

## 위성용 X-Band SAR 전자 프런트엔드 개발

## Development of an X-Band SAR Electronic Front-End for Satellite Applications

이선우 · 이정수 · 한신 · 이창현 · 한진영 · 윤성식

Sunwoo Lee · Jungsoo Lee · Shin Han · Changhyun Lee · Jinyoung Han · Seong Sik Yoon

### 요 약

본 논문에서는 고해상도 영상 촬영을 위한 위성용 X-band SAR(synthetic aperture radar) 전자 프런트엔드(EFE) 개발 및 측정 결과를 기술하였다. SAR 전자 프런트엔드를 구성하는 다수의 송수신 모듈은 고출력 증폭 소자와 저 잡음 증폭 소자를 적용하였고, MFC(multi function chip)를 이용하여 위상 및 진폭을 제어하여 위상배열 안테나의 빔 조향이 가능하게 설계하였다. 그뿐만 아니라, coupled line coupler와 다수의 RF switch로 구성된 switch matrix를 이용하여 보정 경로를 확보하였고, VHT(via-hole transition)를 이용하여 제한된 공간에서 RF 간섭을 최소화하였다. 제작한 X-band SAR 전자 프런트엔드는 목표하는 주파수 대역에서 00 dBm 이상의 펄스 송신 출력(100  $\mu$ s Pulse period와 25 % Duty), 00 dB 이상의 수신 이득, 00 dB 이하의 수신 잡음지수를 확보하였다.

### Abstract

In this paper, we describe the development of an engineering model of an X-band synthetic aperture radar (SAR) electronic front-end (EFE) for high-resolution satellite imaging and measurement results. A number of transmit/receive modules that constitute the SAR EFE were designed to apply high-power and low-noise amplifier elements and to control the phase and amplitude using a multi-function chip (MFC) to enable beam steering of the phased array antenna. In addition, a compensation path was secured using a coupled-line coupler and a switch matrix consisting of several RF switches. RF interference was minimized in a limited space using a via-hole transition (VHT). In the target frequency band, the fabricated X-band SAR EFE had a transmit pulsed output power (a 100  $\mu$ s pulse period and a 25 % duty) higher than 00 dBm, a receive gain higher than 00 dB, and a receive noise figure of less than 00 dB.

Key words: Electronic Front-End (EFE), Satellite, Synthetic Aperture Radar (SAR), Transmit/Receive Module (TRM), X-Band

### I. 서 론

위성용 SAR(synthetic aperture radar)는 우주 공간에서 지상 및 해양에 순차적으로 방사한 전파가 굴곡 면에 반사되어 돌아오는 미세한 시간차를 이용하여 고해상도 이미지를 촬영할 수 있고, 주간/야간 및 기상 조건 등에 관

계없이 지형 이미지를 확보할 수 있어 지속적이고 체계적으로 지구 표면을 모니터링할 수 있어 과학, 상업, 군사 등의 분야에서 많이 활용되고 있다<sup>[1][2]</sup>. 특히, 군사 분야에서는 특정 관심 영역(AoI, area of interest)의 고해상도 이미지를 확립된 임무 계획에 따라 필요시 단시간 내에 확보하여 복잡하고 긴급하게 변화하는 작전 현장에 대한

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

· Manuscript received December 27, 2024 ; Revised January 9, 2025 ; Accepted February 11, 2025. (ID No. 20241227-140)

· Corresponding Author: Seong Sik Yoon (e-mail: yss111@hanwha.com)

감시 및 정찰 수행 능력을 향상시킨다<sup>[3]</sup>.

SAR 탑재체는 고해상도 SAR 이미지 수집을 위해서 높은 이득을 갖는 능동 위상배열 안테나, 고출력/저 잡음 증폭을 가지며 안테나의 빔 조향이 가능하게 위상 및 진폭 제어가 가능한 송수신 모듈(TRM, transmit/receive module) 등을 갖추어야 한다. 특히, SAR 탑재체는 수백 개의 채널로 구성되는데, 이에 따라 수백 개의 송수신 모듈이 요구되어, 전체 시스템에서 가장 많은 무게와 소모 전력을 사용한다. 그래서, 효율적인 기계적 설계 및 적절한 RF/전원/제어 회로를 구성하여 규격화하여 단위 모듈로 개발하여 확장성을 갖도록 개발되어야 한다.

본 연구에서는 다수의 송수신 모듈이 적용된 위성용 X-band SAR 전자 프런트엔드 (EFE, electronic front end)의 설계 및 개발에 대해서 서술하고 제작 및 측정 결과에 대해서 나타내고 있다.

## II. X-band SAR 전자 프런트엔드 설계 및 제작

그림 1은 위성용 X-band SAR 전자 프런트엔드 구성도 및 주요 기능을 나타내고 있다. X-band SAR 전자 프런트엔드는 다수의 송수신 모듈, 송수신 모듈 전원/제어 조립체(TCA, TRM control assembly), 그리고 채널 분배 조립체(CDA, channel distribution assembly)로 구성된다. 다수의 송수신 모듈은 송신 신호 고출력 증폭, 수신 신호 저 잡음 증폭, 빔 조향을 위한 송수신 신호의 위상 및 진폭 제어, 보정 경로 확보, 수신 회로 보호 등의 기능을 갖는다. 송

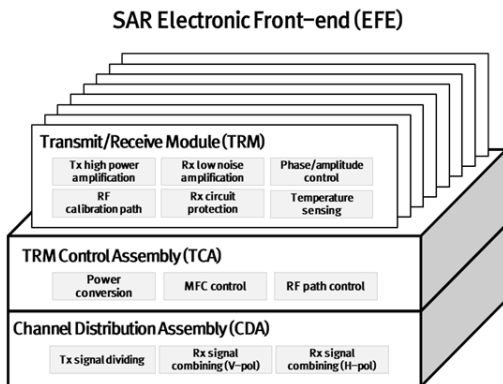


그림 1. SAR 전자 프런트엔드 구성도 및 주요 기능  
Fig. 1. SAR EFE schematic and main functions.

신 모듈 전원/제어 조립체는 송수신 모듈에 인가되는 전원 변환 및 MFC(multi function chip) 제어, 송수신 모듈의 운용 모드별 RF 경로 제어 등의 기능을 수행한다. 그리고, 채널 분배 조립체는 송신 신호를 다수의 채널로 분배하고, 다수의 수신 수직 편파 신호 결합 및 수신 수평 편파 신호 결합을 목표로 한다.

SAR 전자 프런트엔드 분해도는 알루미늄 하우징 상단에 송수신 모듈 전원/제어 조립체가 체결되고, 하우징 하단에 채널 분배 조립체가 각각 체결된다. 그림 2는 X-band SAR 전자 프런트엔드 분해도를 나타내고 있다.

또한, 내부 덮개 및 하우징 형상 성형 등으로 송수신 신호 간 격리도를 향상시킨다. 알루미늄 하우징 상/하단 덮개로 하우징 내부에 체결된 전원/제어 조립체 및 채널 분배 조립체를 보호한다. 다수의 송수신 모듈들은 하우징 상단에 체결되어 하우징 상단의 전면을 덮는 형상을 갖는다.

그림 3은 SAR 전자 프런트엔드를 구성하는 송수신 모듈, 송수신 모듈 전원/제어 조립체, 채널 분배 조립체의 상세 블록도를 나타내고 있다. 다수의 송수신 모듈은 Rogers 기판등을 이용한 multi-layer PCB(printed circuit board) 형태로 구현되었다. 요구되는 송신 출력 전력을 만

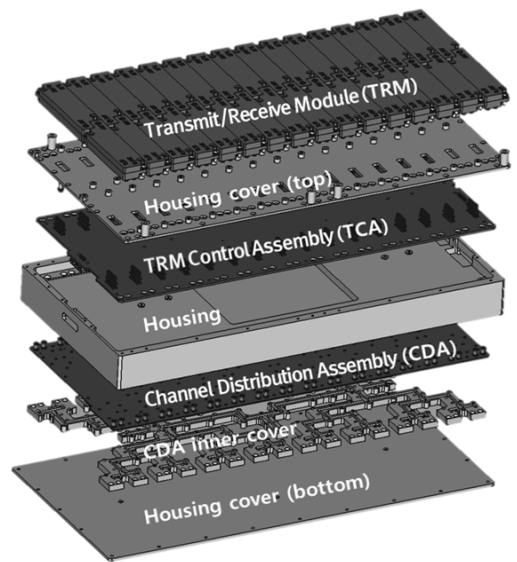


그림 2. SAR 전자 프런트엔드 분해도  
Fig. 2. SAR EFE exploded diagram.

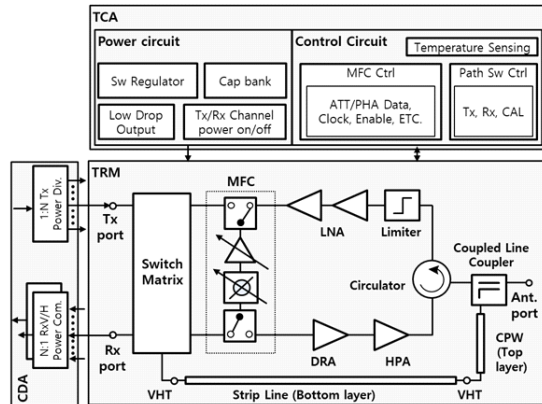


그림 3. SAR 전자 프런트엔드 블록도

Fig. 3. SAR EFE block diagram.

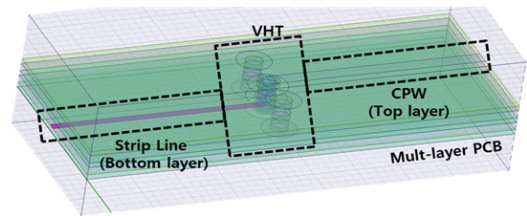
축하기 위해, 안테나 포트(Ant. port)로 연결되는 전송 선로(transmission line), CLC(coupled line coupler), circulator의 손실들을 고려하여 GaN(gallium nitride)과 HPA(high power amplifier)를 선정하였다. DRA(driver amplifier)는 고온에서 발생하는 이득 저하를 고려하여 충분한 입력 전력을 HPA로 인가할 수 있는 소자가 선정되었다.

SAR 위성의 촬영 거리는 약 1,000 km에 달하는데, 촬영 영상의 품질을 위해 목표물로부터 수신되는 신호가 충분한 저 잡음 증폭이 되어야 하기 때문에 화합물 기반의 고성능 LNA(low noise amplifier)를 사용하였고, LNA의 보호를 위해서 적절한 크기의 Limiter를 적용하였다. 또한, MFC은 안테나 빔 조향을 위한 위상/진폭 제어뿐만 아니라 위성체의 궤도 환경의 영향에 따라 송수신 모듈의 온도 변화에 발생하는 RF 신호의 위상/진폭 변화 보상에 활용된다.

위성용 송수신 모듈은 특성 열화 및 고장 발생 시 수리가 불가능하고, SAR 탑재체 성능 저하를 유발하기 때문에 송수신 모듈의 특성 및 상태 확인을 위한 내부 보정 기능이 필수적이다. 송수신 모듈은 다수의 스위치 조합으로 구현된 switch matrix와 CLC를 이용하여 RF 경로 제어 및 보정 경로를 확보하였다. switch matrix는 다수의 SPDT(single-pole double-throw) 및 SP4T(single-pole quadruple-throw) switch로 구성되어 송수신 모듈의 모드별 RF 경로를 제어한다.

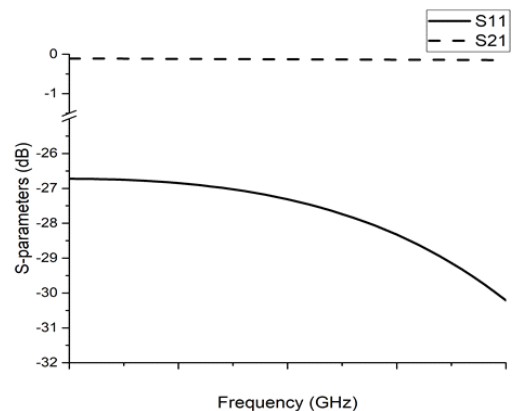
보정 경로를 위해 CLC와 switch matrix를 연결하는 전

송 선로는 좁고 제한된 공간에서 소자들과 간섭(coupling)을 야기하여 송수신 모듈의 RF 특성을 열화 시킨다. 보정 경로로 사용되는 전송 선로를 송수신 모듈 multi-layer PCB의 bottom layer에 strip line으로 구현하였고, VHT(via-hole transition) 구조를 이용하여 top layer의 CPW(coplanar waveguide transmission line)과 연결하여 간섭을 최소화하였다. 그림 4는 VHT 구조의 시뮬레이션 형상과 결과를 나타내고 있다. VHT는 3개의 via-hole을 적절한 크기와 간격으로 설계되어 특성 임피던스(characteristic impedance) 50 Ohm을 가지며 전이를 일으킨다. 설계된 VHT를 이용하여 우측 top layer의 CPW를 좌측 bottom layer의 strip line으로 연결하는 시뮬레이션 결과 목표 주파수 대역에서  $S_{11}$ 은  $-26.5$  dB 이하를 갖고,  $S_{21}$ 은  $-0.4$  dB 이하를 보여주어, VHT를 이용하여 RF 특성 열화 없이 전송 선로 형태 및 Multi-layer PCB의 Top layer에서 Bottom layer로 전이할 수 있다. 표 1은 송수신 모듈의 다양한 모



(a) 시뮬레이션 형상

(a) Simulation geometry



(b) 시뮬레이션 결과

(b) Simulation results

그림 4. Via-hole transition 구조

Fig. 4. Via-hole transition structure.

표 1. 송수신 모듈의 모드별 RF 경로  
Table 1. RF paths of the TRM.

Mode	RF path
Tx path	Tx port - Switch Matrix - MFC - DRA - HPA - circulator - coupler - Ant. Port
Rx path	Ant. Port - coupler - circulator - limiter - LNA - MFC - switch matrix - Rx port
Tx cal. path	Tx port - switch matrix - MFC - DRA - HPA - circulator - coupler - CPW - VHT - strip line - VHT - switch matrix - Rx port
Rx cal. path	Tx port - switch matrix - VHT - strip line - VHT - CPW - coupler - circulator - limiter - LNA - MFC - switch matrix - Rx port
S-cal path	Tx port - switch matrix - Rx port

드에 따른 RF 경로를 나타내고 있다.

송수신 모듈 전원/제어 조립체는 FPGA(field programmable gate array)를 이용하여 다수의 송수신 모듈을 정의된 ICD(interface control document)로 온도에 따른 위상/진폭 제어하고, 고속 송/수신 모드 교차 펄스 동작을 제어한다. 송신 칩(Tx chirp) 펄스의 고출력 증폭을 위해서는 순간적으로 큰 DC 전력 공급이 필요하다. 요구되는 DC 전력을 안정적으로 공급하기 위해서는 고용량의 DCDC 컨버터가 필요하지만, 위성체는 엄격한 무게 규격으로 관리되어 고용량의 DCDC 컨버터를 적용하기 어렵다. 때문에 순간적으로 요구되는 전력은 Cap. bank의 충/방전 동작을 통해서 공급이 가능하도록 설계되었다. 또한, 송수신 모듈은 SAR 탑재체 요구 규격에 따라 다수의 채널로 구성되어, 위성체에서 가장 큰 시간당 소모 전력을 요구한다. 위성체의 경우 엄격한 무게 제한에 따라 배터리 용량이 한정적이기 때문에 필요한 송/수신 동작 시에만 전력이 소모되도록 on/off 전원 회로의 적용이 필수적이다.

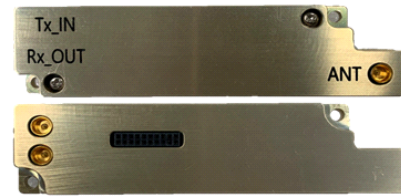
RF 경로의 변경을 위한 고속 RF switch를 포함한 송수신 모듈의 RF 부품들은 대부분 화합물 기반이기 때문에, 음전원을 필요로 하여 LDO(low drop-out) 및 SW (switching) regulator가 사용된다.

채널 분배 조립체는 송신 신호 분배기(1:N Tx power div.)와 두 개의 수직/수평 편파 수신 신호 결합기(N:1 V/H Rx Power Com.)로 구성되어 송신 신호를 다수의 채널로 분배하여 각 송수신 모듈의 송신 포트(Tx port)로

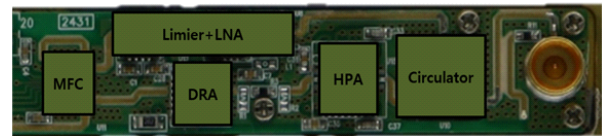
신호를 인가하고, 수신 수직/수평 편파 신호가 수신 포트(Rx port)에서 각각의 신호 결합기로 결합된다. 그림 5(a)는 제작된 송수신 모듈의 외부 사진을 나타내고 있다.

송수신 모듈은 도금된 알루미늄으로 제작되어 가로 00 mm, 세로 00 mm, 높이 00 mm를 갖고, 000 g의 무게를 갖는다. 또한, 그림 5 (b) 송수신 모듈 내부를 나타내고 있다. 송수신 모듈 하우징 내부에는 rogers등의 물질로 구성된 multi-layer PCB와 HPA, LNA, RF switch 등 다양한 RF 소자들로 구현되었다.

그림 6은 제작된 SAR 전자 프런트엔드 사진을 나타내고 있다. 제작된 SAR 전자 프런트엔드는 가로 000 mm,



(a) 외부(상단, 하단)  
(a) Outside (top, bottom)



(b) 내부  
(b) Inside

그림 5. 제작된 송수신 모듈 사진  
Fig. 5. Photograph of the manufactured TRM.



(a) 측면  
(a) Side  
(b) 상단  
(b) Top

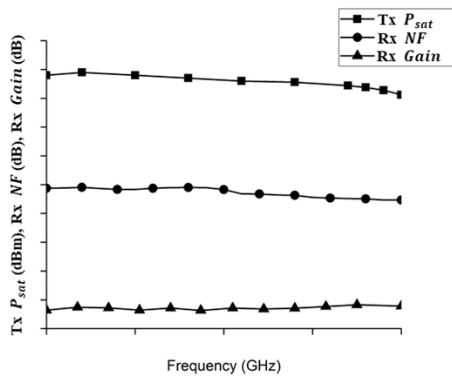
그림 6. 제작된 SAR 전자 프런트엔드 사진  
Fig. 6. Photograph of the fabricated SAR EFE.

세로 000 mm, 높이 000 mm를 가져 총 00 Kg을 갖는다.

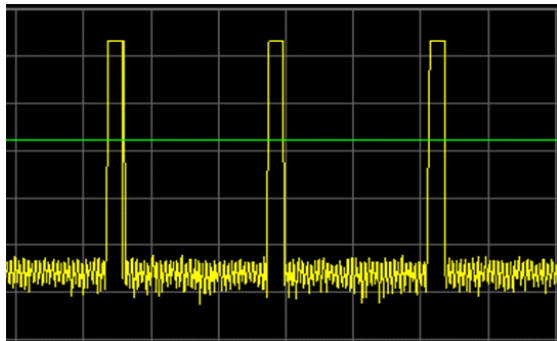
### III. X-Band SAR 전자 프런트엔드 측정

제작된 위성용 X-band SAR 전자 프런트엔드는 제어 메시지 연동, RF 경로 제어, 위상/진폭 제어 및 timing 신호 생성을 위한 EGSE(electrical ground support equipment)를 GUI(graphic user interface)로 제어하고, 네트워크분석기(Kesigt N5221B), 신호 발생기(R&S SMW200A), 신호분석기(R&S FSW26), 잡음 발생기(NW346KA), 전원공급기를 이용하여 측정하였다.

그림 7(a)는 X-band SAR 전자 프런트엔드의 송신 및 수신 모드 측정 결과를 주파수에 대해서 나타내고 있다.



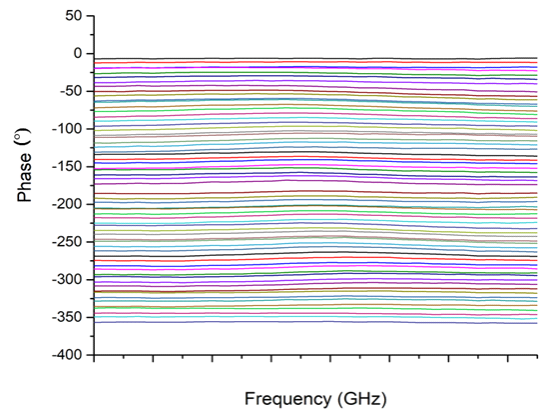
(a) 송신 출력, 수신 잡음지수, 수신 이득 측정 결과  
(a) Measurement results of Tx output power, Rx noise figure, and Rx gain



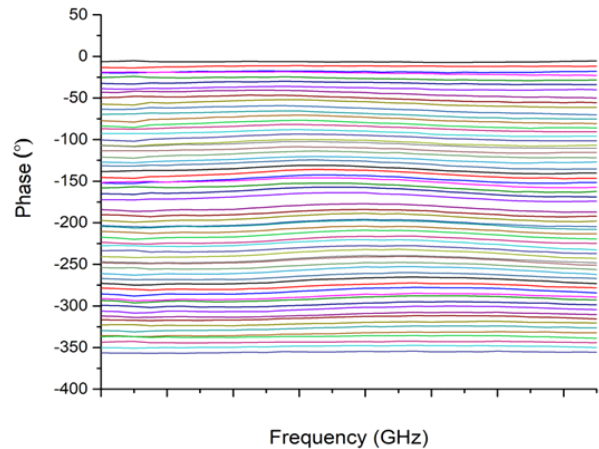
(b) 1 CH 펄스 송신 출력  
(b) 1 CH transmit output pulse

그림 7. SAR 전자 프런트엔드 송수신 모드 측정 결과  
Fig. 7. SAR EFE transmit/receive mode measurement results.

목표하는 주파수 대역에서 00 dBm 이상의 펄스 송신 출력(Tx  $P_{sat}$ , 100  $\mu$ s pulse period와 25 % Duty), 00 dB 이하 수신 잡음지수(Rx NF), 00 dB 이하 수신 이득(Rx gain)를 확보하였다. 그림 7 (b)는 신호분석기로 측정된 단일 채널 Pulse 송신 출력을 보여준다. 100  $\mu$ s pulse period와 25 % Duty를 갖는 송신 펄스는 목표하는 주파수 대역에서 00 dBm 이상의 출력을 형성하고 있다. 그림 8은 MFC를 이용하여 6-Bit에 따른 송신 및 수신 모드의 위상 가변 측정 결과를 나타내고 있다.



(a) 송신 모드 위상 가변 결과(1 채널)  
(a) Transmit mode phase variable result (1 channel)



(b) 수신 모드 위상 가변 결과(1 채널)  
(b) Receive mode phase variable result (1 channel)

그림 8. 송신/수신 모드 위상 가변 결과  
Fig. 8. Transmit/receive mode phase variable result.

#### IV. 결 론

본 논문은 위성용 X-band SAR 전자 프런트엔드(EFE) 개발에 대해 서술하고 있다. 개발된 SAR 전자 프런트엔드는 고해상도 촬영을 위한 고출력 송신 신호 증폭 및 저잡음 수신 신호 증폭이 가능하며, 위상배열 안테나의 빔조향을 위해 위상/진폭 제어와 내부 보정 기능을 갖추었다. 제작된 X-band SAR 전자 프런트엔드 측정 결과는 목표하는 주파수 대역에서 00 dBm 이상의 펄스 송신 출력(100  $\mu$ s Pulse Period와 25 % Duty), 00 dB 이상의 수신 이득, 00 dB 이하의 수신 잡음 지수를 가져 고해상도 촬영을 위한 SAR 탑재체에 적합한 성능을 확인하였다.

#### References

- [1] A. Moreira, P. Prats-Iraola, M. Younis, G. Krieger, I. Hajnsek, and K. P. Papathanassiou, "A tutorial on synthetic aperture radar," *IEEE Geoscience and Remote Sensing Magazine*, vol. 1, no. 1, pp. 6-43, Mar. 2013.
- [2] S. Kim, C. M. Song, S. H. Lee, S. C. Song, and H. U. Oh, "Design and performance of X-band SAR payload for 80 kg class flat-panel-type microsatellite based on active phased array antenna," *Aerospace*, vol. 9, no. 4, p. 213, Apr. 2022.
- [3] H. Kim, Y. K. Chang, "Optimal mission scheduling for hybrid synthetic aperture radar satellite constellation based on weighting factors," *Aerospace Science and Technology*, vol. 107, p. 106287, Dec. 2020.

이 선 우 [한화시스템/전문연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-7645-8702>



2024년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학 박사)  
2024년 3월~현재: 한화시스템 우주연구소 전문연구원  
[주 관심분야] 위성 SAR RF HW, MMIC, Transmit/Receive Module

한 신 [한화시스템/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-0550-7631>



2023년 2월: 경희대학교 전자공학과 (공학 석사)  
2023년 3월~현재: 한화시스템 우주연구소 선임연구원  
[주 관심분야] 위성 SAR RF HW, MMIC, Transmit/Receive Module

이 정 수 [한화시스템/연구원]

<https://orcid.org/0009-0007-1692-4784>



2021년 2월: 광운대학교 전자융합공학과 (공학사)  
2022년 8월~현재: 한화시스템 우주연구소 연구원  
[주 관심분야] 위성 SAR RF HW, MMIC, Transmit/Receive Module



이 창 현 [한화시스템/전문연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-6931-7925>



2019년 2월: 숭실대학교 전자공학과 (공학 박사)

2020년 3월 ~ 현재: 한화시스템 우주연구소 전문연구원

[주 관심분야] 위성 SAR RF HW, MMIC, Transmit/Receive Module

윤 성 식 [한화시스템/전문연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-5764-5403>



2018년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학박사)

2018년 3월 ~ 현재: 한화시스템 우주연구소 전문연구원/팀장

[주 관심분야] 위성 SAR 시스템, 위성 RF/안테나 HW, SAR 신호처리

한 진 영 [한화시스템/수석연구원]

<https://orcid.org/0009-0009-3544-0085>



2007년 2월: 경희대학교 전자공학과 (공학사)

2007년 2월 ~ 현재: 한화시스템 우주연구소 수석연구원

[주 관심분야] 위성 SAR Digital 제어 시스템, 위성 SAR RF HW, SAR 신호처리