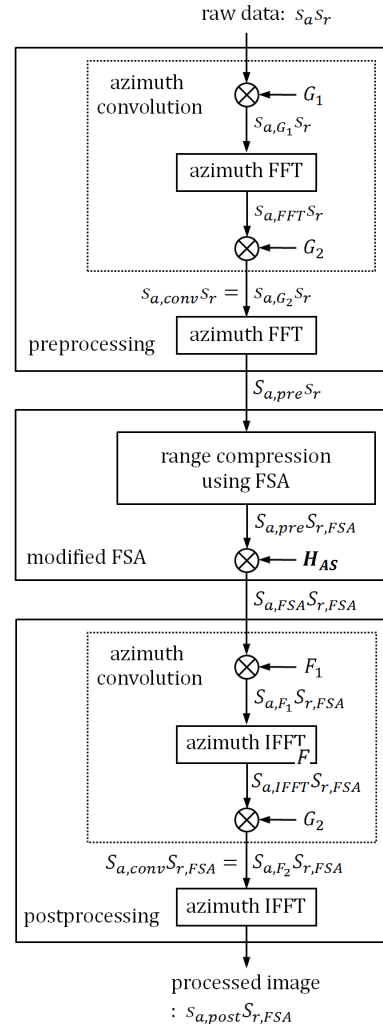


Fig. 3. Proposed algorithm(SAR spotlight mode)

시 발생하는 주파수 중복 현상을 방지하기 위해 기존의 FSA에 요구되는 시간 천이(time shift) 함수  $H_{AZV}$ 가 삭제된다[5]. 이는 전처리 과정을 통해 충분한 처리 대역폭이 확보되므로 더 이상 주파수 중복 문제를 고려할 필요가 없기 때문이다. 수정된 FSA 기법은 2.2.2에서 자세히 다룬다.

후처리 과정에서도 전처리 과정과 동일하게 특정 칩 신호에 대한 컨볼루션이 수행되지만, 최종적인 SAR 영상을 방위시간 영역에서 표현하기 위해 IFFT 연산이 이루어진다. 이 과정에서 방위 시간 대역의 확장과 주파수 대역이 축소되는 현상이 발생하는 특징이 있다. 후처리의 목적은 전처리 시 적용된 영삽입(zero-padding)의 영향을 고려하여 방위신호를 압축하는 것이다. 이러한 방위압축 방식은 SPECAN 알고리즘과 유사하지

만 최종 영상을 방위시간 영역에서 생성한다는 점에서 차이가 있다. 후처리 과정의 세부 내용은 2.2.3에서 다룬다.

제한된 알고리즘 설계를 위해 수행되는 시간-주파수 분석은 방위신호에 대해서 이루어진다. 이때 수식전개의 편의를 위해 식 (A.7)의 정의를 이용하여 절대 방위시간  $t_a$  대신 상대 방위시간  $\tau_a$ 가 사용된다. 식 (A.2)으로부터,  $\tau_a$  시점에 수집된 임의의 표적  $P(x_0)$ 에 대한 원시(raw) 데이터 방위신호  $s_a$ 는 다음과 같다.

$$s_a(\tau_a; x_0) = C_0 \text{rect} \left[ \frac{\tau_a}{T_{spot}} \right] \text{rect} \left[ \frac{A \cdot \tau_a - \tau_{a,0}}{T_f} \right] \times \exp \left[ j2\pi f_{DC} \tau_a + j\pi f_{DR} (\tau_a - \tau_{a,0})^2 \right], \quad (5)$$

여기서 편리성을 위해 방위시간과 관계없는 항들은 상수  $C_0$ 로 대체한다.

식 (5)에서  $\text{rect}[\tau/\alpha]$ 는 폭이  $\alpha$ 이며 크기가 1인 사각윈도우(rectangular window) 함수이고,  $\tau_{a,0}$ 는  $t_{a,0}$ 에 대한 상대 방위시간이다.

### 2.2.1 전처리 알고리즘

본격적인 전처리를 수행하기 전, 도플러 중심 주파수의 영향을 제거하기 위해 식 (5)에 위상함수  $\exp[-j2\pi f_{DC} \tau_a]$ 를 곱한다. 전처리를 위해 정의된 칩 신호  $s_{pre}$ 는 다음과 같다.

$$s_{pre}(\tau_a) = \exp[-j\pi k_\omega \tau_a^2] \quad (6)$$

식 (6)에서 레이더 빔 조향 변화율  $k_\omega$ 는 식 (A.5)에 정의되어 있다. 전처리에 사용하는 컨볼루션 식은 다음과 같다.

$$s_{a,conv}(\tau_a; x_0) = s_{pre}(\tau_a) \times \int (s_a(\tau_u; x_0) \exp[-j2\pi f_{DC} \tau_u] s_{pre}(\tau_u)) \exp[-j2\pi(-k_\omega)\tau_a \tau_u] d\tau_u \quad (7)$$

식 (7)에서 적분기호 내  $s_a$ 와  $s_{pre}$ 를 포함하는 괄호 부분이 전처리 과정의 첫 번째 단계이다. 이는 수신된 신호 (5)에 다음 함수를 곱하는 것과 마찬가지로이다.

$$G_1(\tau_a) = \exp[-j\pi k_\omega \tau_a^2 - j2\pi f_{DC} \tau_a] \quad (8)$$

따라서 전처리 첫 번째 단계의 수행 결과는 다음과 같다.

$$s_{a,G_1}(\tau_a; x_0) = C_1 \text{rect} \left[ \frac{\tau_a}{T_{spot}} \right] \text{rect} \left[ \frac{A\tau_a - \tau_{a,0}}{T_f} \right] \times \exp[-j2\pi k_\omega \tau_{a,0} \tau_a + j\pi(k_a - k_\omega) \tau_a^2] \quad (9)$$

여기서  $k_a = f_{DR}$ 의 관계가 사용되었다.

이 연산으로 인해 방위신호의 칩 변화율이  $k_a$ 에서  $k_a - k_\omega$ 로 바뀌는데, 이는 각 표적의 방위 칩 변화율에서 빔 조향에 의한 영향이 제거되었음을 의미한다. 한편, 다음의 조건이 만족되면 식 (7)의 적분 연산은 FFT로 바꿔 쓸 수 있다[12].

$$N_{pre} = \frac{1}{(-k_\omega) \Delta\tau_a \Delta\tau_{a,pre}} \quad (10)$$

$N_{pre}$ 는 FFT 과정에서 영삽입을 통해 증가된 전체 방위 픽셀 개수이다.  $\Delta\tau_a$ 는 기존의 방위시간 간격으로서  $1/PRF$ 이며,  $\Delta\tau_{a,pre}$ 는 영삽입의 영향으로 새롭게 정의되는 방위시간 간격이다.

FFT 시 영삽입이 필요한 이유는 방위 대역폭을 의도적으로 확장시켜 모든 방위신호 주파수 성분이 기저대역 내에 존재하도록 하기 위함이다. 따라서 영삽입을 통해 새롭게 정의된 방위 대역폭  $B_{pre}$ 는 다음 조건을 만족해야 한다.

$$B_{pre} = \frac{1}{\Delta\tau_{a,pre}} \geq B_{tot} \quad (11)$$

$B_{tot}$ 는 식 (A.6)를 통해 얻어진다.  $B_{tot}$ 에 충분히 작은 상수를 더하여  $\Delta\tau_{a,pre}$ 를 설계하고 식 (10)에 대입하면 영삽입 픽셀 수  $N_{pre}$ 가 결정된다.

POSP(Principle Of Stationary Phase) 기법을 이용하여 식 (7)의 적분을 수행하면 다음 식을 얻는다[17].

$$s_{a,FFT}(\tau_a; x_0) = C_2 \text{rect} \left[ -\frac{\tau_a - \frac{\tau_{a,0}}{1-A}}{AT_{spot}} \right] \text{rect} \left[ \frac{(A-1)\tau_a}{t_f} \right] \times \exp \left[ -j\pi \frac{1}{k_a - k_\omega} (k_\omega \tau_a - k_a \tau_{a,0})^2 \right] \quad (12)$$

식 (12)에  $G_2(\tau_a) = s_{pre}(\tau_a)$ 를 곱하면,

$$s_{a,G_2}(\tau_a; x_0) = C_3 \text{rect} \left[ -\frac{\tau_a - \frac{\tau_{a,0}}{1-A}}{AT_{spot}} \right] \times \text{rect} \left[ \frac{(A-1)\tau_a}{T_f} \right] \times \exp[-j\pi k_{a1} (\tau_a - \tau_{a,0})^2], \quad (13)$$

여기서

$$k_{a1} = \left( \frac{1}{k_\omega} - \frac{1}{k_a} \right)^{-1} = \frac{k_a k_\omega}{k_a - k_\omega}.$$

식 (13)으로부터 방위 컨볼루션의 결과로 각 표적 신호의 칩 변화율이  $-k_{a1}$ 로 통일되며 모든

표적이  $\tau_a = 0$  시점에 모이게 됨을 알 수 있다.

전처리 단계의 최종 과정으로 식 (13)에 방위 FFT를 적용하면 식 (14)를 얻는다.

$$S_{a,pre}(f_a; x_0) = C_4 \text{rect} \left[ \frac{f_a + k_a \tau_{a,0}}{k_a T_{spot}} \right] \times \text{rect} \left[ -\frac{f_a - k_{a1} \tau_{a,0}}{B_f/A} \right] \times \exp \left[ -2\pi \tau_{a,0} f_a + j\pi \frac{f_a^2}{k_{a1}} \right] \quad (14)$$

식 (14)에서 첫 번째 사각함수는 주파수 영역에서  $f_a = -k_a \tau_{a,0}$ 를 중심으로  $|k_a| T_{spot}$  만큼의 주파수 대역을 지정하며, 이는  $|k_a| T_{spot} \gg B_{tot}$ 의 조건을 만족하므로 이후의 시간-주파수 분석에서는 본 사각함수를 고려하지 않는다.

식 (14)를 시간-주파수 영역에서 관찰하기 위해 위상 함수의 성분을 주파수  $f_a$ 에 대해 미분하면 다음 식을 얻을 수 있다.

$$f_a = k_{a1}(\tau_a + \tau_{a,0}) \quad (15)$$

식 (15)를 이용한 시간-주파수 그래프(TFD: Time-Frequency Diagram)는 Fig. 4에 도시한 바와 같다. Fig. 4로부터, 전처리로 인해 각 표적 신호의 방위 척 변화율은  $k_a$ 에서  $k_{a1}$ 로 바뀌었음을 알 수 있다. 따라서 전 개구면 SAR 신호처리 알고리즘의 방위압축 성능을 개선하기 위해서는 이러한 방위 척 변화율의 변화를 반드시 고려해야 한다.

### 2.2.2 보완된 FSA

전처리의 결과로 변화된 방위 척 신호의 특징을 관찰하기 위해 식 (13)에  $k_{a1}$ 의 정의를 이용하여 식 (14)의 방위 척 신호를 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\exp \left[ j\pi \frac{f_a^2}{k_{a1}} \right] = \exp \left[ -j\pi \frac{f_a^2}{k_a} \right] \exp \left[ j\pi \frac{f_a^2}{k_w} \right] \quad (16)$$

식 (16)에서 방위 척 신호는  $k_a$ 와  $k_w$  성분으로 구성됨을 알 수 있다. 후처리 과정에서 정상적인 방위압축을 수행하기 위해서는 식 (16)의 척 신호가 사전에 완벽하게 제거되어야 한다. Fig. 3에 도시한 바와 같이, 거리압축을 위해 제안된 알고리즘은 기존의 FSA와 유사하지만 역척 수신에 의해 모델링된 방위방향 척을 완벽하게 제거하기 위해서는 방위 스케일링 함수를 새롭게 정의할 필요가 있다. 이를 위해, 먼저 기존 FSA에서 사용하는 방위 척 신호의 의미를 살펴본다. 기존

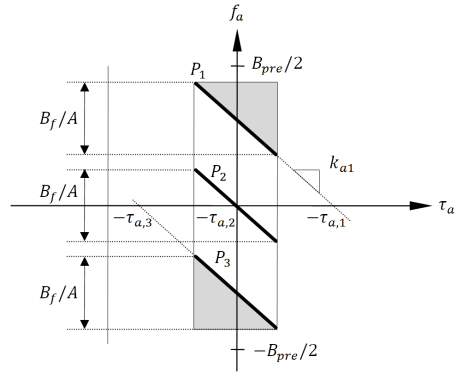


Fig. 4. Azimuth TFD after preprocessing

FSA에서는 스케일링 인수 (scaling factor)  $\beta$ 를 이용하여 주파수 영역의 역척 수신신호 모델을 제시한다[5]. 이 과정에서 표적의 방위 척 신호  $\bar{s}_{chirp}$ 는 일반적으로 표현되는 표적신호의 선형 척 변화율  $k_a$  대신  $\beta$ 로 모델링된다.

$$\bar{s}_{chirp}(\beta) = \exp \left[ -j \frac{4\pi r_0 \beta}{\lambda} \right] \quad (17)$$

$$\text{여기서 } \beta = \sqrt{1 - \frac{f_a^2 \lambda^2}{4v_r^2}}.$$

따라서 이러한 FSA의 척 모델은  $k_a$ 가 직접 사용된 전형적인 전 개구면 데이터 처리 방식의 척 모델  $s_{chirp}$ 과 유사한 물리적 의미를 지닌다.

$$\bar{s}_{chirp}(\beta) \sim s_{chirp}(k_a) = \exp \left[ -j \frac{4\pi r_0}{\lambda \cos \theta_0} \right] \exp \left[ -j \frac{\pi f_a^2}{k_a} \right] \quad (18)$$

위 식의 첫 번째 위상 항은 식 (14)에 포함된 복소계수로서 식 (A.2)에서 확인 가능하다. 기존 FSA가  $k_a = k_w$ 의 관계를 만족하는 고정 집중조사 모드 신호처리 알고리즘이라는 사실로부터 관계식 (18)을 유추할 수 있다. 따라서 이동 집중조사 모드 ( $|k_a| > |k_w|$ ) SAR 신호를 처리하기 위해서는  $k_w$ 에 의한 영향이 별도로 고려된 방위 척 제거 과정이 필요하다.

식 (16)의 방위 척 신호를 완벽하게 제거하기 위해, 기존 FSA의 척 모델 (17)에  $k_w$ 를 반영하여 방위 스케일링 함수  $H_{AS}$ 를 정의한다.

$$H_{AS}(f_a, r_0) = \exp \left[ j \frac{4\pi r_0 (\beta - 1)}{\lambda} \right] \exp \left[ -j\pi \frac{f_a^2}{k_w} \right] \quad (19)$$

식 (19)에서 방위 스케일링 함수  $H_{AS}$ 는 기존 방

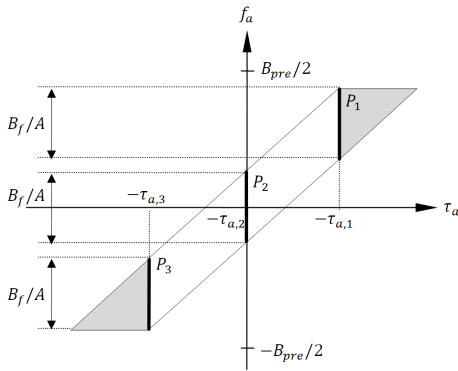


Fig. 5. Azimuth TFD after FSA

위 스케일링 함수와 동일한 형태를 지니지만  $k_{scd}$  대신  $k_{\omega}$ 가 적용되었음을 유의해야 한다[4,6].  $k_{scd}$ 은 SPECAN 기법을 사용하기 위해 도입된 방위 스케일링 파라미터이다. 기존 방법에서  $k_{scd}$ 이 적용된 이유는  $H_{AS}$ 를 이용하여 방위 첩 제거와 방위압축을 동시에 수행하기 때문이다. 그러나 제안하는 SAR 신호처리 알고리즘에서  $H_{AS}$ 는 오로지 방위 첩 제거를 위해 사용되므로,  $k_{scd}$  대신  $k_{\omega}$ 이 사용되어야 방위 첩을 완벽히 제거할 수 있다.

수정된 FSA 기법을 적용하면 방위신호 (14)는 다음과 같이 처리된다.

$$S_{a,FSA}(f_a;x_0) = C_5 \text{rect} \left[ -\frac{f_a - k_{a1}\tau_{a,0}}{B_f/A} \right] \exp[-j2\pi\tau_{a,0}f_a] \quad (20)$$

위 식을 시간-주파수 그래프 상에서 표현하면 Fig. 5와 같다. Fig. 5에서 방위 첩 신호 성분이 모두 제거되면 표적  $P(x_0)$ 의 신호는 정확히  $-\tau_{a,0}$  시점에 놓이게 된다. 한편, 이 단계에서 2차원 SAR 영상을 생성하기 위해 방위 IFFT를 취하더라도, 아래의 문제들로 인해 양질의 SAR 영상이 생성되지 못한다.

- 1) 각 신호의 방위시간이 주파수 축을 기준으로 뒤집혀(flip) 있어 영상이 반전됨.
- 2) 전처리로 인해 전체 방위시간 대역폭이  $T_{spot}$ 보다 작아 주파수 중복 현상이 발생함.
- 3) 표적 신호들 간의 방위 주파수 차이로 인해 방위 위상오차가 야기됨.

이상의 문제들을 해결하기 위해서 다음의 후처리 과정이 필요하다.

### 2.2.3 후처리 알고리즘

전처리 알고리즘과 유사하게 후처리 알고리즘

역시 기 설정된 첩 신호에 대한 컨볼루션으로 정의되지만, 주파수 영역에서의 컨볼루션으로 인해 FFT가 IFFT로 대체된다는 차이가 있다. 한편, 후처리 단계에서 데이터 개수 축소를 통해 연산부담을 줄이는 방법이 제안된 바가 있다[9]. 그러나 이에 필요한 기하정보가 불확실하다면 주파수 중복 문제와 더불어 신호 성분이 손실될 가능성이 있다. 따라서 연산량이 큰 문제가 되지 않는다면 데이터 개수를 유지하는 편이 바람직하다.

후처리 컨볼루션을 수행하기 위해 정의된 주파수 영역 첩 신호  $S_{post}$ 는 다음과 같다.

$$S_{post}(f_a) = \exp \left[ j\pi \frac{f_a^2}{k_{a1}} \right] \quad (21)$$

식 (21)과 식 (20)의 컨볼루션은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} S_{a,conv}(f_a;x_0) & \\ = S_{post}(f_a) \int (S_{a,FSA}(f_u;x_0)S_{post}(f_u)) & \\ \times \exp \left[ j2\pi \frac{f_a}{(-k_{a1})} f_u \right] df_u & \end{aligned} \quad (22)$$

후처리 단계의 첫 번째 연산을 의미하는, 식 (22)의 적분기호 내  $S_{a,FSA}$ 와  $S_{post}$ 의 곱 연산은 식 (20)에  $F_1(f_a) = S_{post}(f_a)$ 를 곱하는 것과 같다.

$$\begin{aligned} S_{a,F_1}(f_a;x_0) &= C_5 \text{rect} \left[ -\frac{f_a - k_{a1}\tau_{a,0}}{B_f/A} \right] \\ \times \exp \left[ -j2\pi\tau_{a,0}f_a + j\pi \frac{f_a^2}{k_{a1}} \right] & \end{aligned} \quad (23)$$

후처리 단계의 두 번째 연산으로, 식 (22)의 적분을 수행한다. 식 (22)의 적분을 IFFT로 표현하기 위한 조건은 다음과 같다[12].

$$N_{post} = \frac{-k_{a1}}{\Delta f_a \Delta f_{a,post}} \quad (24)$$

여기서  $\Delta f_a$ 는 전처리된 방위 주파수 대역폭에 대한 이산 주파수 간격이며,  $\Delta f_{a,post}$ 는 후처리로 인해 변경된 방위 주파수 간격이다. 앞서 기술한 바와 같이 방위 데이터 개수가 유지되므로 ( $N_{post} = N_{pre}$ ), 부록의 Fig. A1으로부터 주파수 중복현상을 방지하기 위한 방위시간 대역  $T_{post}$ 의 조건은 다음과 같다.

$$T_{post} > T_{spot} - T_{tar} = \frac{B_{tot}}{k_{\omega}} - \frac{B_{tar}}{k_a} \quad (25)$$

$T_{spot} - T_{tar}$ 는 전체 개구시간 동안 포착되는 모든

표적 신호들의 중심 관측시간을 포괄하는 값이므로, 만약 조건 (25)가 만족되면 방위시간 영역에서 주파수 중복현상이 발생하지 않는다. 조건 (25)가 충족되는지 확인하기 위해  $N_{post} = N_{pre}$  를 식 (25)에 대입한 후  $T_{post}$ 를 다시 쓰면,

$$T_{post} = \frac{1}{\Delta f_{a,post}} = \frac{\Delta f_a N_{pre}}{-k_{a1}} = \frac{B_{pre}}{k_w} - \frac{B_{pre}}{k_a}. \quad (26)$$

전처리 방위 대역폭  $B_{pre}$ 는 원시 신호의 주파수 대역과 유사하게 선정되므로 일반적으로 다음 가정이 만족된다.

$$B_{pre} \approx B_{tot} \quad (27)$$

위 가정에 따라 식 (26)을 식 (25)에 대입하면 다음을 얻는다.

$$\frac{B_{tot}}{-k_a} > \frac{B_{tar}}{-k_a}, \quad (k_a < 0) \quad (28)$$

부록의 Fig. A1으로부터 이동 집중조사 모드에서 항상  $B_{tot} > B_{tar}$ 임을 알 수 있다. 따라서 방위방향 픽셀 개수를 유지하더라도 후처리 과정으로 인한 시간 영역의 주파수 중복 현상은 발생하지 않는다. 식 (22)의 적분 결과는 다음과 같다.

$$S_{a,IFFT}(f_a; x_0) = C_6 \text{rect} \left[ -\frac{f_a}{B_f/A} \right] \times \exp \left[ -j\pi \frac{(f_a + k_{a1}\tau_{a,0})^2}{k_{a1}} \right] \quad (29)$$

IFFT 연산 결과로 새롭게 정의된 방위 주파수 대역폭  $B_{post}$ 는 다음과 같다.

$$B_{post} = N_{post} \Delta f_{a,post} \quad (30)$$

후처리 과정의 마지막 연산으로 식 (29)에  $F_2(f_a) = S_{post}(f_a)$ 를 곱하면 식 (31)을 얻을 수 있다. 이때 사용된  $f_a$ 는 새로운 방위 주파수 대역  $B_{post}$ 에서 정의된 방위 주파수임을 유의한다.

$$S_{a,E_2}(f_a; x_0) = C_7 \text{rect} \left[ \frac{f_a}{B_f/A} \right] \exp[-j2\pi\tau_{a,0}f_a] \quad (31)$$

위 식의 사각함수는 주파수 대역이  $B_f/A$ 로 통일된 모든 방위신호의 주파수 성분이 기저대역 내에 존재함을 의미한다. 이를 시간-주파수 그래프로 표현하면 Fig. 6과 같다. 최종적으로 수행된 IFFT의 결과는 다음과 같다.

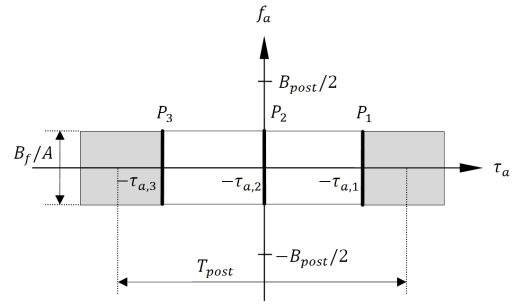


Fig. 6. Azimuth TFD before the last IFFT

$$s_{a,post}(\tau_a; x_0) = C_8 \int \text{rect} \left[ \frac{f_a}{B_f/A} \right] \times \exp[j2\pi(\tau_a - \tau_{a,0})f_a] df_a \quad (32)$$

$$= C_9 \text{sinc} \left[ \frac{B_f}{A} (\tau_a - \tau_{a,0}) \right]$$

이로써 방위방향으로 넓게 분포했던 표적  $P(x_0)$ 의 방위신호는 싱크(sinc) 함수로 압축되어 자기 자신의 영도플러 상대시간  $\tau_{a,0}$ 에 위치하게 된다.

### III. 고해상 SAR 영상생성 실험결과

#### 3.1 점표적 모의실험

제안된 고해상 모드 SAR 영상생성 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 점표적 모의실험을 수행하였다. 이를 위해 Fig. 2(b)의 직각선형 기하상에서 Table 1의 조건을 이용하여 점표적들에 대한 원시 데이터를 생성하였다. 제안된 방위 스케일링 함수의 방위압축 성능을 확인하기 위해 3개의 점표적을 지면의 거리방향을 따라 일정한 간격으로 배치하였다. 편향 조향각의 크기는 실제 아리랑 5호의 운용 환경을 고려하여 매우 작게 설정하였다. 제안된 영상생성 알고리즘을 사용하여 생성된 점표적들에 대한 SAR 영상은 Fig. 7과 같다. 제안된 기법의 성능 분석을 위해

Table 1. Simulation parameters

Parameters	Assumption
Ground range	600 [km]
Satellite altitude	560 [km]
Distance bet. each target	1.5 [km]
Squint angle	-0.2 [deg]
Flight velocity	7700 [m/s]
Flight time	2.3 [sec]
PRF	3400 [Hz]



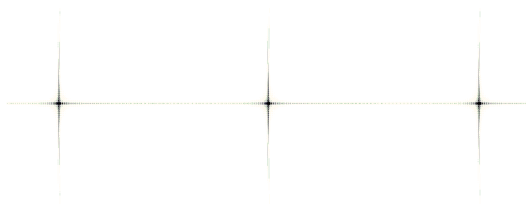


Fig. 7. Point targets of range direction: near, middle, far target from left

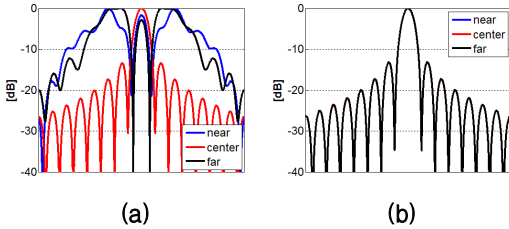


Fig. 8. Performance of azimuth compression: (a) previous (b) proposed, sub-aperture

FSA의 방위 첩 모델을 고려하지 않은 기존의 전 개구면 처리 방식과 기존의 부 개구면 구조의 FSA의 결과를 비교하였다. 기존 전 개구면 방법에서 사용되는 방위 스케일링 함수는 식 (33)과 같다.

$$\bar{H}_{AS}(f_a, r_0) = \exp\left[j\frac{4\pi r_0}{\lambda \cos\theta_0}\right] \exp\left[-j\pi\frac{f_a^2}{k_{a1}}\right] \quad (33)$$

기존 전 개구면 방법과 제안된 방법 및 부 개구면 방법을 적용하여 획득한 결과를 Fig. 8(a)와 8(b)에 도시하였으며 각 점표적에 대한 방위압축 성능을 Table 2에 나타내었다. 정상적인 방위압축 결과는 Fig. 8(b)와 같이 싱크 함수 형태의 IRF(Impulse Response Function)로 나타나야 한다. 그러나 Fig. 8(a)에 도시된 근거리 및 원거리

Table 2. Quality parameters of azimuth compression

Algorithms	Quality Parameters	Target		
		Near	Middle	Far
Previous	PSLR [dB]	1.68	-13.36	2.34
	ISLR [dB]	8.84	-9.32	11.44
	Resol. [m]	0.77	0.98	0.66
Proposed	PSLR [dB]	-13.15	-13.17	-13.18
	ISLR [dB]	-9.13	-9.15	-9.17
	Resol. [m]	0.97	0.97	0.97
Sub-aperture	PSLR [dB]	-13.24	-13.30	-13.26
	ISLR [dB]	-9.38	-9.40	-9.39
	Resol. [m]	1.22	1.22	1.22

표적의 방위압축 결과는 신호 세기의 정점(peak point)이 양 쪽으로 분할된 모습이다. 이는  $\beta$ 를 이용한 FSA 거리압축의 영향과 역첩 수신으로 인한 방위 첩 모델을 올바르게 반영하지 못했기 때문이다. 이로 인해, 기존 전 개구면 방법으로 생성된 근거리 및 원거리 점표적은 비정상적인 PSLR(Peak Side Lobe Ratio)과 ISLR(Integrated Side Lobe Ratio) 및 해상도를 지닌다. 즉, 기존의 전 개구면 방법으로는 정상적인 방위압축이 불가능함을 알 수 있다. 반면에 Fig. 8(b)와 Table 2에서 확인할 수 있듯이, 제안된 방법은 기존의 부 개구면 처리방법과 동일하게 FSA의 방위 첩 모델 및 이동 집중조사 모드 첩 모델이 모두 반영된 방위 스케일링 함수를 사용함으로써 역첩 수신으로 인해 모델링된 방위 첩을 완벽하게 제거한다. 또한 제안한 방법은 PSLR과 ISLR 성능은 거의 유사하지만, 방위방향 해상도 측면에서 부 개구면 처리방법에 비해 향상된 성능을 제공한다는 점도 알 수 있다.

### 3.2 아리랑 5호 실데이터 처리 실험

아리랑 5호에서 획득된 실제 SAR 데이터를 이용하여 제안한 고해상 SAR 영상생성 알고리즘의 성능을 확인하였다. 데이터 획득 조건은 Table 3과 같다. 제안된 알고리즘을 통해 생성된 고해상 SAR 영상은 Fig. 9에 수록하였다.

성능비교를 위해 식 (33)을 사용하는 기존의 전 개구면 처리방법과 제안된 방법을 적용한 처리결과를 각각 Fig. 10(a)와 (b)에 도시하였다. Fig. 10에 의하면, 근거리 영역(near)과 원거리 영역(far)에서 제안한 방법이 기존 전 개구면 방법에 비해 우수한 성능을 보이고 있음을 알 수 있다. 이는 제안된 방법이 방위 첩을 완벽하게 제거하는 반면 기존의 전개구면 방법은 그렇지 못하기 때문이다. 이는 3.1절의 점표적 모의실험 결과와 일치하는 결과이다.

한편, 동일한 실 데이터에 대하여 부 개구면 방법을 적용하여 생성된 영상은 Fig. 11과 같다.

Table 3. Actual parameters

Parameter	Assumption
Satellite altitude	550 [km]
Antenna size	4.48 × 0.7 [m <sup>2</sup> ]
Carrier frequency	9.66 [GHz]
Elevation angle	-11.8 [deg]
PRF	4320.3 [Hz]
Flight velocity	7.662 [km/s]
Ground altitude	40 [m]

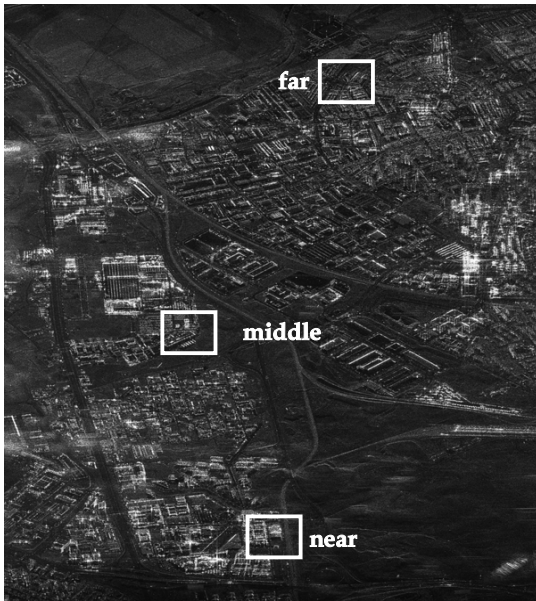


Fig. 9. High-resolution SAR image

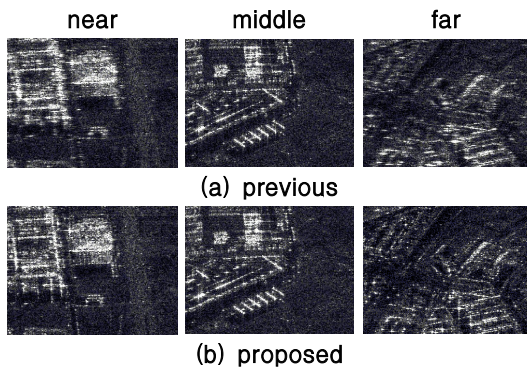


Fig. 10. Azimuth compression results using full-aperture

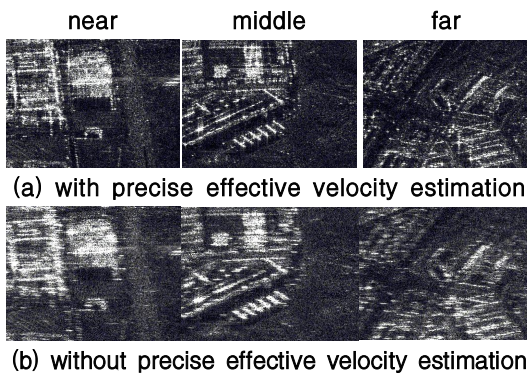


Fig. 11. Azimuth compression results using sub-aperture

유효속도가 SAR 영상처리 성능에 미치는 영향을 확인하기 위해, 부 개구면에 대해 정밀하게 추정된 유효속도를 적용한 경우(Fig. 11(a))와 영상 중심점에 대해 산출된 유효속도를 모든 부 개구면에 대해 적용한 경우(Fig. 11(b))로 나누어 실 데이터를 처리하였다. Fig. 11에서 확인할 수 있듯이, 부 개구면에 대해 유효속도를 정확하게 추정하여 적용하는 경우, 기존 부 개구면 방법 역시 제안된 방법(Fig. 10(b))과 마찬가지로 방위 첩을 완벽하게 제거할 수 있으나, 영상 중심점에 대해 산출된 유효속도를 전체 부 개구면에 대해 적용하는 경우 생성된 SAR 영상의 품질이 저하됨을 확인할 수 있다. 이는 기존 부 개구면 처리 기법의 성능이 사용되는 유효속도의 정확도에 따라 좌우됨을 암시하는 것이다. 이와 달리, 제안하는 전 개구면 방법은 앞서 언급한 대로 유효속도의 정밀 추정 문제를 고려할 필요가 없다는 장점을 갖는다. 반면, 제안된 기법이 데이터 증가로 인해 처리속도가 느려진다는 것은 여전히 극복해야 할 과제 중 하나이다. 그럼에도 불구하고, 추후 효율적인 병렬처리 기법이 개발된다면, 제안한 전 개구면 SAR 신호 처리 기법이 아리랑 5호 고해상 모드 영상생성에 효과적으로 적용될 수 있을 것으로 기대된다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 아리랑 5호의 고해상 영상을 생성하기 위한 전 개구면 데이터 처리 구조 기반의 수정된 FSA 신호처리 알고리즘을 제안하였다. 아리랑 5호가 고해상 데이터 획득을 위해 레이다 빔을 방위방향으로 조향하는 이동 집중조사 모드를 사용한다는 사실에 착안하여 방위방향 대역폭을 조절할 수 있는 전 개구면 데이터 처리 기법을 고안하였다. 수신된 고해상 SAR 신호가 역첩 수신된 신호임을 감안하여 수정된 FSA를 제안하였으며, 제안된 거리압축 알고리즘은 전 개구면 데이터 처리 구조의 특성에 맞게 새롭게 정의된 방위 스케일링 함수를 이용하여 기존 FSA의 방위압축 성능저하 문제를 해결하였다. 이렇게 제안된 알고리즘의 성능을 검증하기 위해 가상 점표적 모의실험과 아리랑위성 5호의 실제 SAR 데이터를 이용하여 고해상 영상을 생성함으로써 제안된 기법의 성능을 입증하였다.

#### 후 기

본 연구는 한동대학교 교내연구지원사업 제 20150103호에 의해 수행되었습니다.

## References

1) Lim, B. G., Ahn, O. S., "A study on R&D policy implications and future challenges using SWOT analysis and technology-trends analysis in SAR satellite field", *Cur. Ind. and Tech. Tre. in Aero.*, Vol. 11, No. 1, July 2013, pp. 122-141.

2) Lee, S. R., "Overview of KOMPSAT-5 program, mission, and system", *2010 IEEE Int. Geo. and Re. Sen. Sym. (IGARSS)*, Honolulu, HI, July 2010, pp. 797-800.

3) Yoon, J. C., Keum, J. H., Shin, J. M., Lee, S. R., Bauleo, A., Farina, C., Germani, C., Mappini, M., and Venturini, R., "KOMPSAT-5 SAR design and performance", *2011 3rd Int. Asia-Pacific Conf. on Syn. Ape. Radar (APSAR)*, Seoul, South Korea, Sept. 2011, pp. 1-4.

4) Carrara, W. G., Goodman, R. S., and Majewski, R. M., *Spotlight Synthetic Aperture Radar: Signal Processing Algorithm*, Artech House, 1995.

5) Mittermayer, J., Moreira, A., and Loffeld O., "Spotlight SAR data processing using the frequency scaling algorithm", *IEEE Tran. on Geo. and Re. Sens.*, Vol. 37, No. 5, 1999, pp. 2198-2214.

6) Sack, M. Ito, M. R. and Cumming, I. G., "Application of Efficient Linear FM Mached Filtering Algorithms to SAR Processing", *IEE Proc. F. Com., Radar and Sig. Proc.*, Vol. 132, No. 1, Feb. 1985, pp. 45-57.

7) Prats, P., Scheiber, R., Mittermayer, J., Meta, A., and Moreira, A., "Processing of sliding spotlight and TOPS SAR data using baseband azimuth scaling", *IEEE Tran. on Geo. and Re. Sen.*, Vol. 48, No. 2, 2010, pp. 770-780.

8) He, F., Chen, Q., Dong, Z., and Sun, Z., "Processing of ultrahigh-resolution spaceborne sliding spotlight SAR data on curved orbit", *IEEE Tran. on Aero. and Elec. Sys.*, Vol. 49, No. 2, 2013, pp. 819-838.

9) Sun, G., Xing, M., Wang, Y., Wu, Y., Wu, Y., and Bao, Z., "Sliding spotlight and TOPS SAR Data processing without sub-aperture", *IEEE Geo. and Re. Sen. Let.*, Vol. 8, No. 6, 2011, pp. 1036-1040.

10) Lanari, R., Zoffoli, S., Sansosti, E., Fornaro, G., and Serafino, F., "New approach

for hybrid strip-map/spotlight SAR data focusing", *IEE Proc. Rad., Son. and Nav.*, Vol. 148, No. 6, Dec. 2001, pp. 503-539.

11) Yang, W., Chen, J., Zeng, H., Zhou, J., Wang, P. and Li, C., "A novel three-step image formation scheme for unified focusing on spaceborne SAR data", *Prog. In Elec. Res.*, Vol. 137, 2013, pp. 621-642.

12) Xu, W., Deng, Y., Huang, P. and Wang, R., "Full-aperture SAR data focusing in the spaceborne squinted sliding-spotlight Mode", *IEEE Tran. on Geo. and Re. Sen.*, Vol. 52, No. 8, 2014, pp. 4596-4607.

13) Cafforio, C., Prati, C., and Rocca, R., "SAR data focusing using seismic migration techniques", *IEEE Tran. on Aero. and Elec. Sys.*, Vol. 27, No. 2, 1991, pp. 194-206.

14) Raney, R. K., Runge, H., Bamler, R., Cumming, I. G., and Wong, F. H., "Precision SAR processing using chirp scaling", *IEEE Tran. on Geo. and Re. Sen.*, Vol. 32, No. 4, 1994, pp. 786-799.

15) Moreira, A., Mittermayer, J., and Scheiber, R., "Extended chirp scaling algorithm for air- and spaceborne SAR data processing in stripmap and scanSAR imaing modes", *IEEE Tran. on Geo. and Re. Sen.*, Vol. 34, No. 5, 1996, pp. 1123-1136.

16) Cumming, I. G. and Wong, F. H., *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data: Algorithms and Implementation*, Artech House, 2005.

17) Raney, R. K., "A new and fundamental fourier transform pair", *IEEE Int. Geo. and Re. Sen. Sym. (IGARSS '92)*, Houston, TX, May 1992, vol. 1, pp. 106-107.

## 부 록

수신된 2차원 SAR 신호에서 방위부분만 취하여 편향 조향각을 갖는 이동 집중조사 모드에 대한 시간-주파수 분석을 수행한다. [5]의 신호모델에서 방위신호 부분만을 취하면 다음과 같다.

$$s_a(t_a; x_0, r_0) = C \text{rect} \left[ \frac{t_a - t_{a,c}}{T_{spot}} \right] \times \text{rect} \left[ \frac{A(t_a - t_{a,c}) - (t_{a,0} - t_{a,c})}{T_f} \right] \times \exp \left[ -j \frac{4\pi}{\lambda} r(t_a; r_0) \right] \quad (A1)$$

Fig. 2(b)의 근사화된 선형기하를 가정하면 위 식은 다음과 같이 간단하게 정리된다[12].

$$s_a(t_a; x_0, r_0) \approx \text{Crect} \left[ \frac{t_a - t_{a,c}}{T_{spot}} \right] \text{rect} \left[ \frac{A(t_a - t_{a,c}) - (t_{a,0} - t_{a,c})}{T_f} \right] \times \exp \left[ -j \frac{4\pi r_0}{\lambda \cos \theta_0} \right] \times \exp \left[ j\pi (2f_{DC}(t_a - t_{a,0}) + f_{DR}(t_a - t_{a,0})^2) \right] \quad (\text{A.2})$$

도플러 중심 주파수  $f_{DC}$ 와 도플러 변화율  $f_{DR}$ 은 다음과 같이 표현된다.

$$f_{DC} = 2v_s \sin \theta_0 / \lambda \quad (\text{A.3})$$

$$f_{DR} = -2v_r^2 \cos^3 \theta_0 / (\lambda r_0) \quad (\text{A.4})$$

위 식에서 보는 바와 같이 편향 조향각  $\theta_0$ 는 도플러 파라미터와 직접적인 관련이 있다. 즉,  $f_{DC}$ 는  $\theta_0$ 의 부호를 그대로 따르며  $f_{DR}$ 은  $\theta_0$ 의 증감에 매우 민감하다는 것을 알 수 있다.

한편, 방위방향 안테나 빔 조향 각속도  $\omega_r$ 로 인해 수신되는 신호의 순시 방위 도플러 중심 주파수  $f_{Dr}$ 는 시변특성을 갖게 되는데, 이를 안테나 조향 변화율  $k_w$ 로 정의한다[12].

$$k_w = \frac{\partial f_{Dr}(t_a)}{\partial t_a} \approx \frac{2v_s \omega_r \cos \theta_0}{\lambda} = -\frac{2v_r^2 \cos^2 \theta_0}{\lambda r_{rot}} \quad (\text{A.5})$$

식 (A.5)에서 확인할 수 있듯이 안테나 조향 변화율  $k_w$ 는  $\omega_r$ 에 비례하고,  $r_{rot}$ 에 반비례하는 특성을 갖고 있다. 즉, 이동 집중조사 모드에서 고정 집중조사 모드로 갈수록  $k_w$ 의 절대값이 증가하므로 방위신호의 대역폭도 증가하게 된다. 일반적으로 집중조사 모드의 영상처리가 난해한 이유는, SAR 센서가 운용되는 PRF보다 표적들의 방위신호 대역폭이 크므로 인해 주파수 중복 문제가 발생하기 때문이다. 방위신호의 전체 대역폭  $B_{tot}$ 은 안테나 조향 변화율  $k_w$  뿐만 아니라 안테나 빔의 방위방향 빔폭 (beam width)  $\theta_{az}$ 와 편향 조향각  $\theta_0$ 의 영향을 받는다.  $\theta_{az}$ ,  $k_w$ ,  $\theta_0$  각 각으로 인해 발생하는 대역폭의 증분을  $B_f$ ,  $B_s$ ,  $B_{sq}$ 로 정의하면  $B_{tot}$ 는 다음과 같이 세 대역폭의 합으로 계산된다[12].

$$B_{tot} = B_f + B_s + B_{sq} = \frac{2v_s \cos \theta_0}{\lambda} \theta_{az} + |k_w| T_{spot} + \frac{2v_s B_0}{c} \sin \theta_0 \quad (\text{A.6})$$

여기서  $B_0$ 는 송수신 칩 신호의 대역폭을 의미한

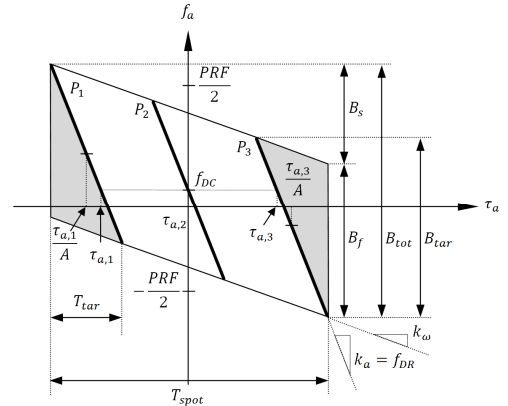


Fig. A1. TFD of squinted sliding-spotlight mode signal

다.  $B_{sq}$ 는 편향 조향각으로 인해 방위 주파수가 거리방향에 따라 증감할 수 있음을 암시한다. 즉,  $\theta_0$ 로 인한 근거리 표적과 원거리 표적간의 방위방향 거리 차 때문에 도플러 편차가 추가적으로 발생함을 의미한다. 보다 직관적인 분석을 위해 시간-주파수 그래프를 사용하여 주파수 변화를 분석해 보자. 실제 아리랑 5호의 고해상 모드에서 편향 조향각은 작게 유지되므로  $B_{sq}$ 의 영향은 무시한다. 편향 조향각을 갖는 이동 집중조사 모드에 대해 방위방향 시간-주파수 그래프를 그리면 Fig. A1과 같다[11,12]. 가로 축은 방위 중심시간  $t_{a,c}$ 를 0으로 하는 상대 방위시간  $\tau_a$ 로 사용하였다.

$$\tau_a = t_a - t_{a,c} \quad (\text{A.7})$$

명암 처리된 부분은 수집되는 표적 정보가 합성 개구시간 (synthetic aperture time)  $T_{tar}$ 보다 작아 SAR 영상에서 흐리게 표시되는 영역이다. 명확히 관측되는 세 개의 표적 ( $P_1, P_2, P_3$ )에 대한 주파수를 굵은 선으로 표시하였으며, 각 주파수는 시간에 따라  $k_a = f_{DR}$ 의 기울기로 감소한다.  $k_a < 0$ 인 이유는 모든 표적이 안테나에 접근하다가 멀어지기 때문이다. 각 표적은 합성개구시간  $T_{tar} = T_f/A$  동안 수집되며 이로 인해 표적 신호의 대역폭  $B_{tar}$ 는 다음과 같다.

$$B_{tar} = |k_a| T_{tar} \quad (\text{A.8})$$

만약 빔 조향이 없다면  $B_{tar} = B_f$ 가 만족되지만 이동 집중조사 모드일 경우  $B_{tar} > B_f$ 가 되며, 순시 도플러 중심 주파수는 방위시간에 따라  $k_w$ 의 비율로 감소하게 된다. 이러한 특성은 식 (A.5)에 부합함을 알 수 있다.