

## 30 cm급 완전편파 데이터 획득을 위한 소형 SAR 시스템 개발 및 신호처리

### Development of Small SAR System and Signal Processing Algorithm for Full-Polarization Data Acquisition with 30 cm Resolution

송정환 · 정철호 · 최종준 · 김진수\* · 이우경\*\*

Jung-Hwan Song · Chul-Ho Jung · Jong-Joon Choi · Jin-Soo Kim\* · Woo-Kyung Lee\*\*

#### 요 약

본 논문에는 30 cm 해상도를 갖는 소형 SAR(Synthetic Aperture Radar) 시스템 개발 결과를 소개하고, RAW 데이터 기반의 도플러 파라미터 추정 및 요동 보상 신호처리 알고리즘을 제시한다. 송수신 채널이 각각 2개이기 때문에 다중 편파 및 간섭계 영상 확보가 가능하며, 차량 탑재 시험을 통하여 다중 편파 SAR 데이터 획득 및 신호 처리 결과를 제시하였다. 플랫폼의 요동에 의한 잔여 위상 오차를 보상하는 알고리즘을 적용하였으며, 실제 차량 탑재 시험을 통하여 요동 보상에 따른 개선된 성능 결과를 제시하였다.

#### Abstract

In this paper, a small synthetic aperture radar(SAR) system with 30 cm resolution is proposed, and a RAW data-based Doppler parameter estimation and motion compensation algorithm is described in detail. Acquisition of both PolSAR and InSAR data are enabled because there are two channels each in the transmitter and receiver modules. Automotive-based field work is performed to obtain PolSAR data, and signal processing results are ultimately obtained. A motion compensation algorithm is used to mitigate the residual phase error due to platform oscillation, and improved performance is obtained with the motion compensation algorithm using the automotive field test data.

Key words: SAR, SAR System, Doppler Estimation, Motion Compensation, Full-Polarization

#### I. 서 론

SAR(Synthetic Aperture Radar)는 주기적으로 전자파를 송수신하여 데이터를 획득하며, 이 데이터를 처리하여 고 해상도 영상을 획득할 수 있는 전천후 센서이다. 대부분

위성이나 항공기에 탑재되어 운용되었으며, 기술이 복잡하고 비용이 많이 소요되어 주로 군사용 또는 중대형 시스템에 사용되었다.

민간에서도 소형 UAV(Unmanned Aerial Vehicle)를 포함한 항공기 탑재 소형 SAR 시스템과 관련된 연구가 활

(주)에코센싱 기술연구소(CAL Lab., EchoSensing Inc., Korea)

\*㈜케이에스티 기술연구소(R&D Center, KST Technology Co., Ltd., Korea)

\*\*한국항공대학교 항공전자정보공학부(Department of Information and Electronic Engineering, Korea Aerospace University)

· Manuscript received July 5, 2018 ; Revised August 7, 2018 ; Accepted September 12, 2018. (ID No. 20180705-071)

· Corresponding Author: Jung-Hwan Song (e-mail: jhsong@echosensing.com)

발하게 진행되고 있다. 미국의 ImSAR는 NonoSAR를 포함하여 다양한 소형 SAR 제품을 판매하고 있으며<sup>[1]</sup>, 네덜란드의 MetaSensing은 다양한 주파수와 편파를 사용할 수 있는 항공기 SAR 시스템을 개발하여 2008년도부터 서비스를 제공하고 있다<sup>[2]</sup>. 또한 스페인의 카탈루냐 공과대학교(Universitat Politècnica de Catalunya, UPC)에서도 UAV에 장착 가능한 5 kg 이하의 소형 SAR 센서를 개발하였다<sup>[3]</sup>.

국내에서는 국방과학연구소에서 항공기 SAR(Korea Mini SAR, KOMSAR)를 처음 개발하였고<sup>[4]</sup>, 포항공과대학교에서는 2개의 수신 채널을 갖는 SAR 시스템(AutoSAR)을 개발하여 자동차 기반으로 SAR 영상 및 간섭영상을 획득하였다<sup>[5]</sup>. 한편, LIG넥스원은 분해능 30 cm급의 SAR 영상을 위한 핵심 기술 확보를 목적으로 NexSAR라는 시스템을 자체 개발하였다<sup>[6]</sup>. 서울대학교에서는 미국 ImSAR 사로부터 소형 SAR 시스템을 도입하여 이중 채널 항공기 SAR 시스템을 구축하였으며, 항공기 실험을 통해 데이터를 획득하고, 단일패스 간섭기법 등 다양한 연구를 활발히 진행하고 있다<sup>[7]</sup>. 한편, 한국항공대학교에서는 FMCW(frequency modulated continuous wave) 레이더를 드론에 탑재하여 표적 영상을 획득하는 실험을 수행하였으며, 드론을 활용한 SAR 시스템의 운용 가능성을 검증하였다<sup>[8]</sup>.

이와 같이 최근에 개발되는 소형 SAR 시스템은 1 m 이하의 고해상도 분해능을 제공할 뿐만 아니라, 활용도가 높은 다중 편파 및 간섭 영상을 확보할 수 있도록 개발되고 있다. 이러한 기술적 추세에 맞춰 (주)에코센싱에서는 두 개의 송수신 채널을 포함한 소형 SAR 시스템을 개발하였으며, 활용도가 높은 완전편파 데이터 및 간섭 영상을 생성하기 위한 데이터를 획득할 수 있도록 하였다.

본 논문에서는 개발된 소형 SAR 시스템을 소개한다. 2장에서는 시스템에 대한 전반적인 내용을 설명하였으며, 도플러 파라미터 추정 및 요동 보상과 관련된 신호처리 알고리즘을 3장에 정리하였다. 또한 4장에서는 지상 실험을 수행한 결과를 제시하고, 성능을 검증하였다.

## II. SAR 시스템 소개

소형 SAR 시스템의 블록 다이어그램을 그림 1에 나타내었다. 하드웨어는 제어 및 파형 발생 모듈, 송수신기 모듈, 데이터 수집 및 신호처리 모듈, 전원모듈 그리고 안테

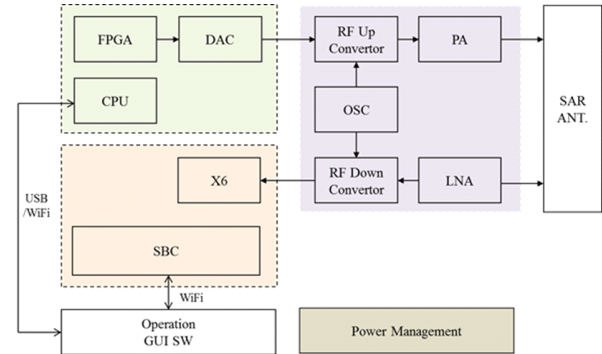


그림 1. 소형 SAR 시스템의 블록 다이어그램  
Fig. 1. Block diagram of the small SAR system.

나 모듈로 구성되며, 획득된 데이터로부터 영상을 형성하기 위한 SAR 신호처리 프로세서(SAR Signal Processor)는 별도로 개발하였다.

시스템 규격은 표 1에 나타내었다. X-밴드 중심주파수를 사용하여 최대 500 MHz의 대역폭을 갖는 LFM(Linear Frequency-Modulated) 파형을 송수신할 수 있도록 설계하였으며, stripmap 모드에서 30 cm 급 영상을 확보할 수 있도록 개발하였다. 표에 나타난 송신 펄스의 길이와 펄스 반복 주기(pulse repetition frequency: PRF)는 항공기 SAR 데이터 획득에 적합한 대표 값이며, 증폭기와 데이터 수집 장치의 허용 범위 내에서 임의의 값을 사용할 수 있다.

그림 2에 개발된 소형 SAR 시스템의 실제 형상을 나타내었다. 제어 및 파형 발생 모듈, 송수신기 모듈 그리고 전원 모듈은 하나의 케이스로 구성되어 있으며, 비용을 최소화하고, 개발 기간을 단축하기 위해서 데이터 수집 및 신호

표 1. 시스템 규격  
Table 1. System specifications.

Parameter	Value	Units
Center frequency	X-band	-
Waveform	LFM	-
Pulse width	< 20	$\mu$ sec
Band width	< 500	MHz
PRF	< 1,000	Hz
Tx power	40	dBm
Receiver chain gain	70	dB



그림 2. 소형 SAR 시스템의 실제 형상  
Fig. 2. Actual pictures of a small SAR system.

처리 모듈은 상용제품을 활용하여 구성하였다. 특히, 송수신기 모듈의 입출력 주파수는 1.2 GHz로 고정되어 있으며, 이에 맞춰 파형 발생기와 데이터 수집 모듈을 개발하였다. 이와 같이 IF 주파수를 고정함으로써 동일한 파형발생기와 데이터 수집 모듈을 사용하고, 송수신기 모듈만을 교체하여 다른 주파수 대역을 사용하는 시스템을 구성할 수 있도록 하였다. 한편, 안테나 모듈은 스탠다드 혼(standard horn) 안테나를 임시로 사용하고 있다.

그림 3은 제어 및 파형발생기의 블록 다이어그램을 나타낸다. 파형 발생기는 임의의 파형을 생성할 수 있도록 메모리방식으로 개발되었다. GUI로부터 메모리로 다운로드된 송신 파형의 샘플은 DAC(Digital-to-Analog Converter)를 거쳐 아날로그 신호로 변환되며, 1.2 GHz의 IF(Inter-

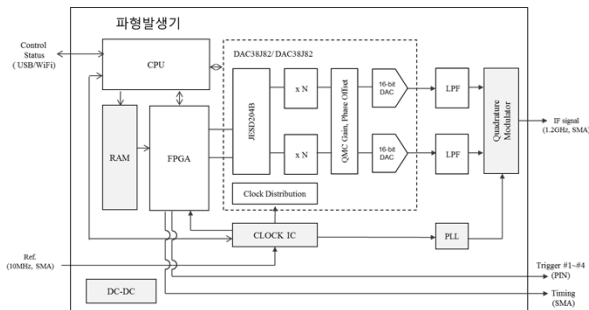


그림 3. 파형발생기의 블록 다이어그램  
Fig. 3. Block diagram of waveform generation module.

mediated Frequency) 주파수로 상향 변환된다. 제어신호는 송수신 신호의 동기를 위한 타이밍 신호와 내부 보정 신호 및 편파 데이터 획득을 위한 송수신 경로 제어 신호로 나눌 수 있다. SAR 영상을 획득하기 위해서는 송신 신호의 동기가 매우 중요하므로 송신 파형과 제어신호를 하나의 모듈에서 생성하도록 구성하였다.

그림 4는 송수신기의 블록 다이어그램을 나타낸다. 송수신기는 스위치에 의해 제어되는 두 개의 송신 채널과 동시에 데이터 수집이 가능한 두 개의 수신 채널로 구성되어 있다. 또한 내부 보정 신호를 확보하기 위한 스위치들을 포함하고 있다. 이와 같은 구조로 완전 편파(full-polarization) 영상을 획득할 수 있으며, InSAR(Interferometric SAR)와 같이 복수의 송수신 채널을 필요로 하는 응용분야에 모두 활용할 수 있도록 개발하였다.

파형발생기로부터 전달된 IF 신호는 X-밴드 중심주파수로 상향 변환되며, 10 W급 전력 증폭기(Power amplifier)를 거쳐 안테나로 전달된다. 증폭된 신호는 경로제어 신호에 의해서 각각의 편파 안테나로 선택적으로 송신할 수 있도록 제작되었다. 반면, 안테나로부터 전달 받은 수신 신호는 LNA(Low-Noise Amplifier)를 거쳐 ADC(Analog-to-Digital Converter)에서 적절하게 샘플링할 수 있는 신호 레벨까지 증폭된 후, 다시 IF 주파수로 하향 변환된다. 수신 신호의 I/Q 불균형(imbalance) 문제를 해결하기 위해서 데이터 수집 및 신호처리 모듈은 IF 신호를 직접 수집하도록 구성하였다. 데이터 수집 모듈은 Innovative Integration의 X6-GSPS 보드를 사용하였으며, 대용량 데이

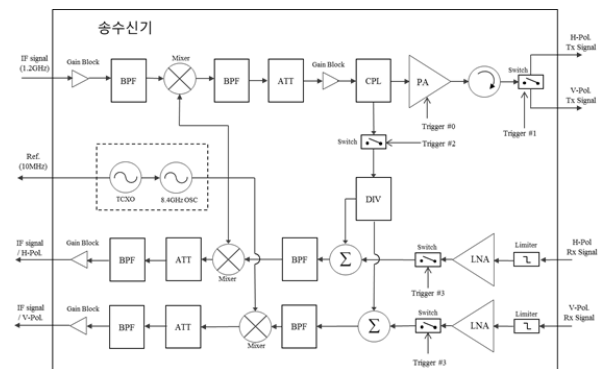


그림 4. 송수신기의 블록 다이어그램  
Fig. 4. Block diagram of transceiver module.

터를 저장하기 위해서 복수의 SSD(Solid State Drive)를 사용하여 구성하였다.

ADC를 통해서 디지털로 변환된 수신 신호는 DDC(Digital Down Conversion)를 통해서 기저대역의 원시 데이터로 변환된다. 이후 개발된 SAR 신호처리 프로세서를 통해서 도플러 파라미터 추정 및 요동 보상 등의 전처리를 수행하고, 압축 알고리즘을 적용하여 최종적으로 SAR 영상을 확보하게 된다.

### III. 신호처리 알고리즘

수신된 데이터로부터 SAR 영상을 형성하기 위한 신호처리 프로세서(SAR Signal Processor)를 개발하였으며, 그림 5에 신호처리 과정을 간단히 나타내었다. 편파에 따라 2개의 수신 채널로 데이터가 들어오기 때문에 데이터 획득 모드에 따라 데이터를 분리하는 작업이 선행되며, 이 과정에서 DDC를 수행하여 기저대역의 신호를 생성한다. 도플러 파라미터 추정(Doppler parameter estimation: DPE) 모듈은 도플러 중심 주파수와 방위방향 주파수 변조율을 계산하기 위한 유효 속도를 추정하며, 플랫폼의 요동에

의해 발생하는 위상 오차를 보상하기 위한 요동 보상(motion compensation module: MoCo) 모듈을 포함하고 있다.

압축 알고리즘은 기본적으로 RDA(Range Doppler Algorithm)를 사용하였다. 정밀한 interpolation을 수행하기 위해서 커널(kernel) 길이를 임의로 적용할 수 있는 RCMC(Range Cell Migration Correction) 모듈을 구현하였으며, 영상 형성에 사용되는 커널 길이는 16을 사용하였다. 또한 완전 편파 모드에서 획득된 데이터로부터 편파 영상을 생성하기 위한 재구성(polarimetric decomposition) 모듈이 포함되어 있다.

#### 3-1 도플러 파라미터 추정

##### 3-1-1 도플러 중심 주파수 추정

도플러 중심 주파수 추정은 기저대역의 중심 주파수(base-band centroid) 추정과 ambiguity number 추정으로 나눌 수 있다. 위성과 달리 항공기에서 획득한 SAR 데이터는 지구 자전에 의한 효과가 존재하지 않기 때문에 플랫폼에 설치된 안테나 각도에 의해서 결정되며, ambiguity number 추정 모듈은 필요치 않다. 기저대역의 중심 주파수 추정 과정을 역시 생략할 수 있으나, 안테나를 설치하는 과정에서 오차가 존재할 수 있고, 의도적으로 스쿼트 각도(squint angle)를 조정하여 데이터를 획득하는 방식도 고려하고 있기 때문에 기본적으로 수행하도록 구성하였다.

기저대역의 중심 주파수 추정 기법은 크기 기반(magnitude-based)과 위상 기반(phase-based) 방식으로 분류할 수 있으며, 구현이 용이하고 상대적으로 처리 시간이 빠른 위상 기반 방식을 적용하여 추정 모듈을 구성하였다. 위상 기반으로 기저대역의 중심주파수를 추정하기 위해서는 방위 방향의 샘플 간 위상차를 이용하며, ACCC(Average Cross-Correlation Coefficient)의 위상과 도플러 주파수와의 관계식으로부터 직접 계산할 수 있다<sup>[9]</sup>.

##### 3-1-2 방위 방향 유효 속도의 추정

방위압축에 사용되는 방위방향 주파수 변조율(azimuth FM rate)은 플랫폼의 유효 속도(effective radar velocity)를 추정하여 계산할 수 있다. 유효 속도에 오차가 존재하여 방위방향 주파수 변조율에 오차가 발생하는 경우, 영상의

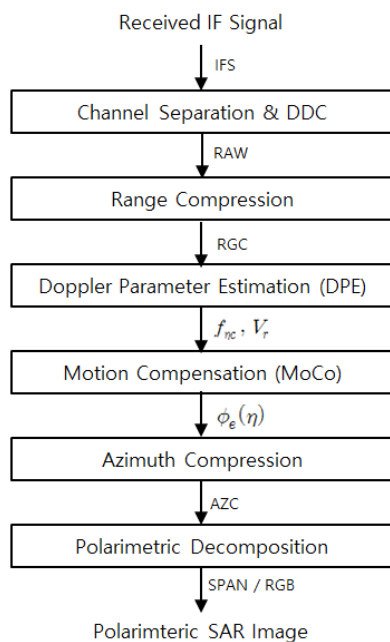


그림 5. SAR 신호처리 절차

Fig. 5. SAR signal processing procedure.

품질이 크게 저하되기 때문에 방위방향 유효 속도는 매우 정확하게 추정되어야 한다.

일반적으로 데이터 기반으로 유효 속도를 추정하는 방식은 서로 다른 속도 값을 사용하여 반복적으로 영상을 확보하고, **contrast**를 최대화<sup>[10]</sup>하거나 **entropy**를 최소화<sup>[11]</sup>하는 속도 값을 선택하는 방식으로 접근할 수 있다. 이러한 방식은 주어진 속도 테이블에 대하여 모두 영상을 형성해야 하므로 처리 시간이 상대적으로 많이 소요된다. 반면, LMR(multilook misregistration) 기법<sup>[9]</sup>은 multilook 영상의 방위 방향 위치 오차를 사용하여 속도 값을 갱신하는 방식으로 접근하며, 현재 입력한 속도 값과 위치오차를 사용하여 속도 편차를 계산할 수 있으므로 처리 시간을 단축시킬 수 있다.

위와 같이 데이터 기반으로 유효 속도를 추정하는 기법들은 모두 초기값을 필요로 한다. 하지만 본 논문에서 개발한 소형 SAR 시스템은 초기값을 확보할 수 있는 GPS/IMU 등의 보조 센서가 존재하지 않으며, 자동으로 유효 속도를 추정하기 위해서는 순수하게 데이터 기반으로 접근해야 한다.

본 논문에서는 **contrast** 방식과 LMR 기법을 조합하여 유효 속도 추정 모듈을 구성하였다. 유효 속도의 추정은 세단계로 수행된다. 우선 전체 또는 일부 데이터에 대하여 **contrast** 기법을 적용하여 초기값을 확보한다. 이때 처리 시간을 단축하기 위해 테스트하는 속도값의 차이를 크게 설정하였으며, RCMC를 수행하지 않고 방위방향 정합필터를 사용한 방위압축만을 수행하므로 많은 시간을 소요하지 않고 초기값을 확보할 수 있다. 초기값이 확보되면 LMR 기법을 적용하여 2차 추정을 수행하며, 비교적 정확한 유효 속도를 확보할 수 있다. 위에서 언급한 바와 같이 LMR 기법은 유효 속도값을 갱신하는 방식으로 접근하므로, 초기값이 실제 속도와 비교적 큰 오차를 갖고 있어도 정확한 유효 속도를 빠른 시간 내에 확보할 수 있다. 하지만 multilook 영상은 해상도의 손실이 발생하므로 크기 정보의 위치 오차를 사용하는 LMR 방식으로 추정할 수 있는 정확도의 한계가 존재한다. 따라서 최종적으로 다시 **contrast** 기법을 적용하며 매우 정확한 속도 값을 추정한다. 이 때 테스트 하는 속도값의 차이는 매우 작게 설정하며, LMR 기법을 사용하여 추정한 유효 속도를 사용하여 RCMC를 수행한 데이터에 적용한다.

### 3-2 요동에 의한 잔여위상 보상

소형 SAR 시스템은 플랫폼이 이동함에 따라 발생하는 기준 경로에 대한 편차(trajecory deviation)와 진행방향에 대한 속도 변화(forward velocity variation)에 의해 발생하는 위상 오차에 의해서 영상의 품질이 크게 저하될 수 있다. 이러한 플랫폼의 요동에 의해 발생하는 위상오차는 GPS/IMU 장비를 이용하여 1차적으로 요동 보상을 수행하고, PGA(Phase Gradient Autofocus)와 같은 데이터 기반 신호처리 기술을 적용하여 잔여 위상오차를 보정하는 방식으로 수행된다<sup>[12]</sup>.

PGA는 기본적으로 spotlight 모드에서 획득한 데이터에 적용하도록 개발되었다<sup>[13][14]</sup>. 한편, stripmap 모드에서는 각각의 표적이 노출되는 시간이 서로 다르기 때문에 거리 압축된 데이터가 방위 방향에서 서로 겹치게 되어 PGA 알고리즘을 직접 적용할 수 없다. 하지만 각각의 표적에 대한 방위 방향 위상 함수의 2차 미분값(phase curvature)은 서로 동일하므로 위상 오차의 2차 미분값을 합성하여 방위 시간에 대한 위상 오차 함수를 확보하고, 이를 다시 적분하여 위상 오차를 보정할 수 있다<sup>[15][16]</sup>. 또한 위상 오차를 합성하는 과정에서 WLS(weighted least square) 방식을 적용하여 위상 오차 보상 성능을 향상시킬 수 있다<sup>[17][18]</sup>.

국내에서도 PGA를 이용하여 stripmap 모드에서 획득한 데이터에 대한 요동보상 연구가 수행되었으며, SAR 영상을 여러 개의 블록으로 나눈 후 거리 방향에서 **contrast**가 높은 블록을 ROI(Region of Interest)로 선정하는 방식으로 접근하였다<sup>[12]</sup>. 하지만 각각의 거리 블록에 대해서 여러 개의 방위 블록 중 하나만이 선택되도록 구성되어 동일한 거리에 위상오차 추정에 적합한 표적이 여러 개 존재하는 경우에는 위상오차 추정 성능이 저하될 수 있다. 한편 WPCA(Weighted Phase Curvature Autofocus) 알고리즘은 표적 기반으로 위상오차를 추정할 수 있으며, 임의의 표적에 대하여 위상오차를 추정할 수 있도록 프레임워크(framework)를 구성하였다<sup>[19]</sup>.

본 논문에서는 WPCA 프레임워크를 기반으로 확장된 PGA(E-PGA, Extended-PGA) 형태의 프레임워크를 개발하여 적용하였다. E-PGA는 WPCA에서 적용된 위상오차 추

정 모듈을 대신하여 기존의 PGA 모듈을 그대로 적용하였으며, 구현이 용이하고 각 표적마다 PGA 기반으로 반복 처리를 수행하므로 보다 정확한 위상 오차를 확보할 수 있다. 이러한 PGA 기반의 접근 방식은 전체 영상에 대한 위상오차를 추정하기 위한 반복 처리 횟수를 단축시킬 수 있다. 그림 6에 확장형 PGA 프레임워크의 처리 과정을 나타내었으며, 표적 선택, 위상 오차 추정 그리고 위상 오차 합성 및 보상으로 구성된다.

### 3-2-1 표적 선택

Stripmap 모드 SAR 데이터에서는 각각의 표적에 대한 방위방향 위치가 서로 다르기 때문에 전체 SAR 영상에서 최대한 많은 위상 오차 추정치(observation)를 골고루 확보하는 것이 중요하다. 일반적으로 표적의 신호가 강할수록 위상 오차 추정에 유리하며, WPCA에서는 전체 영상에 대하여 기준값(threshold)보다 높은 모든 픽셀을 테스트하여 표적을 선별한다.

본 논문에서는 표적선별 시간을 줄이기 위해서 방위압축까지 수행된 SAR 영상에 대하여 작은 블록 단위로 공간을 분할하고, 각각의 블록에 대하여 하나의 표적을 선별하도록 구성하였다. 블록의 크기는 기본적으로  $10 \text{ m} \times 10 \text{ m}$ 를 사용하였으며, 처리 시간을 고려하여 임의로 선정할 수 있으나, 안정적인 성능을 위해서는 가능한 작게 선택하는 것이 유리하다.

우선 각각의 블록에 대한 표적 선택은 peak 값이 높은 거리 셀(range bin)을 선택하였으며, 블록 전체에 대한 contrast를 별도로 계산하였다. 이후 peak 값이 높은 순으로 약 70 % 정도를 선택하고, 그 중에서 contrast가 높은 거리 블록에 존재하는 표적을 전체 거리 블록의 약 30 % 정도 선택하도록 구성하였다.

각 블록마다 선택된 표적은 stripmap-to-spotlight 변환을 적용하여 PGA를 적용할 수 있도록 한다. Stripmap-to-spotlight 변환은 윈도우 함수를 적용(windowing)하여 다른 표적에 의한 위상 간섭을 최소화하고, 역압축(decompression)과 deramping 과정을 포함하고 있다<sup>[18]</sup>. 역압축 함수는 압축 모듈에 사용되는 방위 압축 함수와 동일한 함수를 적용해야 하므로 주파수 영역에서 수행되며, 식 (1)과 같다.

$$h_{dcomp}(f_\eta) = \exp \left[ -j \frac{4\pi R_o}{\lambda} (D(f_\eta) - 1) \right],$$

$$D(f_\eta) = \sqrt{1 - \frac{f_\eta^2 \lambda^2}{4V^2}} \quad (1)$$

여기서  $f_\eta$ 는 방위방향 주파수를 나타내며,  $R_o$ 는 표적의 최근접 거리,  $\lambda$ 는 중심주파수에 대한 파장,  $V$ 는 플랫폼 이동에 대한 유효 속도를 나타낸다.

Deramping 함수는 식 (2)에 나타내었으며, 시간 영역에서 수행된다.

$$h_{dramp}(\eta) = \exp \left[ +j\pi K_a \eta^2 \right],$$

$$-T_a/2 < \eta < T_a/2 \quad (2)$$

여기서  $K_a$ 는 방위방향의 주파수 변조율(azimuth FM rate)을 나타내고,  $\eta$ 는 방위방향의 시간,  $T_a$ 는 방위방향에서의 표적 노출 시간을 나타낸다. 특히 항공기와 같이 상대적으로 가까운 거리에서 SAR 데이터를 획득하는 경우는 거리에 따라 표적 노출 시간의 편차가 크므로 각 거리마다 서로 다른 값을 계산하여 적용해야 한다.

유효한 표적의 선택은 PGA 모듈 전후로 두 번에 걸쳐 수행된다. 그 중 첫 번째 표적 선택은 SCR(Signal-to-Clutter Ratio)을 이용하며, 거리 압축된 신호의 크기와 위상 편차 간의 관계식으로부터 계산할 수 있다<sup>[17]</sup>. 이와 같이 SCR을 이용한 표적 선택은 PGA 입력 표적을 선별할 수 있어 전체 처리 시간을 단축시킬 수 있다.

### 3-2-2 위상 오차 추정

위상 오차 추정 모듈은 일반적인 PGA 알고리즘을 그대로 적용하였으며, 각 표적에 대하여 반복적으로 위상 오차를 추정한다<sup>[14]</sup>.

위상 오차가 갱신되는 과정에서 표적은 이상적인 점표적과 유사해지며, 각 거리 셀에 대한 contrast 값 역시 증가하게 된다. 이러한 특징을 이용하여 유효한 표적을 추가적으로 선별할 수 있으며, contrast 변화를 모니터링하여 위상 오차가 감소함에 따라 contrast도 감소하는 경우가 발생하는 표적에서 추정된 위상 오차는 위상오차의 합성 과정에서 제외시키도록 프레임워크를 구성하였다.

한편, PGA 알고리즘을 이용하여 추정된 위상 오차는 2

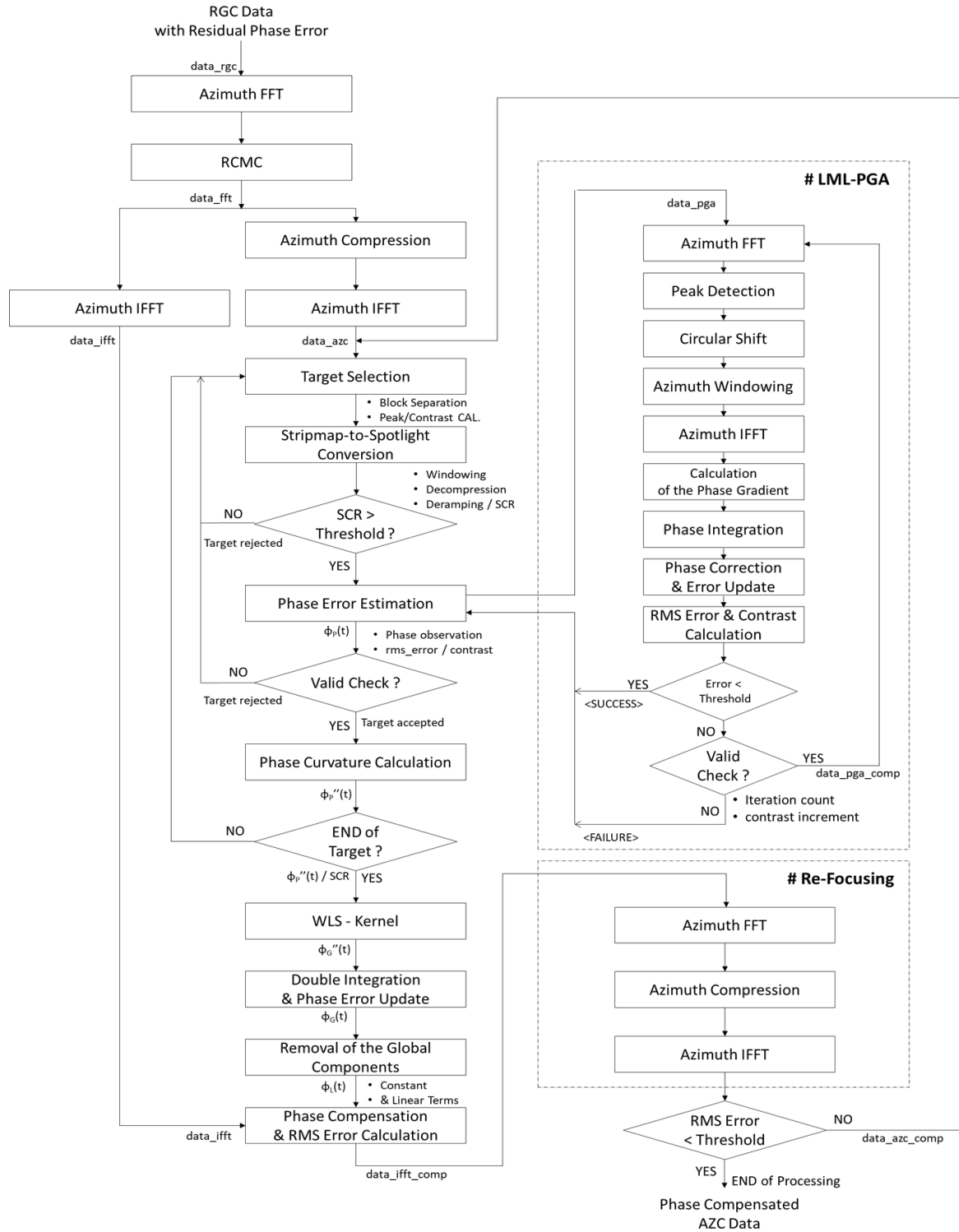


그림 6. 확장형 PGA 프레임워크의 처리 과정  
Fig. 6. Processing flow of the Extended-PGA framework.



차 미분을 수행하여 각 표적의 위상 오차에 대한 추정치를 최종적으로 확보한다.

### 3-2-3 위상 오차의 합성 및 보상

Stripmap 모드에 대한 PGA 알고리즘은 각 표적마다 추정된 위상오차 추정치를 합성하여 전체 방위 시간에 대한 위상오차를 확보하도록 구성하였다.

위상 오차의 합성은 일반적으로 WLS 방식을 적용하며, 거리에 따라 서로 다른 값을 적용하기 위해서는 입사각에 따라 수직/수평 방향으로 플랫폼 요동을 분리하거나, 낮은 차수의 다항식을 이용하여 적용할 수 있다<sup>[16],[19]</sup>. 하지만 진행방향에 대한 속도 변화에 의한 위상 오차와 노이즈에 의한 위상 오차가 상대적으로 크게 존재하는 경우는 거리에 대한 모델이 플랫폼의 요동을 제대로 표현하지 못할 수도 있다.

따라서 본 논문에서는 거리에 따라 동일한 위상 오차를 적용하는 모델(range-independent model)을 적용하였다<sup>[18]</sup>. 한편, WLS 방식에 적용되는 가중치(weight)는 SCR을 이용하여, 위상 편차를 계산하여 적용하거나, 신호의 크기 값을 직접 사용할 수 있도록 구성하였다<sup>[18],[20]</sup>.

## IV. 실험 및 결과

개발된 소형 SAR 시스템의 성능을 검증하기 위해서 현장 실험을 진행하였다. 비용의 문제로 항공기 실험은 진행하지 못하였으며, 성능을 검증하기 위하여 자동차 기반으로 데이터를 획득하고 영상을 형성하였다.

그림 7은 현장실험을 진행한 충청남도 예산대교 인근을 나타낸다. 상하행선을 차량으로 운행하면서 도로를 기준으로 북동(A영역), 남서(B영역) 지역에 대한 데이터를 획득하였으며, 데이터 획득일은 2016년 2월 25일이다.

안테나 모듈과 함께 광형 발생기, 송수신기는 그림 8과 같이 차량 상부에 장착하였으며, 데이터 수집 장치는 차량 내부에 탑재하였다. 안테나는 bi-static 방식을 사용하였고, 완전편파 영상을 획득하기 위해서 각 편파마다 송수신 안테나를 분리하여 사용하였다. 전원은 22.4 V의 LiPo 배터리를 사용하였으며, 노트북을 사용하여 원격으로 시스템을 제어하였다.

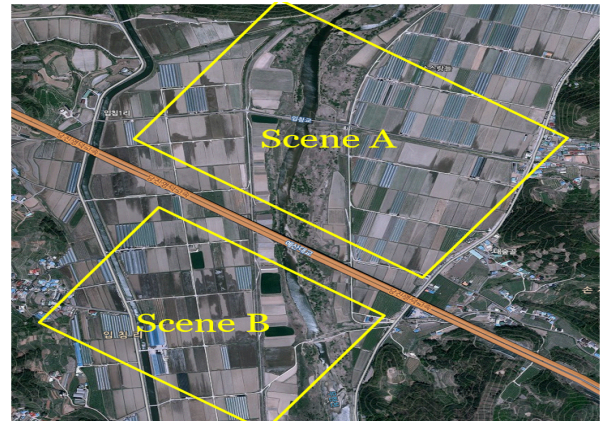


그림 7. 현장 실험 장소  
Fig. 7. Field test site.



그림 8. 자동차 장착 형상  
Fig. 8. Automotive mounting configuration.

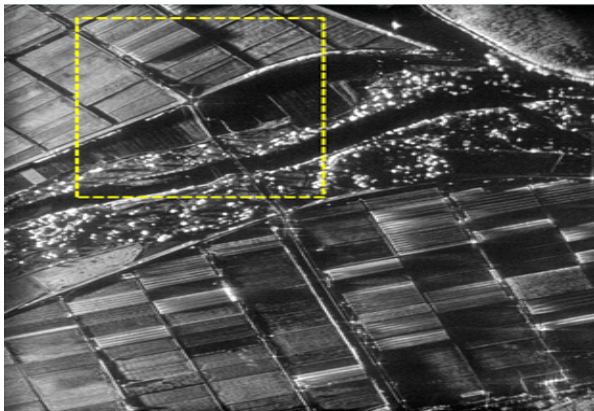
A영역에서 획득한 SAR 데이터로부터 생성한 거리압축 및 방위압축 영상을 그림 9에 나타내었다. 방위 방향 유효 속도는 81.07 km/h로 추정하였고, 유효 속도를 기준으로 전체 방위 시간에 대한 요동 보상을 수행한 결과이다. 영상의 크기는 방위 방향 1,000 m, 거리 방향 750 m이다. 논발 및 하천 등 지형지물이 잘 구별되며, 비닐하우스의 골격이 두드러질 만큼 고해상도 영상을 확보하였다.

그림 10에 B영역에서 획득한 SAR 데이터로부터 요동 보상을 위한 표적 선택 과정을 나타내었다. 그림 10(a)는 각각의 블록마다 선택된 표적을 나타내며, 설정된 기본 블록 사이즈에 대하여 전체 영상이 70×50개의 블록으로

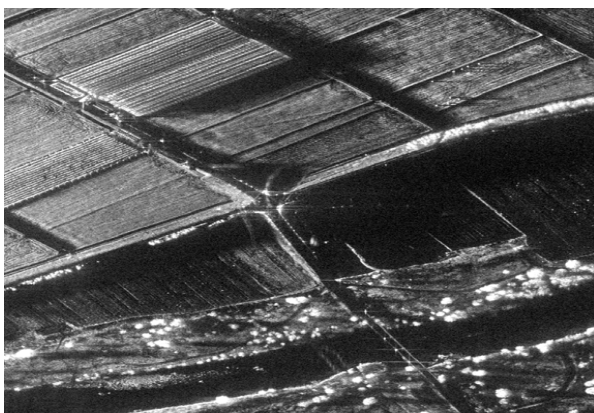




(a) 거리 압축 영상  
(a) Range compressed image

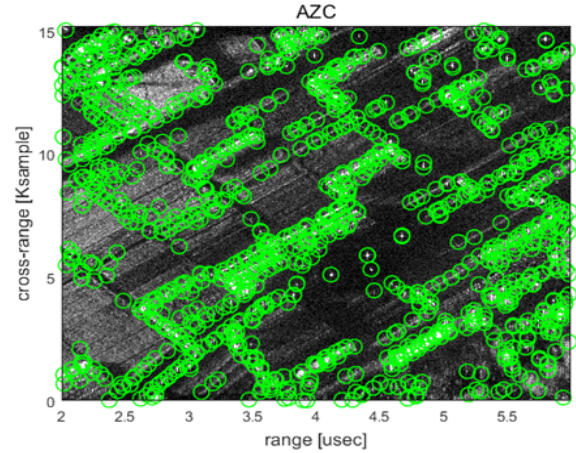


(b) 방위 압축 영상  
(b) Azimuth compressed image

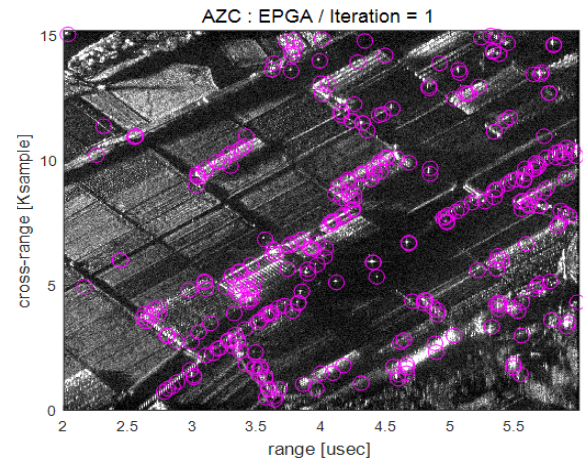


(c) 확대 영상  
(c) Enlarged image

그림 9. A 영역에 대한 신호처리 결과  
Fig. 9. Signal processing results for area A.



(a) 각각의 블록에서 선택된 표적 후보  
(a) Target candidates in each block



(b) 선택된 유효한 표적  
(b) Finally selected valid targets

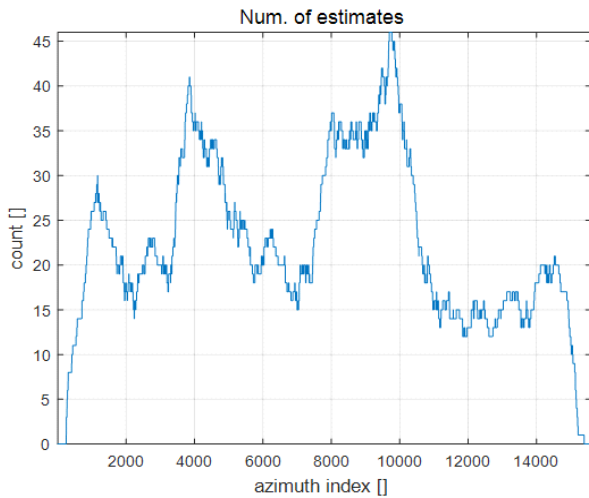
그림 10. 표적 선택 과정  
Fig. 10. Target selection process.

나뉜다. 이 중에서 **contrast** 기준으로 약 30 %의 거리 블록만 선택되므로 총 1,050개의 블록에 대하여 SCR을 계산하였다. 이후 SCR이 기준 값보다 높은 표적에 대해서만 PGA를 수행하게 되며, 670개의 표적에 대하여 PGA를 수행하였다. 최종적으로 그림 10(b)와 같이 321개의 표적에 대하여 유효한 위상 오차를 확보하였다.

유효한 위상 오차로부터 계산된 위상 오차의 2차 미분 값을 그림 11에 나타내었다. 유효한 위상 오차는 WLS 방식으로 합성되며, 그림 11(a)는 각각의 방위 시간에 대하

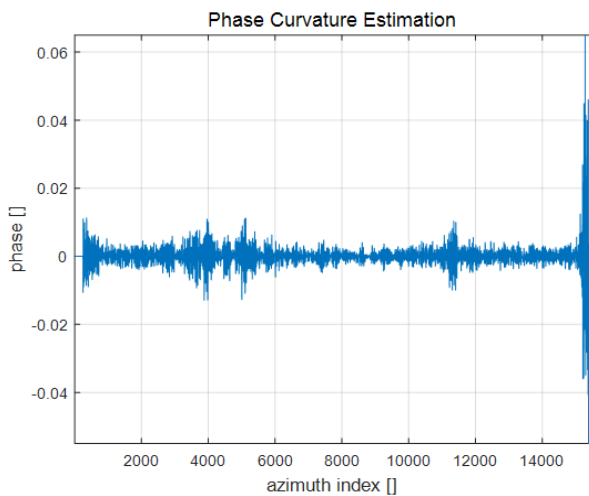
여 유효한 위상 오차의 개수를 나타내고, 그림 11(b)는 합성된 위상 오차의 2차 미분값을 나타낸다. 각각의 방위 시간에 대하여 가능한 많은 표적에 대한 위상 오차를 사용하는 것이 위상 오차 추정에 유리하며, B 영역의 데이터와 같은 경우는 전체적으로 대략 20개 정도의 표적에 의한 위상 오차를 사용할 수 있었다.

위와 같은 과정을 거쳐서 확보된 위상 오차의 2차 미분



(a) 유효한 위상 오차의 개수

(a) Valid number of phase error estimates



(b) 합성된 위상 오차의 2차 미분값

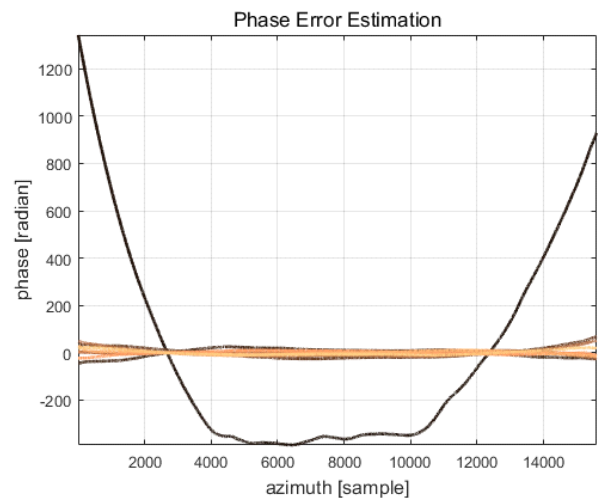
(b) Second derivative of the synthesized phase error

그림 11. 위상 오차의 2차 미분값 추정

Fig. 11. Estimation of second derivative of phase error.

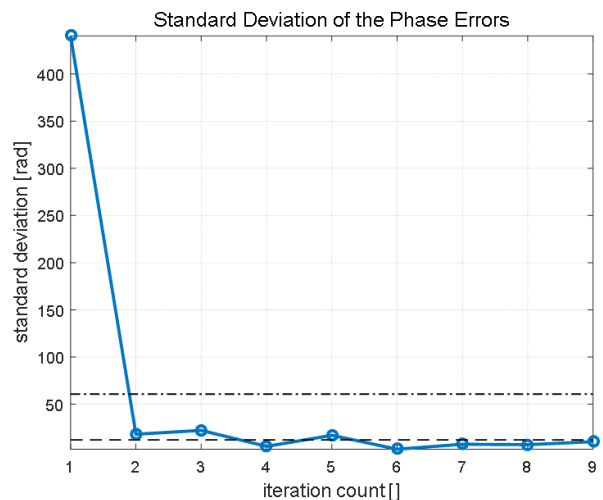
값은 적분 과정을 거쳐서 다시 위상 값으로 변환되며, 이를 사용하여 위상 오차를 보정하게 된다.

그림 12는 반복 수행에 따른 위상 오차 함수와 위상 오차의 표준편차를 나타낸다. 그림 12(a)에 나타난 오차 함수는 WLS 방식으로 합성된 위상 오차 2차 미분 값에 대한 2차 적분 값이며, 방위 방향 표적 이동을 방지하기 위해서 위상 오차의 선형 성분은 제거된 결과이다. 그림과



(a) WLS 방식에 의해 합성된 위상 오차

(a) Synthesized phase error by WLS method



(b) 위상 오차의 표준편차

(b) Standard deviation of phase error

그림 12. 위상 오차의 추정

Fig. 12. Estimation of phase error.



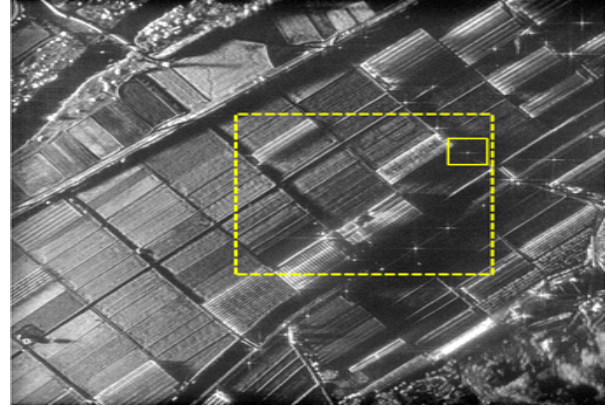
같이 첫 번째 반복에 의한 위상 오차와 비교하여 이후의 반복에서 추정되는 위상 오차들은 상대적으로 매우 작게 추정되었다. 이는 첫 번째 반복에서 대부분의 위상 오차가 제거됨을 나타낸다. 그림 12(b)는 위상 오차 함수의 표준 편차를 나타내며, 점선은 거리 해상도의 50 %와 10 %에 해당하는 위상 값을 나타내며, 각각 14.9 cm와 3 cm에 해당한다.

위에서 설명한 바와 같이 확장형 PGA 기반의 접근 방식은 각 표적에 대하여 반복적인 위상 오차 추정이 우선 수행되므로 한 번의 위상 보정만 수행하여도 충분한 수준의 위상 오차를 확보할 수 있으며, 빠른 처리를 요구하는 경우에는 반복처리 없이 수행할 수 있다.

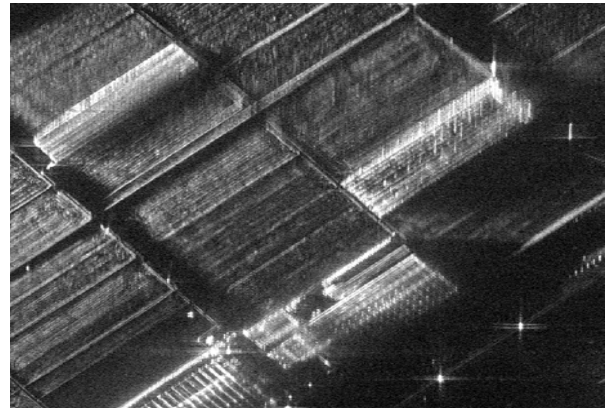
그림 13은 B영역에 대한 방위 압축 영상과 요동보상 전후의 영상을 나타낸다. 방위 방향 유효 속도는 81.75 km/h로 추정하였고, 영상의 크기는 방위 방향 710 m, 거리 방향 750 m이다. 요동 보상 이전의 확대 영상을 보면 중앙에 위치하는 비닐하우스 근처에서 영상의 품질이 크게 저하되었음을 확인할 수 있다. 진행방향에 대한 속도 변화 및 기준 경로에 대한 편차 등 다양한 원인에 의해서 위상 오차가 발생한 것으로 고려되며, 자동차를 이용한 실험 환경을 고려하였을 때 진행방향에 대한 속도 변화가 가장 큰 위상 오차의 원인으로 파악된다. 이러한 위상 오차에 의해 영상의 품질이 크게 저하되어도, 본 논문에서 개발한 요동 보상 모듈은 효과적으로 위상 오차들을 추정하고 보상함을 확인할 수 있다.

데이터 획득 당시 CR(Corner Reflector)과 같은 별도의 품질 분석 도구를 설치하지 않았지만, 도로에 위치한 전봇대의 응답에서 점표적과 유사한 응답을 확인하였다. 이를 이용하여 점표적 분석을 수행하였으며, 그림 14에 나타내었다. 그림 13(a)의 사각 실선으로 표시된 영역에 대하여 데이터 칩을 생성하였으며, 주파수 영역에서 interpolation을 수행하여 점표적 응답을 추출하였다.

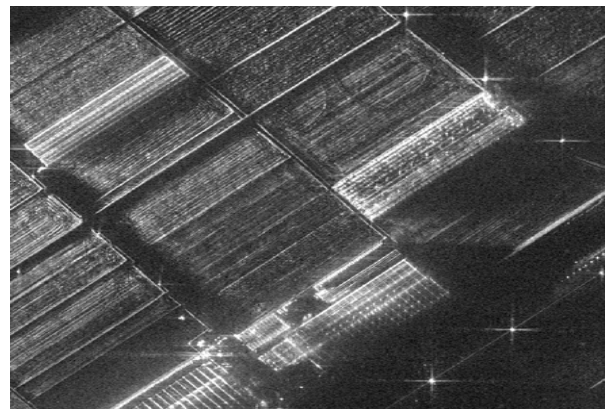
점표적 분석 결과는 표 2에 나타내었으며, 거리 해상도는 35 cm, 방위 해상도는 13 cm로 측정되었다. 거리압축 과정에서는 기본적으로 윈도를 함수(kaiser,  $\beta=2.0$ )를 적용하며, 거리 해상도는 윈도우 효과에 의해 시스템 규격에 비하여 약 20 % 정도 크게 나타났다. 요동 보상 이후의 영상 품질이 방위 방향과 완전히 동일하지는 않지만, 30



(a) 방위 압축 영상  
(a) Azimuth compressed image

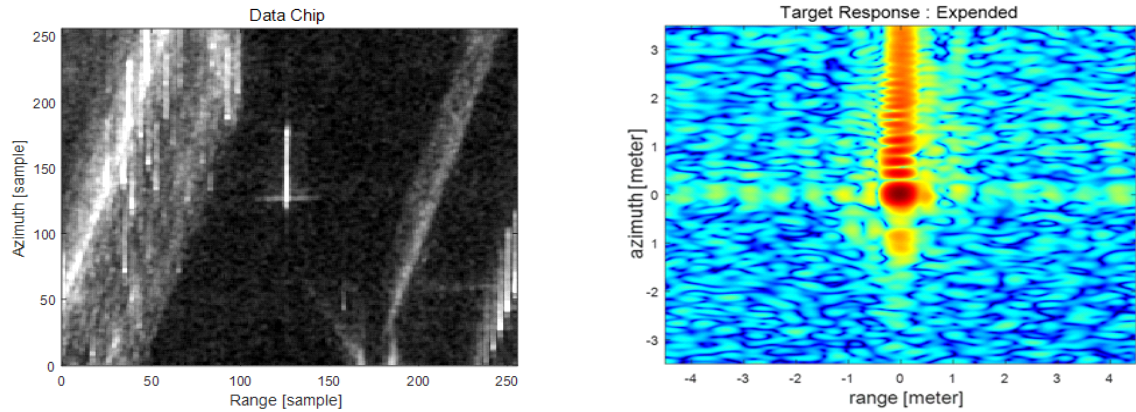


(b) 위상 오차 보정 이전의 확대영상  
(b) Enlarged image before phase error compensation

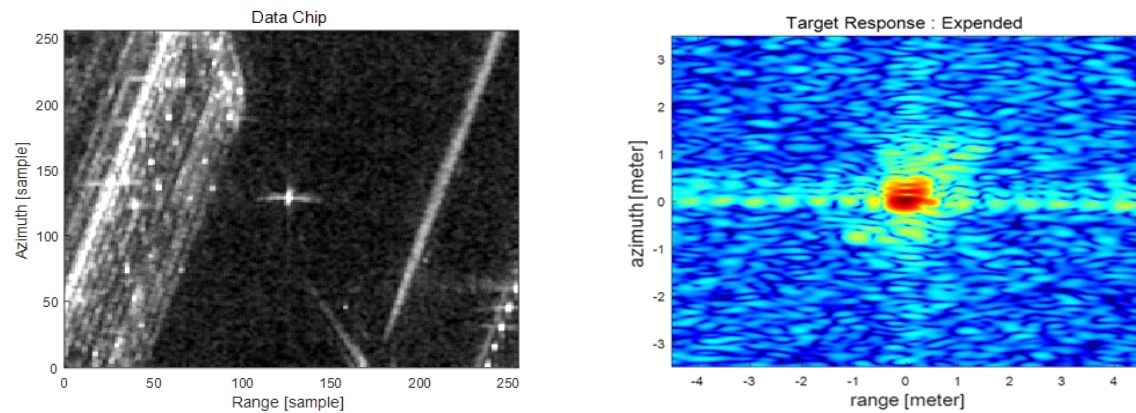


(c) 위상 오차 보정 이후의 확대영상  
(c) Enlarged image after phase error compensation

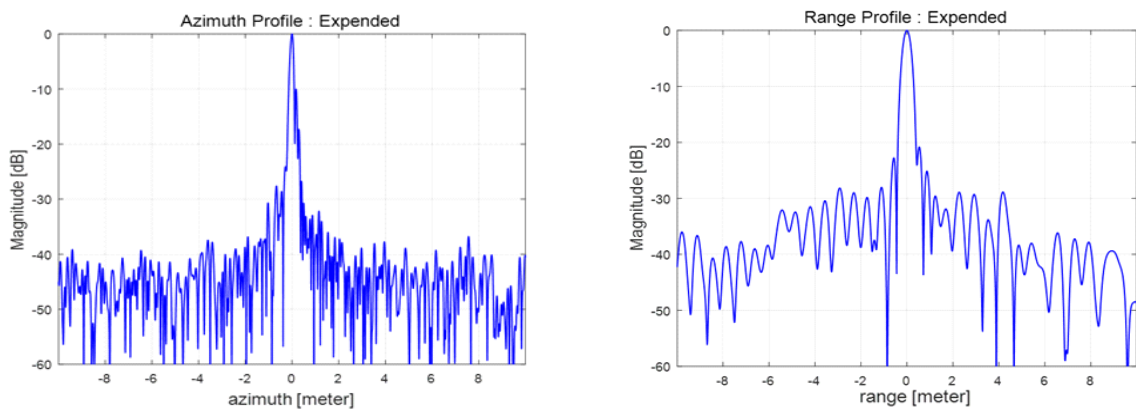
그림 13. B 영역에 대한 신호처리 결과  
Fig. 13. Signal processing results for area B.



(a) 위상 오차 보정 이전의 점표적 응답  
(a) Point target response before phase error compensation



(b) 위상 오차 보정 이후의 점표적 응답  
(b) Point target response after phase error compensation



(c) 방위 및 거리 방향의 프로파일  
(c) IRF profiles in azimuth and range direction

그림 14. 점표적 응답 특성  
Fig. 14. Point target response.



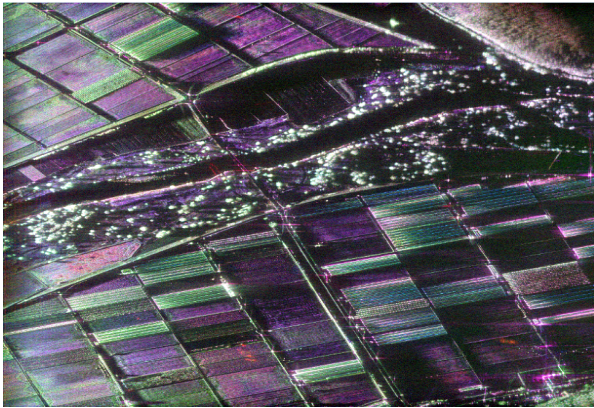
표 2. 점표적 응답 특성 분석

Table 2. Point target response analysis.

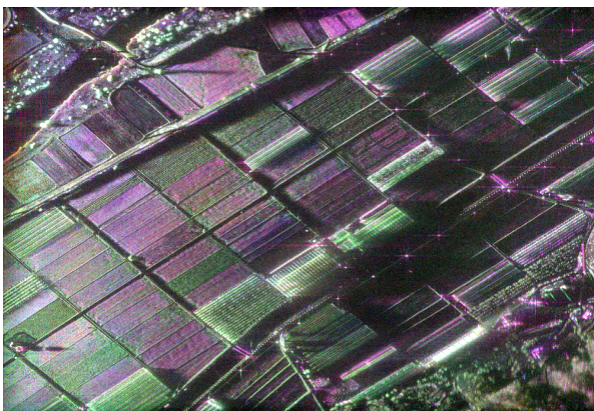
Parameter	Azimuth profile	Range profile
IRW [m]	0.13	0.35
PSLR [dB]	-10.0	-22.0
ISLR [dB]	-11.8	-18.4

cm급 해상도를 제공하기에는 충분한 결과를 제공하였다.

한편, 그림 15는 완전편파 모드에서 획득된 데이터로부터 재구성된 RGB 영상을 나타낸다. 편파 재구성 기법은 가장 기본적인 Pauli 방식을 적용하였다<sup>[21]</sup>. 데이터 획득



(a) A 영역에 대한 Pauli RGB 영상  
(a) Pauli RGB image for area A



(b) B영역에 대한 Pauli RGB 영상  
(b) Pauli RGB image for area B

그림 15. 편파 재구성 영상

Fig. 15. Polarimetric decomposition images.

이 2월에 이뤄졌기 때문에 논밭 지역은 경작이 이뤄지지 않은 상태였으며, 주로 보라색에 가깝게 나타났다. 이는 단일 산란(single-scattering)과 이중 산란(double-scattering)이 혼합된 형태이다. 하천 근처에 존재하는 나무들은 주로 볼륨 산란(volume-scattering)이 발생하였으며, 비닐하우스 영역 역시 주로 볼륨 산란이 발생하였다. 특히, 그림 15(a)에서 하천을 가로지르는 다리 구조물은 이중 산란이 주를 이루었으며, 이러한 특징들은 일반적인 편파영상과 일치하는 결과이다.

본 논문에서 개발한 SAR 시스템은 아직 정량적인 시스템 보정(calibration)을 수행하지 않았다. 하지만 산란에 따른 식별이 가능한 수준의 편파 영상을 획득하였으며, 시스템의 정량적 보정은 지속적으로 수행할 예정이다.

## V. 결 론

본 논문에서는 (주)에코센싱에서 개발한 소형 SAR 시스템을 소개하고 성능을 검증하였다. 완전 편파 영상을 확보하기 위해서 두 개의 송수신 채널을 포함하도록 개발하였으며, 영상 품질 향상을 위해 요동보상 알고리즘을 자체 개발하였다.

자동차 기반으로 성능을 검증하였지만 항공기에서도 운용이 가능한 시스템이며, 드론과 같은 소형 무인기에 탑재 가능하도록 후속 모델을 개발하고 있다. 후속 모델은 소형화된 데이터 저장 장치와 초기 속도 및 1차 요동보상을 위한 GPS/IMU 센서를 포함하여 설계하였으며, 기하정보 역시 제공할 수 있도록 하였다. 또한 무게를 최소화하기 위하여 패치어레이 형태의 안테나를 개발하고 있다.

본 논문에서는 소형 SAR 시스템 개발을 통하여 시스템 설계, 제작 및 신호처리 등의 주요 기술들을 확보하였다. 특히 활용도가 높은 편파 및 간섭 데이터를 획득 가능한 시스템 기술을 자체 개발하였으며, 획득되는 SAR 영상은 지형 관측이나 식생 분류, 연안 감시 등 다양한 분야에 활용할 수 있을 것으로 기대된다.

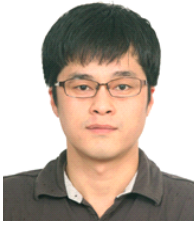
## References

- [1] Available: <https://www.imsar.com/>.
- [2] A. Meta, E. Imbembo, C. Trampuz, A. Coccia, and G.



- De Luca, "A selection of MetaSensing airborne campaigns at L-, X- and Ku-band," in *EUSAR 2012; 9th European Conference on Synthetic Aperture Radar*, Nuremberg, Apr. 2012, pp. 414-417.
- [3] A. Aguasca, R. Acevo-Herrera, A. Broquetas, J. J. Mallorqui, and X. Fabregas, "ARBRES: Light-weight CW/FM SAR sensors for small UAVs," *Sensors*, vol. 13, no. 3, pp. 3204-3216, 2013.
- [4] 황용철, 이철훈, "항공기탐재 소형 영상레이더(KOMSAR) 시스템 제어기 개발," *한국항공우주학회지*, 33(3), pp. 86-92, 2005년 3월.
- [5] B. L. Cho, Y. K. Kong, H. G. Park, and Y. S. Kim, "Automobile-based SAR/InSAR system for ground experiments," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 3, no. 3, pp. 401-405, Jul. 2006.
- [6] 공영균, 김형철, 김승환, 김수범, 임재학, "분해능 30 cm 급의 고해상도 SAR(NexSAR) 개발," *한국전자과학회 논문지*, 20(2), pp. 183-192, 2009년 2월.
- [7] 김덕진, 정정교, 김승희, "차세대 SAR 활용을 위한 이중 채널 항공기 SAR 시스템 구축 및 간섭기법 연구," *한국전자과학회 전자파기술지*, 25(2), pp. 10-20, 2014년 3월.
- [8] 이기웅, 김범승, 문민정, 송정환, 이우경, 송용규, "드론을 활용한 초소형 SAR 영상 구현 및 품질 보상 분석," *한국전자과학회논문지*, 27(9), pp. 854-864, 2016년 9월.
- [9] I. G. Cumming, F. H. Wong, *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data*, Boston, Artech House, 2005.
- [10] M. Martorella, F. Berizzi, and B. Haywood, "Contrast maximisation based technique for 2-D ISAR autofocusing," in *IEE Proceedings, Radar, Sonar and Navigation*, 2005, vol. 152, no. 4, pp. 253-262.
- [11] X. Li, G. Liu, and J. Ni, "Autofocusing of ISAR images based on entropy minimization," in *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 35, no. 4, pp. 1240-1252, Oct. 1999.
- [12] 윤상호, 고보연, 공영균, 신희섭, "Stripmap SAR 신호 처리를 위한 PGA 적용 기법," *대한원격탐사학회지*, 27(2), pp. 151-161, 2011.
- [13] P. H. Eichel, C. V. Jakowatz, "Phase-gradient algorithm as an optimal estimator of the phase derivative," *Optics Letters*, vol. 14, no. 20, pp. 1101-1103, Oct. 1989.
- [14] D. E. Wahl, P. H. Eichel, D. C. Ghiglia, and C. V. Jakowatz, "Phase gradient autofocus-A robust tool for high resolution SAR phase correction," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 30, no. 3, pp. 827-835, Jul. 1994.
- [15] D. E. Wahl, C. V. Jakowatz, P. A. Thompson, and D. C. Ghiglia, "New approach to strip-map SAR autofocus," in *Proceedings of IEEE 6th Digital Signal Processing Workshop*, CA, Oct. 1994, pp. 53-56.
- [16] H. J. Callow, M. P. Hayes, and P. T. Gough, "Stripmap phase gradient autofocus," in *Oceans 2003. Celebrating the Past ... Teaming toward the Future*, San Diego, CA, 2003, vol. 5, pp. 2414-2421.
- [17] D. G. Thompson, J. S. Bates, and D. V. Arnold, "Extending the phase gradient autofocus algorithm for low-altitude stripmap mode SAR," in *Proceedings of the 1999 IEEE Radar Conference. Radar into the Next Millennium*, Waltham, MA, Jul. 1999, pp. 36-40.
- [18] W. Ye, T. S. Yeo, and Z. Bao, "Weighted least-squares estimation of phase errors for SAR/ISAR autofocus," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 37, no. 5, pp. 2487-2494, Sep. 1999.
- [19] K. A. C. de Macedo, R. Scheiber, and A. Moreira, "An autofocus approach for residual motion errors with application to airborne repeat-pass SAR interferometry," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 46, no. 10, pp. 3151-3162, Oct. 2008.
- [20] L. Zhang, Z. Qiao, M. Xing, L. Yang, and Z. Bao, "A robust motion compensation approach for UAV SAR imagery," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 50, no. 8, pp. 3202-3218, Aug. 2012.
- [21] S. R. Cloude, E. Pottier, "A review of target decomposition theorems in radar polarimetry," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 34, no. 2, pp. 498-518, Mar. 1996.

송 정 환 ((주)에코센싱/수석연구원)



2007년 2월: 한국항공대학교 전자 및 항공  
전자공학과 (공학사)  
2010년 2월: 한국항공대학교 항공전자정  
보공학과 (공학석사)  
2011년 9월~현재: 한국항공대학교 항공  
전자정보공학과 박사과정  
2013년 2월~2016년 2월: (주)솔리드 기술

연구소 선임연구원

2016년 3월~현재: (주)에코센싱 수석연구원

[주 관심분야] SAR 신호처리, 도플러 추정, 모션 보정, SAR 시  
스템 설계, 원격탐사

김 진 수 ((주)케이에스테크놀로지/상무)

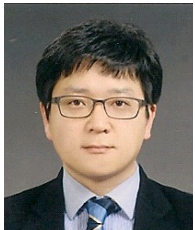


1991년 2월: 국민대학교 전자공학과 (공학  
사)  
1993년 2월: 국민대학교 전자공학과 (공학  
석사)  
2010년 8월~현재: (주)케이에스테크놀로지  
연구소장

[주 관심분야] RF & M/W System, 이동통

신장비, 신호처리보드 등

정 철 호 ((주)에코센싱/대표이사)



2003년 2월: 금오공과대학교 전자공학과  
(공학사)  
2005년 2월: 금오공과대학교 전자공학과  
(공학석사)  
2012년 2월: 한국항공대학교 항공전자정보  
공학과 (공학박사)  
2009년 7월~2011년 4월: 한국항공우주연

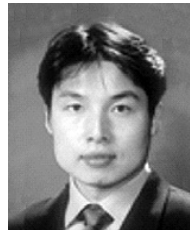
구원 연구원

2012년 2월~2016년 2월 : (주)솔리드 기술연구소 책임연구원

2016년 3월~현재: (주)에코센싱 대표이사

[주 관심분야] SAR 시스템 설계 및 신호처리, 소형 레이더 시  
스템 설계 및 신호처리

이 우 경 (한국항공대학교/교수)



1990년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자  
공학과 (공학사)  
1994년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자  
공학과 (공학석사)  
2000년 12월: 런던대학교(UCL) 전기전자  
공학과 (공학박사)  
1999년 9월: 한국과학기술원 인공위성센

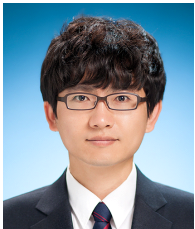
터 연구교수

2003년 1월: 삼성종합기술원 책임연구원

2004년 9월~현재: 한국항공대학교 항공전자정보공학과 부교수

[주 관심분야] 인공위성 시스템, 위성전자 레이더 탑재체

최 중 준 ((주)에코센싱/책임연구원)



2009년 2월: 한국항공대학교 전자 및 항공  
전자공학과 (공학사)  
2013년 2월: 한국항공대학교 항공전자정보  
공학과 (공학석사)  
2017년 3월: Telit Wireless Solutions R&D  
연구소 GNSS/DR 책임연구원  
2017년 4월~현재: (주)에코센싱 책임연구원

[주 관심분야] GNSS, DR, INS, 실내측위, 모션보정