

## 초소형 위성 SAR 온-보드 X 대역 칩 신호 보상 기법 및 검증

Method for Onboard X-Band Chirp Signal Compensation  
of Micro SAR Satellites and Verification

강태웅 · 김경록 · 김선구 · 허예림

Tae-Woong Kang · Kyeong-Rok Kim · Sun-goo Kim · Ye-Rim Heo

## 요 약

초소형 위성 SAR(synthetic aperture radar)은 궤도에서 운용 중에 관심 지역을 향해 칩 신호를 방사하고 반향된 신호를 수신하여 세기 및 위상 정보 해석을 통해 영상을 생성하는 100 kg 미만 급의 레이더이다. 이상적인 SAR 영상을 생성하기 위해서는 영상 획득 지역에 대한 채널 정보만을 추출하는 것이 중요하기 때문에 장치 및 위성 기동에 대한 오류를 최소화하는 방안에 대한 많은 연구가 이루어지고 있다. 또한 우주 환경의 온도 변화는 장치 오류 및 신호 품질에 영향을 미치기 때문에 우주 환경에 의한 온도 변화에 대한 영향성 최소화 방안도 함께 고려되고 있다. 본 논문에서는 우주 환경 온도 조건을 고려하여 장치에 의한 오류를 최소화하기 위해 온보드에서 온도에 따른 X대역 칩 신호 보상을 수행하고, 검증을 위해 열 챔버를 활용하여 열주기 실험을 수행하였다. 실험으로부터 획득한 데이터를 기반으로 SAR의 성능 지표인 IRF(impulse response function) 분석 결과를 제시하여 우주 환경의 온도 변화 내에서 발생하는 장치 오류 및 신호 품질 영향에 대한 보상 효과 및 타당성을 검증한다.

## Abstract

The micro Synthetic Aperture Radar (SAR) satellite weighs less than 100 kg and synthesizes high-resolution images of a region of interest by processing the amplitude and phase information of the back-scattered echo signal. As it is crucial to acquire only the channel information of the region of interest to generate an ideal SAR image, many publications have addressed methods to minimize hardware errors and satellite maneuvers. Furthermore, the space environment affects hardware performance, such as variations in temperature and signal quality. In this study, a method for onboard compensation of X-band chirp signals considering the variation in temperature is proposed and verified by an analysis of the Impulse Response Function (IRF) using the data acquired by testing hardware in the thermal chamber.

Key words: SAR (Synthetic Aperture Radar), Micro Satellite SAR, Chirp Signal, Compensation, IRF (Impulse Response Function)

## I. 서 론

위성 SAR(synthetic aperture radar) 시스템은 칩 신호를 사용하여 주야간 전천후 관심 지역에 대한 영상 획득이

가능한 시스템이다<sup>[1]</sup>. 위성 궤도를 이동하며 칩 신호를 방사하고, 관심 지역으로부터 반향되어 돌아온 신호를 수집하고 수집된 신호의 세기 및 위상 정보를 이용하여 영상을 생성하게 된다. 이러한 메커니즘을 기반으로 동작하

한화시스템 우주연구소(Department of Space R&D Center, Hanwha Systems)

· Manuscript received February 27, 2024 ; Revised March 4, 2024 ; Accepted June 10, 2024. (ID No. 20240227-020)

· Corresponding Author: Tae-Woong Kang (e-mail: taewoong92@hanwha.com)

는 SAR 시스템은 관심 지역으로부터 수집한 신호에 장비에 의한 오류가 포함되는 것을 지양한다. SAR 영상 관점에서 장비에 의한 오류가 포함되는 경우에는 신호처리 후의 IRF(impulse response function) 특성 중 해상도, 최대 부엽 레벨 등의 성능 열화 원인으로 직결될 수 있다<sup>[2]</sup>. 특히, 초소형 위성 SAR 시스템의 경우, 중형 위성에 탑재되는 SAR 시스템과 달리 부피와 무게 측면에서 소형 및 경량화가 필수적이며, 그에 따라 방열 및 열 제어 측면에서 제한적 요소가 존재하므로 온도 변화에 의한 성능 열화에 대한 대책이 요구된다<sup>[3]</sup>. 이와 같은 이유로 온도 및 장비에 의한 오류를 최소화하기 위해 초소형 위성 SAR 시스템의 검보정, 첵 신호 보상, 신호처리 등 다양한 분야에서의 연구가 진행되고 있다.

검보정, 신호처리 분야는 후처리를 통해 SAR 시스템의 성능 열화에 대해 완화하는 연구가 주를 이룬다<sup>[4]</sup>. 그와 달리 첵 신호 보상 분야는 장비에 구현되어 온보드에서 성능 열화에 대한 보상을 수행하는 연구가 주를 이룬다. SAR 시스템은 통상적으로 기저대역에서 신호를 발생시키고<sup>[5]</sup> 체배기와 혼합된 국부발진기를 통해 잡음 및 발진에 대한 안정도에 장점을 갖는 구성<sup>[6]</sup>을 기본으로 한다. 이러한 시스템 구성은 체배기를 비롯한 RF(radio frequency)회로의 비선형 특성을 포함하게 되고, 그로 인한 위상 오류를 야기하게 되는데, 파형 발생원이 되는 디지털 도메인에서 보상을 수행하는 방식<sup>[7]</sup>으로 위상 오류를 보상하여 성능 열화를 개선할 수 있다.

본 논문에서는 X대역 첵 신호를 활용하는 초소형 위성 SAR 시스템의 장비에 의한 오류를 최소화하기 위한 온보드 X대역 첵 신호 보상 기법과 FPGA(field programmable gate array) 로직 설계와 우주 환경의 온도 조건을 고려한 보상 최적화 방법을 제시한다. 또한 제안한 보상 기법이 적용된 실제 장비를 활용하여 발생된 첵 신호에 기여하는 보상 효과 및 성능 개선도를 검증하기 위해 온도 시험을 수행하고, IRF 분석 결과를 제시한다.

## II. 본 론

### 2-1 SAR 장비

본 논문에서 다루는 초소형 위성 SAR 시스템 장비의

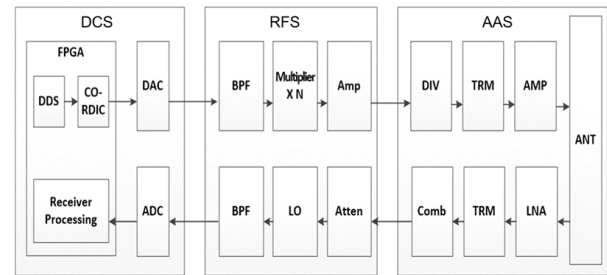


그림 1. 초소형 SAR 시스템 구성도

Fig. 1. Architecture of micro satellite SAR system.

구성은 안테나부, 송수신부, 제어부로 나뉜다. SAR 시스템의 첵 신호 발생 부분에서 역할을 나누어보면 안테나부는 첵 신호를 관심 지역으로 방사하는 기능을 수행하고, 송수신부는 첵 신호원의 대역 확장 및 주파수 상향 변환을 수행한다. 제어부는 디지털 영역에서 SAR 시스템의 첵 신호를 로직으로 처리하여 아날로그 출력단을 통해 발생시킨다.

그림 1의 구성 중에서 SAR 시스템의 첵 신호 발생에 초점을 맞춰 송수신부와 제어부 통합 구성에 대해 첵 신호의 보상 기법을 적용하며, 보상 기법을 위한 FPGA 로직은 제어부에 설계되고, 보상 입력 데이터는 송수신부의 출력으로부터 획득된다.

### 2-2 보상 기법 로직 설계 및 최적화

제안하는 보상 기법은 제어부의 FPGA 로직 설계에 적용하여 구현되며 SAR 시스템의 첵 신호원을 생성하는 단계에서 보상을 수행한다. 제어부의 첵 신호 보상 로직 아키텍처는 그림 2와 같다.

그림 2와 같이 보상 로직은 위상을 추적하는 DDS(direct digital synthesizer)의 출력에 위상 보상값을 가산하여 보상을 수행하고 보상이 적용된 위상값을 기반으로 대응되는 세기를 추정하는 CO-RDIC(COordinate-rotation digital computer)의 출력을 활용하는 방식으로 보상을 수행한다. 또한 SAR 시스템의 첵 신호 발생은 유동적인 파라미터 사용을 요구하기 때문에 첵 신호의 주파수 증분, 시작 주파수, 파형 샘플 수 등에 대한 유동적인 구현 방안이 로직 설계에 반영되어야 한다.

그림 2의 DDS 로직은 시작 주파수, 주파수 증분값, 파

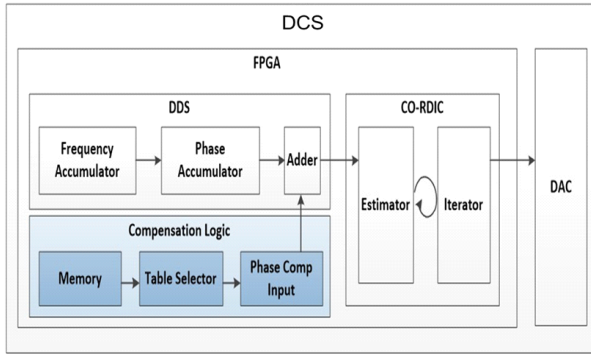


그림 2. 초소형 SAR 시스템 칩 보상 로직 구성도  
Fig. 2. Architecture of chirp compensation logic of micro satellite SAR system.

형 샘플 수를 입력으로 식 (1)과 같은 출력을 산출한다.

$$f_{DDS}(n) = \theta_1 n + \theta_2 n^2 \quad [n = 0, 1, 2, \dots, N] \quad (1)$$

$\theta_1$ =시작주파수 위상  
 $\theta_2$ =증분주파수 위상  
 $N$ =파형 샘플 수

보상 로직은 보상값 선택 기준에 따라 선정된 보상값이 저장된 메모리로부터 가산할 보상값을 읽어 온 후, DDS 내 위상 축적기 출력에 가산을 수행하고 가산이 완료된 DDS는 식 (2)와 같은 출력을 산출한다.

$$f'_{DDS}(n) = \theta_1 n + \theta_2 n^2 + \theta_c(m) \quad [n = 0, 1, 2, \dots, N] \quad [m = 0, 1, 2, \dots, M] \quad (2)$$

$\theta_1$ =시작주파수 위상  
 $\theta_2$ =증분주파수 위상  
 $\theta_3$ =보상 위상  
 $N$ =파형 샘플 수  
 $M$ =보상 테이블 샘플 수

CO-RDIC 로직은 입력 받은 위상값으로부터 대응되는 세기를 추정하여 식 (3) 및 식 (4)와 같은 출력을 산출한다.

$$f_{CORDIC}(n) = \cos(\theta_1 n + \theta_2 n^2 + \theta_c(m)) \quad (3)$$

$$Chirp = \cos(2\pi f t + \pi k t^2 + \theta_d) \quad (4)$$

$\theta_d$ =왜곡 위상

CO-RDIC의 최종 출력은 칩 신호의 일반화 식과 같은 꼴로 귀결되며, DAC로 입력되어 RF 신호로 변환되며 칩 신호를 출력하게 된다.

그림 3은 보상 로직의 내부 구조를 나타낸다. Memory에 저장되는 보상값 table은 HW 특성화를 통해 HW에서 발생하는 위상 왜곡을 측정하여 가감하는 형태의 값으로 산출되며, 보상을 적용하는 경우, 왜곡 위상을 상쇄시키면서 보상이 수행되게 된다.

$$\begin{aligned} \text{if } \theta_d &\doteq -\theta_c, \\ Chirp_{out} &= \cos(2\pi f_{st} t + \pi k t^2 + \theta_d + \theta_c) \\ &\doteq \cos(2\pi f_{st} t + \pi k t^2) \end{aligned} \quad (5)$$

Table selector는 DAC의 온도 정보와 threshold를 기준으로 memory 영역에서 읽어 올 보상값을 결정하고 결정된 보상값을 DDS 내 adder에 입력되도록 제어한다.

본 논문에서는 보상을 적용하기 전, 온도에 따른 시스템의 특성화를 선제적으로 수행하였다. 특성화 및 보상값의 산출 방법으로는 온도별로 보상 적용 전 신호의 주파수 응답을 추출하여 이상적인 신호의 주파수 응답 간의 위상 차이를 활용한다.

이 과정에서 특성의 변곡이 가장 크게 나타나는 온도점과 적용할 온도점의 개수를 선정한다. 온도점을 너무 많이 가져가는 경우, 많은 보상값의 저장이 필요하기 때문에 HW의 부담이 커진다. 이러한 부담을 최소화하기 위해 HW가 수용할 수 있는 범위 내의 개수가 선정되어야 하며 전체 온도 범위에서 원하는 성능을 얻을 수 있도록

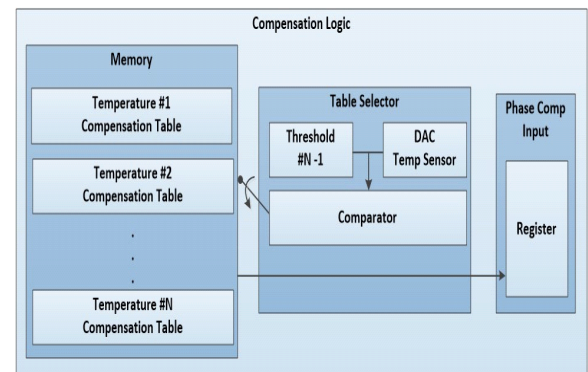


그림 3. 위상 보상 메모리 맵핑 제어 로직 구성도  
Fig. 3. Architecture of mapping controller of phase compensation logic.

관리되어야 한다.

온도점이 선정되고 나면 해당 온도점에서 추출한 위상 차이를 가감할 수 있는 값으로 변환하여 보상 테이블에 입력할 보상값을 산출한다. 산출된 위상 보상값은 메모리에 온도별로 주소를 할당하여 저장하고, 온도점 사이의 범위에서 보상의 효과가 최대로 나타나도록 반복 측정을 통해 그림 3의 threshold값을 최적화하여 온도점 간의 중간 온도 부근에서의 보상 효율을 최대한 향상시킨다.

추가적으로 소요 메모리 용량 최적화를 위해 위상 보상값 산출에 적용되는 주파수 응답은 1,024개의 샘플로 한정하였다. 해당 샘플 수는 특성화 과정에서 획득된 데이터가 보이는 위상 차이의 꼴을 기반으로 충분히 유사한 꼴로 모사가 될 수 있도록 선정하였다.

개발하는 장비 및 시스템의 특성에 따라 신호 특성이 크게 변화하는 온도 및 온도 범위 내에서 원하는 성능을 얻을 수 있는 온도점의 개수, threshold, 보상값 테이블을 구성하는 샘플 수는 모두 다를 것이다. 온도 변화에 따른 특성 변화 추이를 파악하고 최적화하여 보상 기법을 적용하는 것이 중요하다.

### III. 실험

제안된 초소형 SAR 시스템의 첩 신호 보상 기법을 우주 환경의 온도 조건에 따라 검증하기 위해 실험적 검증을 수행하였으며, 실험 환경은 온도 조건을 모사하기 위해 그림 4와 같이 열주기 챔버에 제어부 및 송수신부를

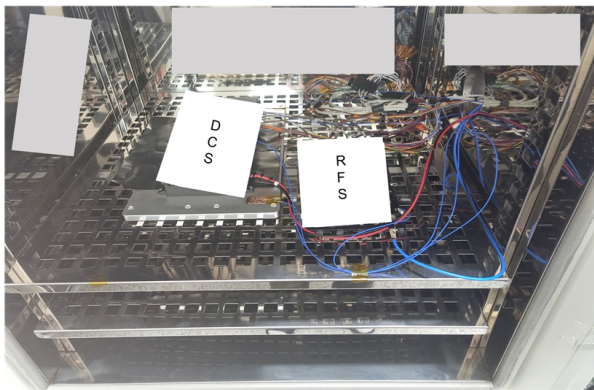


그림 4. 실험 환경 구성도

Fig. 4. The test environment with thermal cycle chamber.

배치하여 구성된다.

실험의 온도 조건은  $-20\sim 50^{\circ}\text{C}$  범위의 온도 변화 주기를 모사하였다. 챔버 내 온도 환경 모사는 챔버의 온도를 설정하고, 대류의 영향성을 최소화하기 위해 안정 시간을 충분히 두어 하우징에 부착된 온도 센서가 실험 온도 조건을 만족하도록 실험을 진행하였다.

성능을 측정하는 실험 온도 구간은 특성화 과정에서 선정된 7개의 온도점( $-15^{\circ}\text{C}$ ,  $3^{\circ}\text{C}$ ,  $17^{\circ}\text{C}$ ,  $25^{\circ}\text{C}$ ,  $31^{\circ}\text{C}$ ,  $36^{\circ}\text{C}$ ,  $45^{\circ}\text{C}$ ) 사이를 모두 포함할 수 있도록 하였다. 또한 온도점 사이에 임의의 온도에서 검증이 수행될 수 있도록 온도 변화 주기를 유지한 채로 온도 센서의 온도가 타겟이 되는 범위에 있을 때 파형을 발생시켜 실험을 진행하였다.

표 1은 실험에 사용된 파라미터를 나타내며, 실험은 첩 신호 보상 기능을 비활성화 상태와 활성화 상태에서의 데이터 획득을 위해 동일 온도 구간 내에서 반복적인 파형 발생을 수행하여 측정 데이터를 획득하였다.

실험의 분석 결과로 제시되는 IRF의 해상도, PSLR (peak side lobe ratio) 및 ISLR(integrated side lobe ratio)의 기준 및 산출 범위는 그림 5와 같다.

해상도는 주엽 최대 응답에서부터 3 dB 아래가 되는

표 1. 실험 파라미터

Table 1. Test parameter.

Parameter	Value
Bandwidth	$> 400\text{ MHz}$
Center frequency	$> 9.5\text{ GHz}$
Pulse duty	$> 20\%$

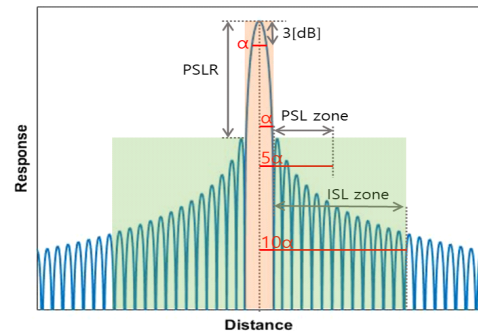


그림 5. IRF 성능 지표 산출 기준

Fig. 5. The calculation criteria of IRF performance.

점을 기준으로 하는 폭으로 정의된다. PSLR의 경우, 주엽의 중앙을 기준으로 해상도~해상도 5배까지의 영역에서 가장 응답이 큰 부엽의 최대 응답과 주엽의 최대 응답 간의 차이로 정의되며 ISLR의 경우, 그림 5의 주홍색 영역의 에너지 합과 초록색 영역의 에너지 합 간의 비율로 정의된다.

다음은 7개의 실험 온도 구간에서 반복적으로 수행한 실험에 대한 결과를 요약 및 정리하여 나타낸다.

그림 6은 실험 온도 구간  $-15^{\circ}\text{C} \sim 3^{\circ}\text{C}$ 에서 보상 기능 비활성화 상태로 수행한 시험 결과로 장비에서 발생한 첩 신호의 위상 오류를 포함한 신호를 이상적인 첩 신호와 압축을 수행한 IRF를 나타낸다.

그림 7은 그림 6과 동일 온도 조건에서 보상 기능 활성화 상태로 장비에서 발생한 첩 신호의 위상 오류를 보상

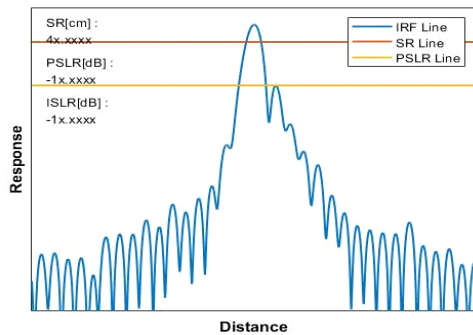


그림 6. 실험 결과( $-15^{\circ}\text{C} \sim 3^{\circ}\text{C}$  보상 기능 비활성화): IRF  
Fig. 6. The test result of IRF on  $-15^{\circ}\text{C} \sim 3^{\circ}\text{C}$  without compensation.

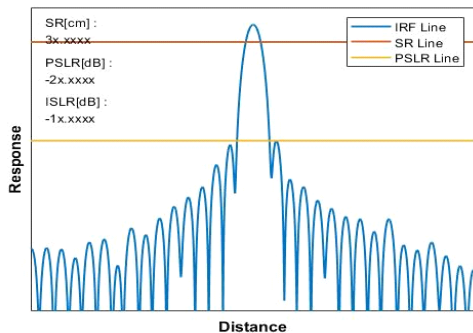


그림 7. 실험 결과( $-15^{\circ}\text{C} \sim 3^{\circ}\text{C}$  보상 기능 활성화): IRF  
Fig. 7. The test result of IRF on  $-15^{\circ}\text{C} \sim 3^{\circ}\text{C}$  with compensation.

표 2. 실험 결과(모든 구간): 보상에 따른 IRF 개선도

Table 2. Test result of improvement for compensation on all temperature.

IRF	Improvement (@temperature)						
	-15~3	3~17	17~25	25~31	31~36	36~45	45~50
SR [cm]	3.07	3.28	3.04	3.05	2.81	2.93	3.05
PSLR [dB]	3.55	3.64	2.78	3.84	3.78	2.86	3.73
ISLR [dB]	1.39	1.45	1.36	1.40	1.35	1.33	1.28

한 시험 결과로 분석 기준은 그림 6의 분석과 동일하다.

표 2는 모든 실험 온도 구간에 대한 보상 기능 비활성화 실험 결과와 보상 기능 활성화 실험 결과를 비교하여 첩 신호 보상 기법의 성능 개선도를 정리하여 나타낸다.

실험 온도점을 기준으로 나눈 온도 구간 별로 실험적 검증을 수행한 결과, 첩 신호 보상 기법을 통해 해상도에서 약 3 cm, PSLR에서 약 3 dB, ISLR에서 약 1.3 dB의 성능 개선이 이루어짐을 확인할 수 있다.

또한 보상 기능 활성화 후의 온도별 IRF 특성 간의 차이는 해상도 0.3 cm, PSLR 0.12 dB, ISLR 0.09 dB 이내로 보상 기법을 통해 온도 구간 내에서 균일한 성능 특성을 확인할 수 있었다.

#### IV. 결 론

본 논문에서는 초소형 위성 SAR 시스템의 유동적인 첩 신호 보상 기법을 제안 및 구현하고 실험을 통해  $-20 \sim 50^{\circ}\text{C}$ 의 온도 변화 주기 내에서 해상도 약 3 cm, PSLR 약 3 dB, ISLR 약 1.3 dB의 성능 개선을 검증하였다.

실험적 검증 결과, 제안한 보상 기법이 소형/경량화 이슈로 방열에 취약한 구조를 갖는 초소형 위성 SAR 시스템의 온도에 의한 성능 열화 대책 방안으로 활용 가능성을 확인하였다.

본 논문에서 제안한 초소형 위성 SAR 시스템 X대역 첩 신호 보상 기법은 우주 환경에 의해 발생하는 초소형 위성 SAR 시스템의 온도 취약점에 대한 대책 방안 중 하나로 활용할 계획이며, 초고해상 영상 획득이 요구되는 추세에 따른 대역폭 확장에 대응되는 효과적인 첩 신호



보상 기법에 대한 연구도 진행될 계획이다.

## References

- [1] I. G. Cumming, F. H. Wong, *Digital Processing of Synthetic Aperture Radar Data*, Boston, MA, Artech House, 2005.
- [2] S. B. Ryu, J. P. Kim, J. H. Yang, Y. J. Won, and S. K. Lee, "Study of RF impairments in wideband chirp signal generator," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 24, no. 12, pp. 1205-1214, Dec. 2013.
- [3] S. Kim, S. H. Lee, S. C. Song, and H. U. Oh, "Development of SAR payload for 80 kg class micro-satellite based on active phased array antenna," in *Proceedings of the 14th European Conference on Synthetic Aperture Radar(EUSAR 2022)*, Leipzig, Jul. 2022, pp. 1-5.
- [4] B. S. Kang, K. Lee, "Quality improvement of synthetic aperture radar images in curved-orbit geometry using a post-focusing algorithm," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 31, no. 8, pp. 729-737, Aug. 2020.
- [5] K. Kim, J. H. Kim, "Polynomial regression predistortion for phase error calibration in X-band SAR," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Letters*, vol. 19, pp. 1-5, Oct. 2020.
- [6] J. E. Brittain, "The evolution of electrical and electronics engineering and the proceedings of the IRE: 1913-37," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 77, no. 6, pp. 837-856, Jun. 1989.
- [7] Y. B. Lee, "A design method for pre-distortion compensation of SAR chirp signal based on envelop sampling and interpolation filter," *Journal of the Korean of Military Science and Technology Society*, vol. 25, no. 4, pp. 347-354, Aug. 2022.

강 태 응 [한화시스템/선임연구원]

<https://orcid.org/0009-0003-4103-8611>



2019년 8월: 한국해양대학교 전파공학과 (공학석사)  
2022년 8월~현재: 한화시스템 우주연구소 선임연구원  
[주 관심분야] 영상 레이다, 디지털 신호 처리 등

김 선 구 [한화시스템/선임연구원]

<https://orcid.org/0009-0005-9541-7347>



2015년 2월: 남서울대학교 정보통신공학 (공학사)  
2022년 6월~현재: 한화시스템 우주연구소 선임연구원  
[주 관심분야] 영상 레이다, 디지털 HW 등

김 경 록 [한화시스템/전문연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-3552-2365>



2022년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학박사)  
2022년 2월~현재: 한화시스템 우주연구소 전문연구원  
[주 관심분야] 영상 레이다, SAR 영상 신호처리 등

허 예 림 [한화시스템/연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-0811-7276>



2021년 2월: 광운대학교 전자융합공학과 (공학석사)  
2021년 5월~현재: 한화시스템 우주연구소 연구원  
[주 관심분야] 영상 레이다, RF HW 등