

항공기용 부배열 디지털 빔 형성 능동 전자 주사 배열 레이다를 위한 고집적 다채널 송수신기 설계 및 제작

박홍우*¹, 김병일*², 조신영*³, 김홍이**⁴, 서승희*⁴, 김동환*⁵

Design and Implementation of High-Density Multichannel Transceiver for Airborne Active Electronically Scanned Array Radar with Digital Subarray Beamforming

Hongwoo Park*¹, Byeong-il Kim*², Shin Young Cho*³, Hong Yi Kim**⁴, Seunghee Seo*⁴, and Donghwan Kim*⁵

이 연구는 2026년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행되었음(912A27701)

요 약

본 논문은 항공기용 X-대역 능동 전자 주사 배열 레이다에 적용하기 위한 고집적 다채널 송수신기를 제안한다. 제안된 송수신기는 L-대역을 기저대역으로 한 직접 변조 방식을 적용하였으며 총 11개 채널의 신호 생성 및 디지털 처리가 가능하다. RF 채널은 개별 채널의 크기가 가로 7.95cm, 세로 2.35cm로 집적도가 높은 동시에 확장 가능한 구조로 설계되었으며 출력 14dBm, 수신이득 11dB, 잡음 지수는 16dB 이하로 측정되었다. 디지털 처리부는 RFSoc를 적용하여 구현에 필요한 공간을 최소화하였으며 구현된 11개의 운용채널은 60dB 이상의 격리도를 보유하며 연속파, 펄스열, 선형 주파수 변조가 가능하다. 구현된 송수신기는 모듈별 시험과 안테나 단위 시험으로 구성된 2단계 검증 절차를 통해 적절성을 확인하였다.

Abstract

This article proposes the X-band high-density multichannel transceiver which is suitable for airborne active electronically scanned array radar applications. Each RF channel occupies $7.95\text{cm} \times 2.35\text{cm}$ and achieves a measured output power of 14dBm, a receive gain of 11dB, and a noise figure below 16dB. The digital processing module is implemented using RFSoc to minimize the required space. Also, the 11 operating channels achieved an isolation greater than 60dB and are capable of generating continuous wave, pulse train and linear frequency modulated waveform. For the verification of implemented hardware, the authors propose a two-stage of test comprising module-level tests and antenna-level measurements.

Keywords

active electronically scanned array radar, subarray digital beamforming, high-density multichannel transceiver

* 국방과학연구소 연구원(*¹ 교신저자)

- ORCID¹: <https://orcid.org/0000-0002-8619-1017>

- ORCID²: <https://orcid.org/0009-0004-0152-7637>

- ORCID³: <https://orcid.org/0009-0000-2004-7306>

- ORCID⁴: <https://orcid.org/0009-0000-8116-7109>

- ORCID⁵: <https://orcid.org/0000-0002-2089-4318>

** 한화시스템 수석연구원

- ORCID: <https://orcid.org/0000-0002-6451-791X>

• Received: May 26, 2026, Revised: Jun. 17, 2026, Accepted: Jun. 20, 2026

• Corresponding Author: Hongwoo Park

Agency for Defense Development, 34186 Yuseong P.O Box 35, Daejeon, Republic of Korea

Tel.: +82-42-821-4517, Email: hwpark43@add.re.kr

1. 서 론

능동 전자 주사 배열(AESA, Active Electronically Scanned Array) 레이더는 현대 군용 플랫폼의 사격 통제에 필요한 핵심 센서로, 빔 조향의 기민성을 이용하여 다중표적에 대한 정확한 추적을 수행하고 이를 통해 사용자가 위협도에 따라 무장 발사를 할 수 있도록 지원한다[1]-[3].

AESA 레이더에 적용되어 온 안테나의 형태는 그림 1(a)의 아날로그 빔 형성 방식으로 시작하여 그림 1(b)와 같은 부배열 디지털 빔 형성과 그림 1(c)의 전(全)채널 디지털 빔 형성 순으로 진화했다[4]. 아날로그 빔 형성의 경우 빔 형성에 전자파(RF, Radio Frequency) 소자를 이용하므로 하드웨어가 결정되는 동시에 형성할 수 있는 빔의 개수도 정해지는 한계점이 있다. 이러한 한계점을 극복하고 다양한 빔을 유연하게 형성할 수 있으면 STAP(Space Time Adaptive Processing), 적응형 패턴 널 형성(Adaptive nulling)[5] 등 고급의 신호처리 기법들을 활용할 수 있으므로 부배열 단위 디지털 빔 형성 기법이 개발되었으며[4][6], 중앙처리장치(CPU, Central Processing Unit), ADC(Analog to Digital Converter), DAC(Digital to Analog Converter) 등 각종 반도체 소자의 발전으로 현재는 전채널 디지털 빔 형성 방식의 레이더도 개발 및 적용되고 있다[7]-[9].

위에서 서술한 두 가지 디지털 빔 형성 레이더는 하드웨어의 크기 제약으로 주로 함정 또는 지상용 레이더에 적용되어 오고 있으며[7]-[9], 항공기용 레이더에는 주로 아날로그 빔 형성 방식을 적용하고 있다. 그러나, 전자전 장비의 발전 및 드론의 등장 등으로 미래 전투기들은 좀 더 다양한 위협을 빠르게 식별하고 능동적으로 대처할 능력이 요구되므로[10][11] 전투기용 레이더에도 디지털 빔 형성 방식의 레이더 적용이 필요하다.

따라서, 본 논문에서는 이러한 추세에 부합하는 항공기용 레이더를 구현하기 위한 부배열 디지털 빔 형성이 가능한 고집적 다채널 송수신기의 형태, 설계 및 구현 결과를 제시한다. 제안된 다채널 송수신기는 8개의 부배열 채널, 2개의 부엽 차단 채널,

내부 보정 및 점검용 채널을 포함하여 총 11개의 채널을 직접 변환(Direct conversion)할 수 있으며 대용량의 빔 데이터를 광통신으로 레이더 처리장치에 전송할 수 있다. 또한, 구현된 송수신기는 공간을 적게 차지하여 안테나에 바로 장착할 수 있으므로 항공기용 레이더 구현에 적합하다.

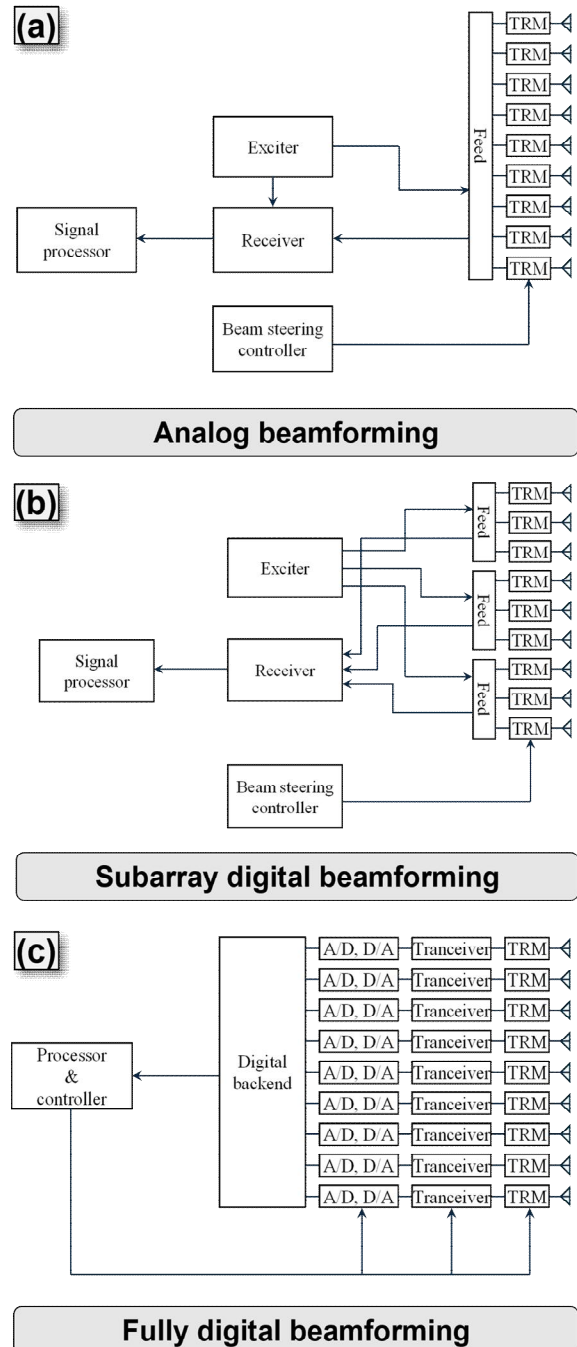


그림 1. 빔 형성 방식에 따른 AESA 레이더 구분
Fig. 1. Classification of AESA radar by beamforming method

II. 고집적 다채널 송수신기 설계 및 제작

2.1 구조 및 기계적 형상 설명

고집적 다채널 수신기의 기능 블록도는 그림 2와 같고, 분해도는 그림 3과 같다. 다채널 송수신기는 크게 L-대역의 신호를 X-대역으로 상향 변환하고 반대로 하향 변환하는 주파수 변환 모듈과 L-대역 신호를 생성하고 하향 변환된 L-대역 신호를 수신하여 디지털 변환하는 동시에 전체 송수신기 동작에 필요한 내부 구성품 제어 기능을 수행하는 송수신 제어 모듈로 구성된다.

주파수 변환 모듈은 그림 2와 같이 동일한 회로로 구성된 11개 채널을 보유한 주파수 변환 보드와 LO 신호를 11개 채널로 분배하는 LO 분배 보드로 구성된다. 주파수 변환 모듈은 RFSoc(Radio Frequency System on Chip)에서 생성된 L-대역 IF 신호와 레이다 처리장치로부터 인가된 X-대역 LO 신호를 이용하여 주파수 상향 변환과 하향 변환을 수행하는 역할을 한다. 11채널 중 8채널은 안테나의 부배열 구조를 위한 것이고, 2채널은 부엽 차단(Side Lobe Blanking, SLB) 채널용, 나머지 1채널은 안테나 장치의 채널 점검/보정을 위해 사용된다. 주파수 변환 보드는 내부적으로 주파수 혼합기를 기점으로

X-대역 신호의 송/수신을 위한 RF 보드와 L-대역 신호의 송/수신을 위한 IF 보드로 분리되어 있으며 두 개 보드는 공간 절약 및 정비성을 위해 납땜이 필요 없는 board-to-board 커넥터로 연결하였다.

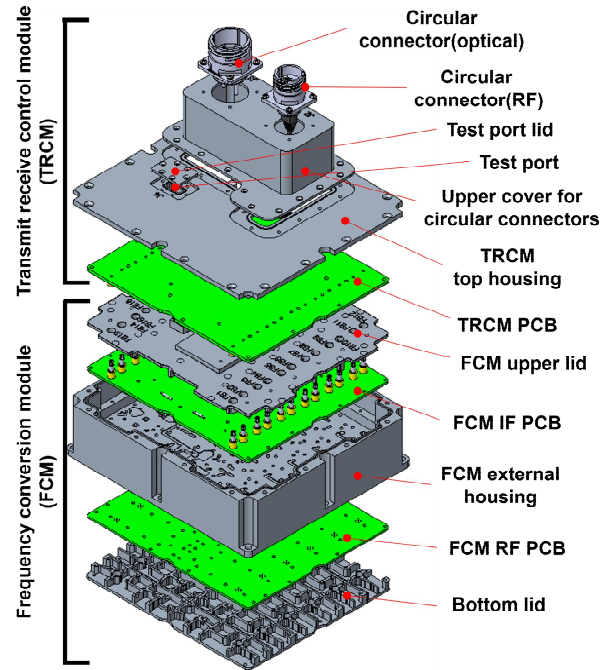


그림 3. 고집적 다채널 송수신기 분해도
Fig. 3. Exploded view of high-density multichannel transceiver

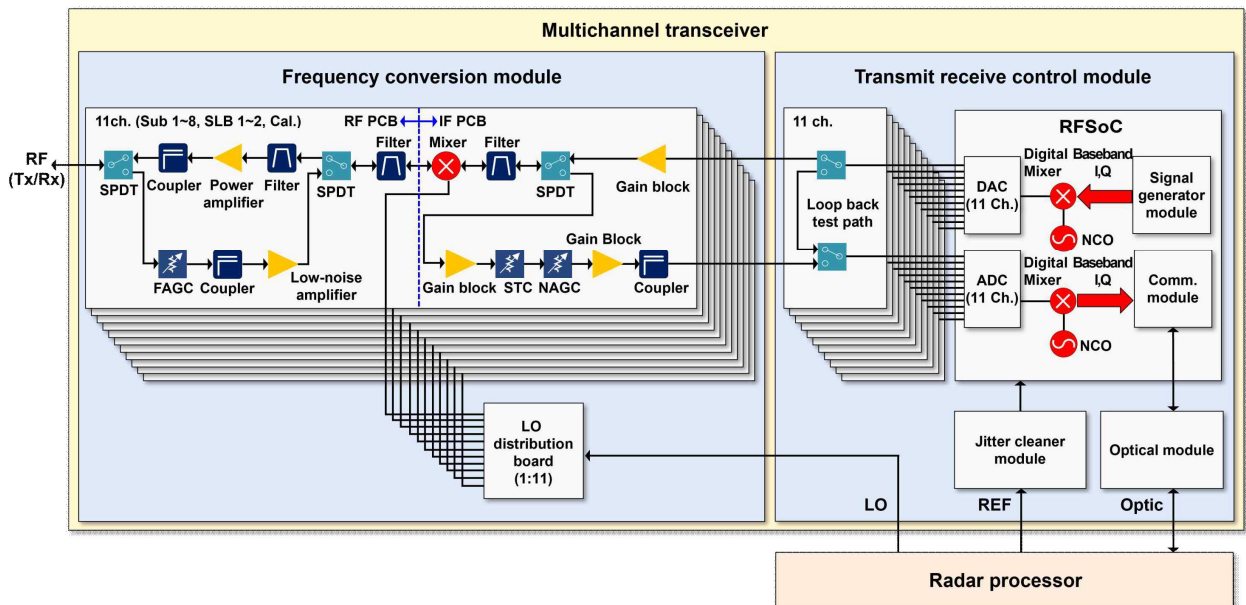


그림 2. 고집적 다채널 송수신기 기능 블록도
Fig. 2. Functional block diagram of high-density multichannel transceiver

상면 덮개와 하면 덮개에는 채널별로 격벽이 설치되어 있어 내부채널 간 신호 간섭을 막는 역할을 하며 외부 하우징은 IF PCB와 RF PCB 간 신호 간섭을 막는 역할을 한다.

RF PCB는 경로 절체를 위한 SPDT(Single-Pole Dual-Through) 스위치가 송/수신 동작에 따라 경로 전환을 수행하고, 여파기를 통해 IF PCB에서 생성된 이미지 신호를 억압한 후 전력증폭기를 통해 신호를 증폭하여 인터페이스로 송신신호를 전달하며 커플러 및 RF 신호 감지기를 통해 X-대역 신호 출력의 정상 여부를 판단할 수 있다. 수신경로는 수신기 포화를 막기 위한 FAGC(Front Automatic Gain Control) 용도의 가변감쇠기, 채널 정상 여부를 판단하기 위한 커플러와 수신된 X-대역 신호의 저잡음 증폭을 위한 저잡음 증폭기(Low-Noise Amplifier, LNA)를 보유한다.

IF PCB는 신호의 상/하향 변환을 위한 주파수 혼합기를 내장하고 있으며 주파수 혼합기 후단에 고조파 억제 여파기와 경로 전환용 SPDT 스위치가 연결되어 있다. 송신경로에는 L-대역 IF 신호를 증폭하기 위한 이득 블록(Gain block) 증폭기를 보유하며 수신경로에는 주파수 혼합기를 통과한 신호를 알맞게 증폭하기 위한 이득 블록, 근접 표적으로 인한 고전력 수신신호로부터 수신기를 보호하거나 지형 등의 클러터 신호의 크기를 거리 게이트별로 균일하게 수신하기 위해 이용하는 STC(Sensitivity Time Control)용 가변감쇠기, 부배열 별 잡음 준위를 같게 유지하여 ADC 잡음손실을 통일하는 잡음보정 [12][13]을 수행하기 위한 NAGC(Noise Automatic Gain Control)용도의 가변감쇠기, IF 신호 정상 여부를 판단하기 위한 커플러 및 감지기를 보유한다.

송수신 제어 모듈은 레이더 처리장치로부터 동기 및 IF 신호 발생을 위한 동기 클록 신호를 RF 서클러 커넥터를 통해 공급받으며 내장된 지터 클리너(Jitter cleaner) 모듈을 통해 내부의 RFSoc에 전달하며 내부의 수치 발진기(NCO, Numerically Controlled Oscillator)와 DAC 동작에 사용한다. RFSoc 내부에는 11개 이상의 DAC 및 ADC 채널을 보유하고 있으며 내부 펌웨어는 송신 기저대역 신호를 생성하거나 수신된 기저대역 신호를 RFSoc 내부의 통신 모듈에 전달한다. 통신모듈에 전달된 기저대역 신호

는 PCB에 설치된 광전변환 모듈과 광 서클러 커넥터를 통해 레이더 처리장치로 전송되며 이 경로를 통해 레이더 처리장치의 명령 및 각종 동기신호도 수신받을 수 있다. RFSoc 출력단에는 SPDT 스위치 2개를 이용해 루프백(Loop-back) 시험용 점검경로를 구성하여 송수신 제어 모듈 내부의 DAC 및 ADC를 점검할 수 있다.

각 모듈은 외부로부터 직류 전원을 공급받으며 스위칭 주파수로 인한 불요파 발생 방지를 위해 선형 레귤레이터를 이용해 각 부품에 필요한 전압으로 변환하여 공급한다.

2.2 주파수 변환 모듈 설계 및 제작

2.2.1 RF 블록도 및 버짓 설계

주파수 변환 모듈의 송/수신 RF 회로 블록도와 버짓 설계 결과는 그림 4와 같다. 그림 2에는 기능 위주의 블록만 나열하였으나 그림 4에는 실제로 적용한 모든 부품을 나열하였으므로 차이가 있다. 그림 4의 수신 버짓 설계에서 적색 그래프는 누적 잡음 지수를 나타내며, 청색 그래프는 누적 이득을 나타낸다. 누적 이득 및 누적 잡음 지수 그래프를 통해 각 소자가 전체 버짓 설계에서 차지하는 영향을 알 수 있으며 본 논문에서 제안한 송수신기와 같이 다수의 소자들이 경로에 배치되었을 때는 표로 나타내는 것보다는 그림 4와 같이 누적 그래프로 나타내는 것이 설계 내용 파악에 유리한 측면이 있다. 누적 이득의 경우 해당 소자까지의 이득을 합하여 계산한 값을 나타내며, 누적 잡음 지수의 경우 수식 (1)의 Friis의 잡음 지수 공식[14]을 이용해 해당 소자까지의 누적 잡음 지수를 계산한 값을 나타낸 것이다.

$$F_{cascaded} = F_1 + \frac{F_2 - 1}{G_1} + \frac{F_3 - 1}{G_1 G_2} + \dots \quad (1)$$

식 (1)에서 $F_{cascaded}$ 는 누적 잡음 지수, $F_1 \sim F_3$ 는 각각 맨 앞단부터 3번째 소자까지의 잡음 지수, $G_1 \sim G_2$ 는 각각 맨 앞단부터 2번째 소자까지의 이득을 나타낸다.

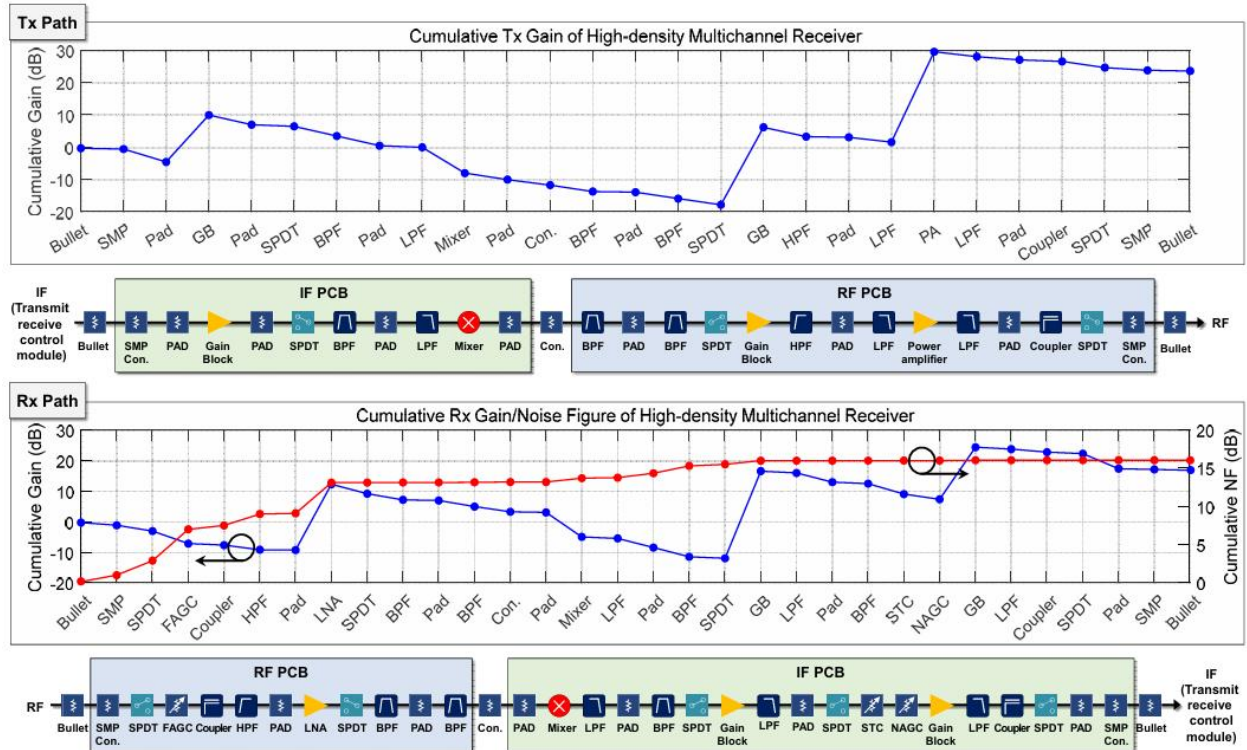


그림 4. 주파수변환모듈 RF 버짓 설계 결과

Fig. 4. RF budget analysis result of frequency conversion module

송신경로는 송수신 제어 모듈로부터 -10dBm의 신호를 인가받아 14dBm 이상의 출력을 낼 수 있으며 고조파는 45dBc 이상, 대역 내 불요파는 65dBc 이상, 대역 외 불요파는 55dBc 이상이 되도록 설계하였다. 불요파 요구 조건은 항공기에 설치될 다른 장비들과의 동작을 고려한 것으로, 향후 시스템 단계의 설계 과정에서 일부 변경될 수 있다.

높은 불요파 및 고조파 요구 조건을 충족하기 위해 IF/RF 보드의 증폭기 앞단에는 고역 통과 여파기(HPF, High-Pass Filter)와 저역 통과 여파기(LPF, Low-Pass Filter)를 적용하였고, 여파기와 다른 RF 소자 간의 임피던스 정합을 좋은 특성으로 유지하고 발진을 막기 위해 삽입손실 1~3dB의 저항성 패드를 적용하였다.

수신경로는 이득 11dB 이상, 잡음 지수 18dB 이하, 이미지 및 국부 신호 억압은 55dBc 이상, 대역 내·외 불요파는 각각 65dBc, 55dBc 이상이 되도록 설계하였다. 송수신기 외부 전단의 RF 소자들은 저잡음 증폭 및 위상 천이, 진폭 변조를 담당하는 송수신모듈과 송수신모듈의 신호를 결합하는 전력 결

합기를 포함하고 있으며 송수신모듈의 잡음 지수가 AESA 안테나의 수신이득 대 잡음온도 비(G/T, Gain over noise Temperature)를 상당 부분 결정하지만, 레이다 시스템의 탐지성능을 최대한 높이기 위해 가급적 수신채널의 잡음 지수를 낮게 설정할 필요가 있으며 탐지거리 요구 조건과 송수신모듈의 성능을 고려하여 잡음 지수를 결정하였다.

높은 불요파 및 이미지 신호 억압 요구 조건을 만족하기 위해 송신경로와 마찬가지로 증폭기 출력단에는 여파기가 배치되어 있으며 믹서 입력단에는 높은 대역 외 불요파 특성을 만족하고 공간을 절약하기 위해 고유전율의 세라믹 위에 마이크로스트립 형태로 실장된 대역 통과 여파기(Band-Pass Filter, BPF) 2개를 사용하였고, 주파수 혼합기 출력단에는 LPF와 30dB 이상의 높은 억압 특성을 보이는 칩 형태의 SAW(Surface Acoustic Wave) 필터를 배치하였다. 추가로, 송신 동작 시 역방향 전력 인가를 막기 위해 IF PCB의 증폭기 후단에는 SPDT가 적용되어 있으며 송수신기의 송신 동작 시에는 경로를 50 Ω 부하로 전환한다.

2.2.2 제작 및 시험 결과

2.2.1장의 설계를 적용하여 RF-IF PCB를 각각 제작하였으며 형상은 그림 5~6과 같다. 그림에서 SUB 1~8은 각각 부배열 번호를 나타내며 송수신기는 총 8채널의 부배열 동작을 지원한다. 구현된 1채널의 크기는 가로 7.95cm, 세로 2.35cm이며, 하우징을 포함한 크기는 가로 18.24cm, 세로 16.24cm이다. 그림에서 볼 수 있듯 모든 채널이 상당히 가깝게 위치하므로 각 내부채널의 격리도를 높이기 위해 RF 회로 이외의 부분에는 채워진 비아(Filled via)를 가능한 한 많이 적용하였으며, 주파수 변환 모듈의 상면 및 하면 덮개에는 격벽이 적용되어 있다.

RF-IF PCB 제작 후에는 외부 하우징을 최종 결합하여 그림 7과 같은 구성으로 성능을 측정하였다. 회로망 분석기를 이용하여 각 RF-IF 단자의 정재파비를 측정하며 신호발생기 및 신호 분석기를 이용해 잡음 지수, 이득 및 불요파 준위를 측정하였다. 주파수 변환 모듈의 제어는 원래 송수신 제어 모듈이 담당하지만, 단품 단계의 시험에서는 노트북을 이용하여 모사하였고 제어 신호의 정상 여부를 확인하기 위해 오실로스코프를 활용하였다.

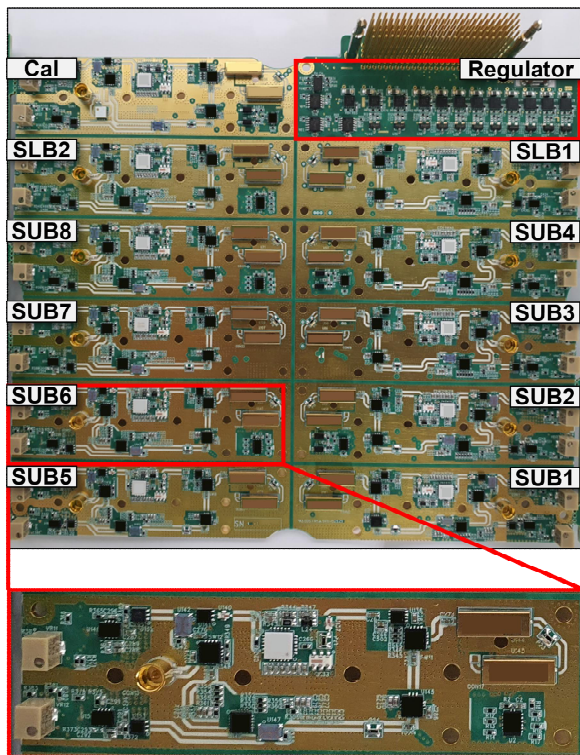


그림 5. 제작된 RF PCB
Fig. 5. Fabricated RF PCB

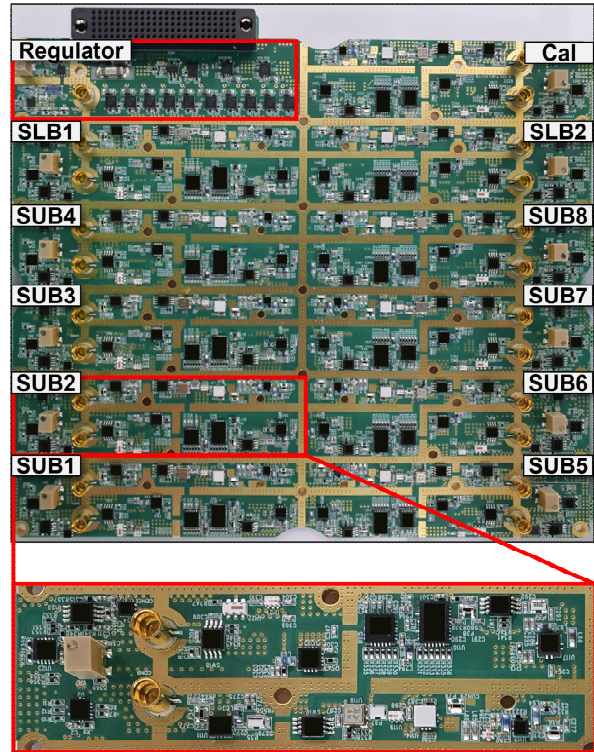


그림 6. 제작된 IF PCB
Fig. 6. Fabricated IF PCB

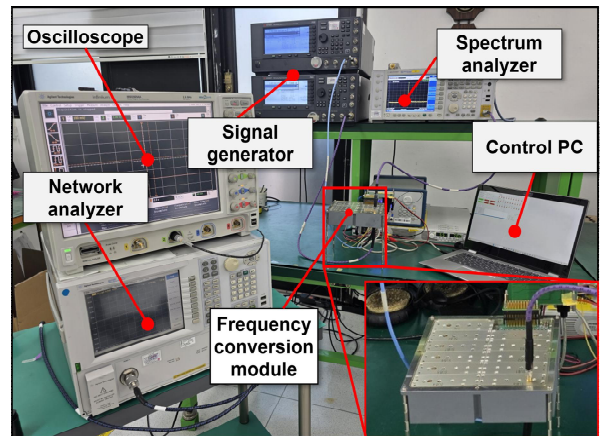


그림 7. 주파수 변환 모듈 시험 설정
Fig. 7. Frequency conversion module test setup

그림 7의 설정을 이용한 시험 결과는 그림 8 및 표 1과 같고, 그림 8에는 일부 성능의 측정 결과 화면을 제시하였다. 그림 8(a)의 송신 출력은 다수의 저항성 패드가 적용되었고 좁은 공간에 구현한 모듈의 특성상 마이크로스트립의 불연속점이 많아 버짓 설계 대비 약간 낮은 수준을 보이는 채널도 있었으나 대체로 규격을 상회하는 수준으로 측정되었다. 필터를 다수 적용한 효과로 송·수신 대역 내·외

불요파 성능은 양호하게 측정되었으며, 주파수 혼합기의 특성으로 인해 그림 8(b)와 같이 반송주파수와 가까운 영역에서 불요파가 일부 발생하는 것을 볼 수 있으나 규격을 만족하며 레이다 시스템 동작에는 큰 영향이 없을 것으로 판단된다.

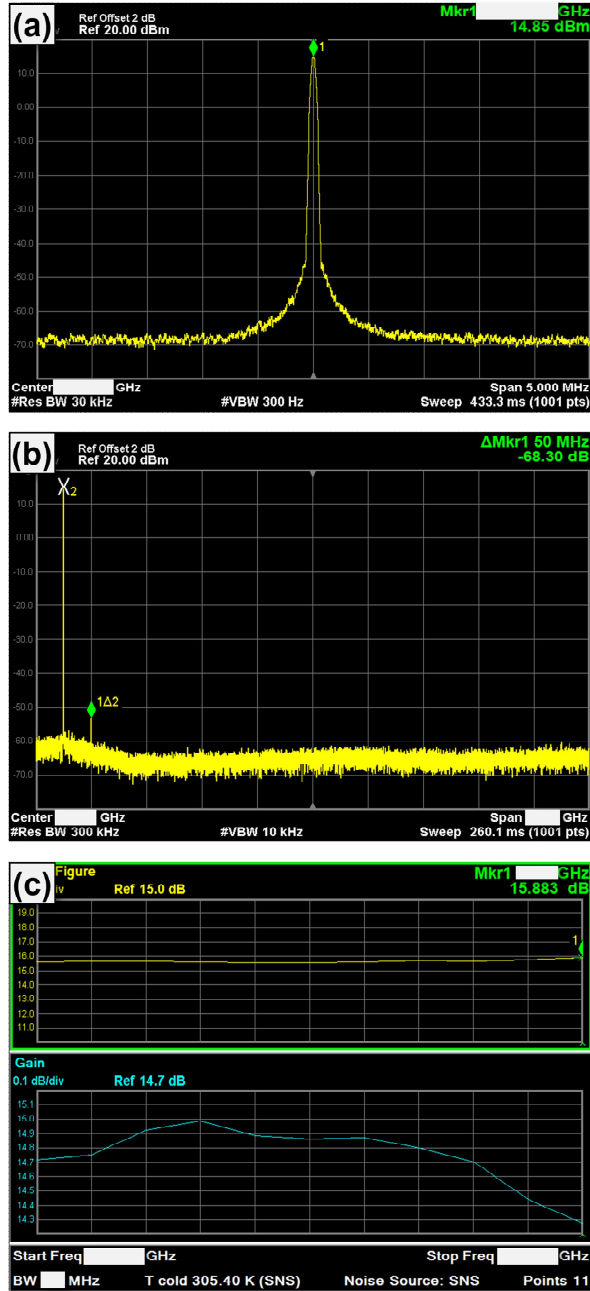


그림 8. 주파수 변환 모듈 시험 결과

(a) 송신출력 (b) 송신 대역 내 불요파 (c) 수신 잡음 지수(위) 및 이득(아래)

Fig. 8. Test result of frequency conversion module

(a) Transmit power (b) Tx in-band spurious (c) Rx noise figure(top) and gain(bottom)

주파수별 잡음 지수와 이득 측정 결과는 그림 8(c)와 같으며 잡음 지수 측정 결과는 저항성 패드 및 마이크로스트립 전송선로 등의 손실이 버짓 설계 입력값보다 조금 높은 영향으로 설계 대비 최고 1dB의 편차를 보인다. 이득은 그림 8(c)에 보이는 채널은 설계와 매우 유사하나 일부 채널은 LNA 이득 차이 및 여러 소자들의 오차 성분이 누적된 결과로 최고 5dB의 편차를 보인다. 이러한 편차는 안테나 통합 단계에서 송수신기를 포함한 보정작업이 수행되며[15] 레이다 운용 단계에서는 잡음보정이 수행되므로[12][13] 큰 영향은 없을 것으로 보인다.

표 1. 주파수 변환 모듈 시험 결과 요약

Table 1. Summarized test result of frequency conversion module

Path	Test item	Requirement	Measured value	Test result
Tx	Tx power	$\geq 14\text{dBm}$	14~16dBm	Pass
	Harmonic level	$\geq 45\text{dBc}$	48~60dBc	Pass
	In-band spurious	$\geq 65\text{dBc}$	70~80dBc	Pass
	Out-band spurious	$\geq 55\text{dBc}$	68~78dBc	Pass
Rx	Gain	$\geq 11\text{dB}$	14~19dB	Pass
	Noise figure	$\leq 18\text{dB}$	15~16dB	Pass
	Image rejection	$\geq 55\text{dBc}$	77~94dBc	Pass
	In-band spurious	$\geq 65\text{dBc}$	67~80dBc	Pass
	Out-band spurious	$\geq 55\text{dBc}$	55~71dBc	Pass

2.3 송수신 제어 모듈 설계 및 제작

송수신 제어 모듈은 주파수 변환 모듈에 입력될 송신 신호를 생성하고, 반대로 수신된 신호를 디지털 처리하여 레이다 처리장치로 전송하는 동시에 주파수 변환 모듈 및 기타 외부 조립체를 제어하는 역할을 하며 기능 블록도는 그림 9와 같다.

송수신 제어 모듈은 크게 고성능 RFSoc 및 이를 지원하는 주변 회로로 구성된다. RFSoc의 운용을 위해서는 부팅 단계에서 펌웨어를 불러와야 하며 외부 메모리를 이용한다.

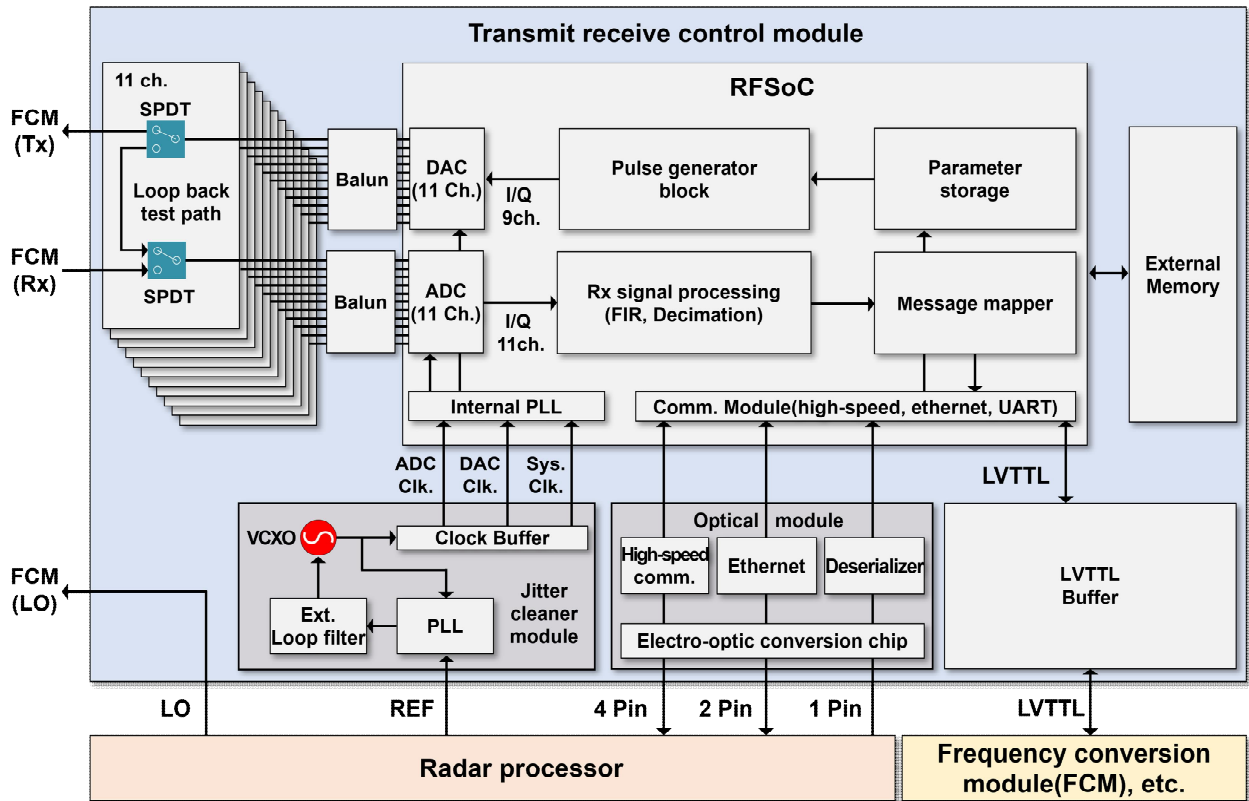


그림 9. 송수신 제어 모듈 기능 블록도

Fig 9. Transmit-receive control module block diagram

주파수 변환 모듈이 연동되는 RF 포트에는 밸런 (Balun)이 적용되어 단일 종단(Single-ended) 신호인 마이크로스트립 신호를 차동 신호(Differential signal)로 변경하여 ADC 또는 DAC와 연결하며, 밸런 전단에는 SPDT 2개 스위치를 이용해 루프백 시험용 점검경로를 구성하여 신호 송·수신 기능을 점검할 수 있다.

ADC 및 DAC 동작을 위해서는 레이더 처리장치로부터 동기신호를 입력받으며 지터 클리너 모듈을 통해 위상잡음이 최소화된 신호를 입력한다. 지터 클리너 모듈 내부에는 위상잡음 -80dBc/Hz 이하의 고성능 VCXO(Voltage Controlled Crystal Oscillator)가 내장되어 있으며 VCXO를 제어하는 PLL(Phase Locked Loop)에 동기신호를 사용한다. PLL에 사용되는 루프 필터는 수동 집중 소자를 이용하여, 필요 시 해당 소자의 값을 일부 교체하여 PLL 응답 특성을 수정할 수 있다.

DAC의 제어를 위해서는 RFSoc의 내부 신호 발생 블록이 사용되며 펄스 반복 주파수, LFM 대역폭 등 신호 발생 블록의 제어는 파라미터 저장 블

록에 저장된 값을 이용한다. ADC로부터 제공받은 11채널의 I/Q 원시 신호는 RFSoc 내부의 신호처리 블록 내부의 FIR(Finite Impulse Response) 필터 및 데시메이션(Decimation) 처리를 거쳐 메시지 생성기에 전달되며 메시지 생성기는 I/Q 신호를 펄스 반복 주기 및 제어 단위를 고려해 적정 길이로 나누어 통신 모듈에 전달한다. 통신 모듈은 I/Q 데이터 이외에도 레이더 처리장치와 이더넷으로 상태정보 및 제어 데이터를 주고받으며 deserializer를 통해서 제어 데이터 적용 시점을 정의하는 동기신호를 전달받는다. 수신된 레이더 처리장치의 제어 데이터는 파라미터 저장 블록에 저장되며 신호 발생 블록과 신호처리 블록에 사용된다. 상기 언급된 신호들은 광전변환 모듈을 통해 광통신으로 연동되며 모듈 내부에는 광전변환 칩과 각 프로토콜에 맞는 통신 칩을 내장하고 있다.

송수신 제어 모듈은 주파수 변환 모듈 이외에도 능동위상배열안테나의 다른 조립체를 제어하는 역할도 수행하며 UART(Universal Asynchronous Receiver Transmitter) 통신으로 각 조립체를 제어한다.

상기 설계 내용을 반영하여 송수신 제어 모듈의 PCB를 제작하였으며 형상은 그림 10과 같다. RF·전원·제어신호의 분리를 위해 22층 이상의 다층 PCB가 적용되었으며 스위칭 레귤레이터 등으로 인한 잡음신호의 유입을 막기 위해 각 신호 층은 접지로 분리하였다. 광대역 동작을 보장하고 안테나의 주파수별 빔 편이 또는 왜곡을 최소화하기 위해 RFSoc의 DAC/ADC에서 각 IF 포트에 연결되는 전송선로는 위상 지연을 최소화할 수 있게 제작하였다.



그림 10. 제작된 송수신 제어 모듈
Fig. 10. Fabricated transmit-receive control module

PCB 제작 후에는 외부 하우징을 결합하여 그림 11과 같은 구성으로 기능·성능을 측정하였다. 송수신 제어 모듈 동작에 필요한 전원과 동기신호는 각각 시험용 직류전원공급기와 상용 신호발생기를 이용해 공급하였다. 처리장치 모사기는 송수신 제어 모듈과 광신호 연동을 수행하는 동시에 제어 명령을 전송한다. 인터페이스 점검 보드는 송수신 제어 모듈에 연결되어 각종 조립체 제어신호를 점검하는 용도로 사용된다. 디버그 보드는 송수신 제어 모듈의 상태 데이터를 확인하는 용도로 사용하였으며 오실로스코프와 신호 분석기는 출력되는 제어 및 RF 신호를 확인하기 위한 용도로 사용하였다. 이때 오실로스코프는 L-대역의 출력을 시간 영역에서 확인해야 하므로 샘플링 주파수가 충분한 제품을 사용하였다. RF 분배기는 수신채널 간 위상차를 확인할 때 신호발생기로 IF 대역 신호를 생성하여 두 채널에 같은 신호를 인가하기 위해 사용하였다.

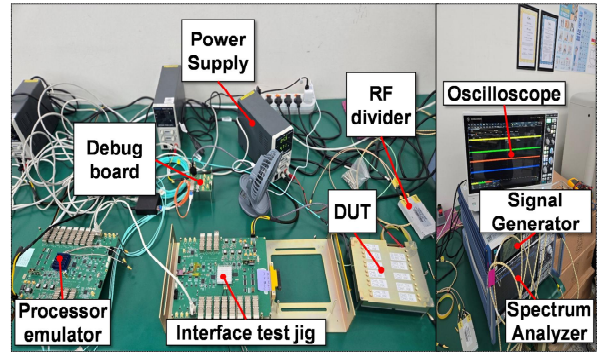


그림 11. 송수신 제어 모듈 시험 설정
Fig. 11. Transmit-receive control module test setup

그림 11의 설정을 이용하여 송수신 제어 모듈을 시험한 결과는 그림 12와 같다. 그림 12(a)는 부배열 1번과 4번의 L-대역 연속파 출력과 출력을 오실로스코프로 확인한 결과로, 청색 그래프는 각 채널의 출력을 의미하며, 겹쳐 그려진 주황색 그래프는 비교군인 보정 채널의 출력을 의미한다. 그림 및 적색 상자에 표시된 내용과 같이 위상차가 2° 이내로 PCB 내부 전송선로 간 위상차가 매우 작으며 진폭 편차 또한 1dB 이내로 매우 작음을 알 수 있다. 측정된 결과를 통해 전송선로의 제작 상태가 양호함을 알 수 있다.

그림 12(b)는 수신채널 간 신호 간섭을 확인하기 위하여 부배열 8번(SUB8) 채널에 0dBm의 L-대역 신호를 외부 신호발생기로 입력한 뒤 모든 채널을 샘플링한 I/Q 결과를 고속 푸리에 변환한 결과를 나타낸다. 인접 채널인 SUB7과 SLB2를 포함하더라도 -60dB 이상의 양호한 격리도를 확보한 것을 알 수 있으며, 제작된 전송선로 간 간섭이 최소화되었음을 알 수 있다. 또한 SUB8 신호 수신 레벨을 통해 내부 전송선로의 경로 손실이 6.4dB임을 알 수 있으며, PCB가 유전손실이 높은 재질로 제작되었고 채널 간 위상 오차를 줄이기 위해 길고 복잡한 경로를 설계한 점을 고려하면 양호한 수준인 것으로 판단된다.

그림 12(c)는 펄스폭 16us, 펄스 반복 주기 80us, 대역폭 12MHz의 L-대역 선형 주파수 변조(Linear Frequency Modulation, LFM) 파형을 생성한 뒤 루프백 동작시켜 확인한 결과를 나타내며, 이를 통해 파형이 제어한 대로 잘 생성되었음을 알 수 있다.

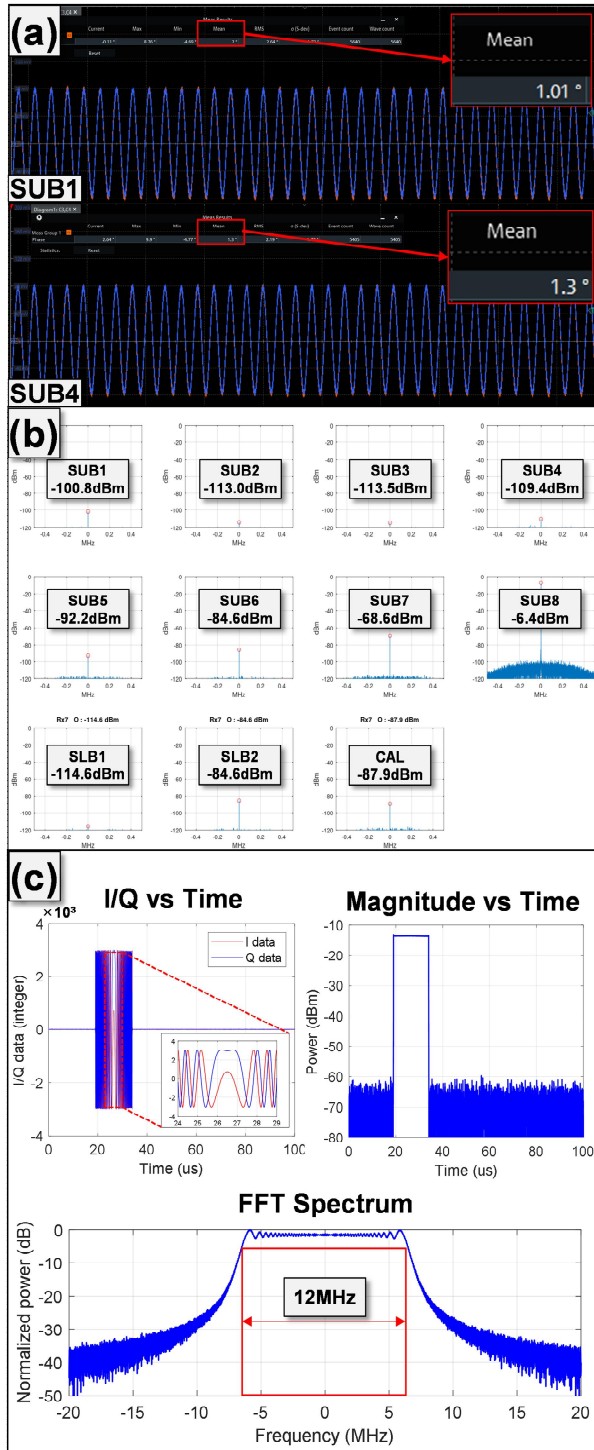


그림 12. 송수신 제어 모듈 시험 결과

- (a) 송신 위상 차이 측정결과(부배열 1, 2) (b) 수신 신호 간섭 측정결과(신호 주입: 채널 8) (c) 선형 주파수 변조 파형 생성 결과

Fig. 12. Test result of transmit-receive control module
(a) Transmit phase difference measurement result(subarray 1 and 2) (b) Receive channel interference measurement result(signal injection : subarray 8) (c) Generated linear frequency modulated waveform

III. 안테나 적용시험 결과

각 모듈을 시험한 뒤에는 송수신기를 최종 결합하여 AESA 안테나에 적용한 뒤 방사패턴을 측정하여 빔 데이터의 형성이 정상적으로 수행되는지를 점검하였다. 시험 구성 및 AESA 안테나에 부착된 송수신기 형상은 그림 13과 같으며, 그림 13(b)에 적용된 고집적 다채널 송수신기를 표시하였다.

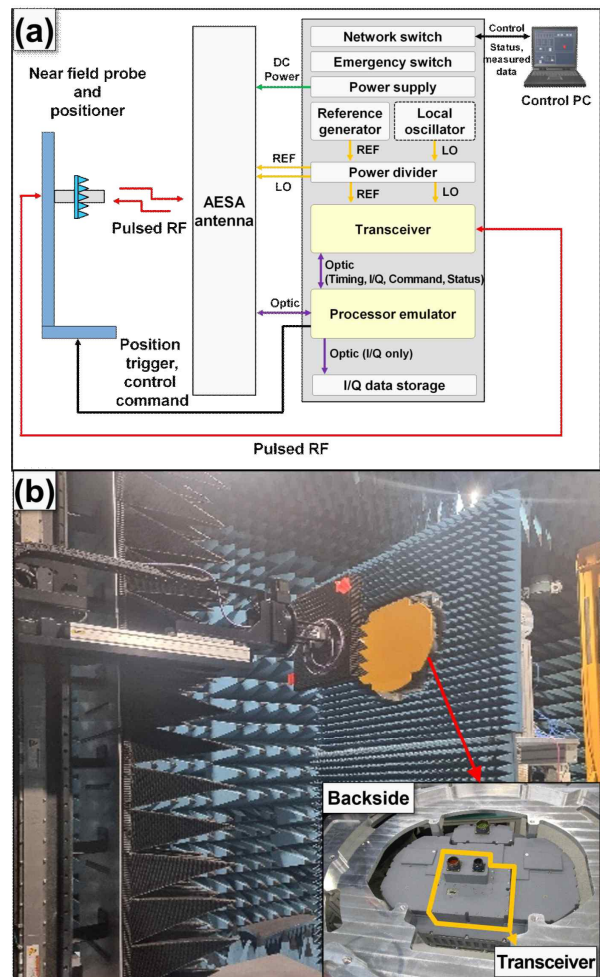


그림 13. AESA 안테나 통합시험

- (a) 시험 구성 (b) 시험 장면

Fig. 13. AESA antenna-level integration test
(a) Test setup (b) Actual test scenario

그림 13(a)의 시험 구성에서 각 장비의 설명은 아래와 같다.

- 네트워크 스위치 : 랙 내부의 구성품을 이더넷으로 연결한다.
- 비상 정지 스위치 : 비상 상황에서 모든 장비

를 정지할 수 있도록 설계되었으며, 각 장비에 인가되는 전원을 차단할 수 있다.

- 전원공급기 : 안테나 및 랙 내부 구성품에 필요한 각종 전원을 공급한다.

기준신호 발생기 : AESA 안테나 RF 송/수신에 필요한 국부신호를 제공한다.

- 송수신기 : 근접전계 측정 또는 방사 신호 분석을 위해 안테나에 신호를 주입하거나 안테나로부터 방사된 신호를 수집하여 샘플링한다.
- 통제기 모사장치 : 안테나에 연결되는 레이더 처리장치를 모사하며, 안테나를 제어하고 상태 정보를 수집할 수 있으며 안테나와 송수신기로부터 전달된 I/Q 신호를 I/Q 데이터 저장기에 광통신으로 전달한다.

그림 13의 구성을 활용한 근접 전계 시험 결과 그림 14와 같이 송신, 수신 방사패턴 모두 배열 인자(array factor) 시뮬레이션 수행 결과와 비슷한 수준의 측정 결과를 얻을 수 있었다. 또한, 빔 조향 명령에 따라 송수신기가 AESA 안테나 전체를 정확하게 제어하여 원하는 방향으로 빔이 움직임을 알 수 있다. 단일 소자의 이득이 시뮬레이션과 차이가 있으므로 측정된 주빔의 이득이 방위각 $\pm 45^\circ$ 로 조향했을 때 미세하게 높은 것을 알 수 있으며 부엽 준위가 시뮬레이션과 다른 부분은 송수신모듈 오차, 단위 안테나 간의 상호 간섭(Mutual coupling), 미세한 부배열 간 오차 등 단순한 배열 인자 시뮬레이션에 포함할 수 없는 여러 가지 오차들이 합산된 결과[15][16]로 판단된다.

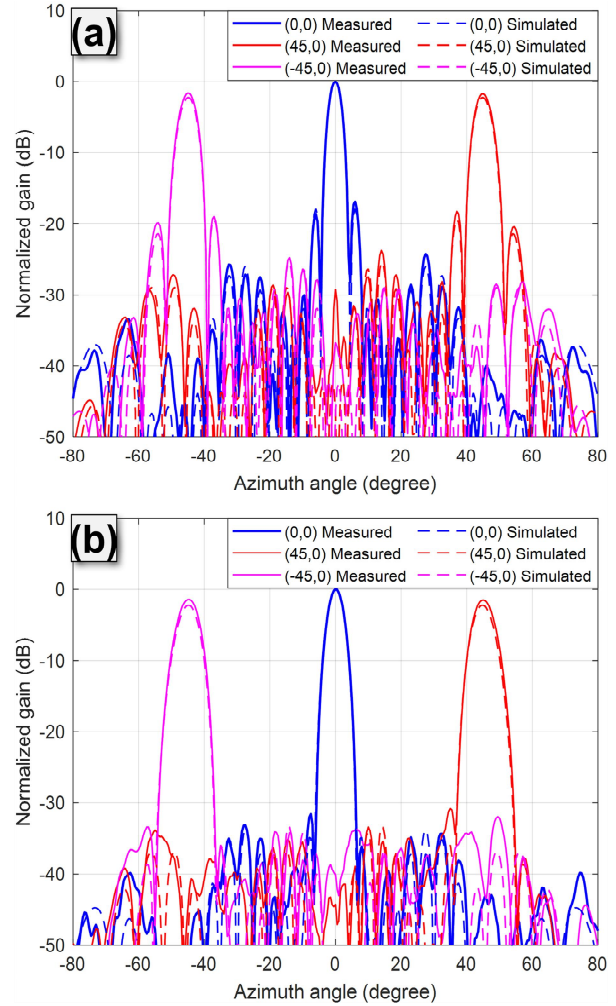


그림 14. AESA 안테나 방사패턴 측정결과

(a) 방위각 송신패턴 (b) 방위각 수신패턴

Fig. 14. Measured radiation pattern of AESA antenna
(a) Azimuth-cut pattern of Tx beam (b) Azimuth-cut pattern of Rx beam

표 2. 다채널 송수신기 비교 요약

Table 2. Summarized comparison result of multi-channel transceivers

Ref.	Frequency	Number of subarrays	Configuration	Receiver architecture	Target application
[6]	X-band	12	Requires dedicated LRUs (Exciter/Receiver, Processor)	Superheterodyne	Airborne
[10]	X-band	8	Requires dedicated LRUs (Control computer, Rx, Exciter)	Superheterodyne	Airborne
[16]	S-band	16	4 sub-assemblies(integrated in antenna) and one LRU(2 processing boards)	Superheterodyne	Shipborne, ground
This work	X-band	8	Single sub-assembly (integrated in antenna)	Direct conversion	Airborne

위에 서술된 분석을 통해 제안된 송수신기 구조로 신호 생성, 송수신모듈 정렬, 빔 형성이 잘 수행됨을 알 수 있고 제안된 송수신기가 안테나에 잘 통합되어 정상 동작함을 알 수 있다.

IV. 타 개발 사례와의 비교

제안된 송수신기의 우수성을 확인하기 위하여 기존에 개발된 부배열 단위 디지털 빔 형성 사례와 비교 분석을 수행하였으며 결과는 표 2에 요약 정리하였다. 표에서 LRU는 일선 교체 품목(Line Replaceable Unit)의 약자를 의미한다.

군사 목적의 레이더 특성상 논문에 장비의 크기, 무게 등 세부 제원과 측정된 성능 지표가 제시되는 경우가 없으므로 정량적 비교 분석은 어렵지만, 장비 구성을 분석하면 집적도 측면의 분석은 가능하다. 표 2에서 알 수 있듯 기존에 개발된 사례 [6][10][16]과는 다르게 제안된 송수신기는 기존 사례들의 LRU들을 하나의 하부 조립체로 구성할 수 있고 조립체가 안테나에 통합되는 것으로 보아 집적도 측면에서 상당한 발전을 이룬 것으로 판단되며, RFSoc의 적용을 통해 기존의 복잡한 슈퍼헤테로다인 방식에서 직접 변조 방식으로 전환된 점도 집적화에 일정부분 기여한 것을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 항공기용 부배열 디지털 빔 형성 AESA 안테나에 적용하기 위한 고집적 다채널 송수신기의 설계 및 시험 결과를 제시하였다. 제안된 송수신기는 좁은 공간 내 11개의 RF 채널이 집적되어 있으며, 고성능 RFSoc를 채택하여 1개의 국부신호만 사용하는 직접 변환이 가능하므로 기존에 개발된 송수신기와 비교하였을 때 크기를 상당히 줄일 수 있었다.

제작된 송수신기는 모듈별 시험 및 안테나 통합 시험으로 구성된 2단계의 검증을 통해 구현의 적절성을 확인하였다. 모듈별 시험을 통해 주파수 변환 모듈과 송수신 제어 모듈의 기본적인 기능·성능을 검증하였고, 시험 결과 주파수 변환 모듈은 버짓 설계 결과와 유사한 특성을 보였으며 송수신 제어 모

듈은 각 채널이 적절하게 격리되었으며 의도한 대로 파형이 생성됨을 확인하였다.

제안된 송수신기는 전투기, 무인기, 회전익기 등 향후 부배열 단위 디지털 빔 형성이 필요한 레이더들에 광범위하게 적용이 가능할 것으로 판단된다.

References

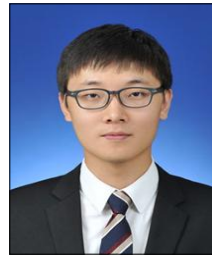
- [1] M. Barclay, U. Pietzschmann, G. Gonzalez, and P. Tellini, "AESA upgrade option for eurofighter captor radar", IEEE Aerosp. Electron. Syst. Mag., Vol. 25, No. 6, pp. 15-20, Jun. 2010. <https://doi.org/10.1109/MAES.2010.5525315>.
- [2] H. Park, "Gain over temperature calculation and measurement for airborne AESA antenna", Journal of KIEES, Vol. 32, No. 2, pp. 154-162, Feb. 2021. <https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2021.32.2.154>.
- [3] B. Xiao, R. Wang, J. Xiang, Y. Yang, and Y. Deng, "The development review of airborne fire control radar technology", Proc. China Autom. Congr. (CAC), Chongqing, China, pp. 4502-4507, Oct. 2021. <https://doi.org/10.1109/CAC53003.2021.9728357>.
- [4] C. Fulton, et. al., "Digital phased arrays: challenges and opportunities", Proceedings of IEEE, Vol. 104, No. 3, pp. 487-503, Mar. 2016. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2015.2501804>.
- [5] J. Jung and S. Lee, "A study on pattern nulling for phased array antenna system", Journal of KIIT, Vol. 10, No. 1, pp. 67-75, Jan. 2020. <https://doi.org/10.14801/jkiit.2020.18.1.67>.
- [6] S. Jang, "A study on the active phased array antenna system with subarray channel for digital beamforming", Ph.D. dissertation, Dept. Elec. and Computer Eng., Univ. of Seoul, Seoul, Korea, 2014. <https://www.riss.kr/link?id=T13665462>. [accessed: Jun. 04, 2026]
- [7] J. S. Herd, et. al., "The evolution to modern phased array architectures," Proceedings of IEEE, Vol. 104, No. 3, pp. 519-529, Mar. 2016. <https://doi.org/10.1109/JPROC.2015.2494879>.

- [8] K. W. O'Haver, et. al., "Radar development for air and missile defense", Johns Hopkins APL Technical Digest, Vol. 34, No. 2, pp. 140-153, 2018. <https://www.jhuapl.edu/content/techdigest/pdf/V34-N02/34-02-OHaver.pdf>. [accessed: Jun. 04, 2026]
- [9] E. Kowalski, et. al., "Multifunction phased array radar advanced technology demonstrator (MPAR ATD) nearfield testing and fielding", Proc. 2019 IEEE RadarConf., Boston, MA, USA, pp. 1-4, Apr. 2019. <https://doi.org/10.1109/RADAR.2018.8378771>.
- [10] J. Milin, et. al., "AMSAR-A European success story in AESA radar", proc. RADAR 2009, Bordeaux, France, pp. 1-6, Oct. 2009. <https://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/5438402>. [accessed: Jun. 04, 2026]
- [11] J. Roulston, "The post-war development of fighter radar in Europe-A British perspective", Proc. RADAR 2008, Adelaide, SA, Australia, pp. 1-9, Sep. 2008. <https://doi.org/10.1109/RADAR.2008.4653881>.
- [12] H. Yi, D. Kim, and I. Han, "Design of sub-array receiver for active phased array radar", Journal of KIICE, Vol. 23, No. 5, pp. 568-573, May 2019. <https://doi.org/10.6109/jkiice.2019.23.5.568>.
- [13] S. Jang, et. al, "Subarray channel calibration and performance analysis for digital beam-forming", Journal of KIEES, Vol. 25, No. 2, pp. 235-244, Feb. 2014. <https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2014.25.2.235>.
- [14] D. M. Pozar, "Microwave and RF design of wireless systems", John Wiley and Sons, Inc., pp. 87-93, Nov. 2001.
- [15] D. Jang, "The calibration method of airborne active electronically scanned array antenna using near-field measurement", Journal of KIIT, Vol. 21, No. 12, pp. 121-128, Dec. 2023. <https://doi.org/10.14801/jkiit.2023.21.12.121>.
- [16] Y. Lee, J. Kim, Y. Kang, and S. Kim, "Array error analysis and correction of active phased

array antenna for AESA radar", Journal of KIEES, Vol. 26, No. 4, pp. 414-423, Apr. 2015. <https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2015.26.4.414>.

저자소개

박 홍 우 (Hongwoo Park)



2016년 2월 : 경북대학교
전기공학과(공학석사)
2026년 2월 : 경북대학교
전자전기공학부(공학박사)
2016년 2월 ~ 현재 :
국방과학연구소 선임연구원
관심분야 : AESA 안테나,
송수신모듈, 항공기 레이더

김 병 일 (Byeong-il Kim)



2023년 2월 : 계명대학교
컴퓨터공학과(공학사)
2025년 2월 : 계명대학교
컴퓨터공학과(공학석사)
2025년 6월 ~ 현재 :
국방과학연구소 연구원
관심분야 : AESA 안테나,
항공기 레이더

조 신 영 (Shin Young Cho)



2010년 8월 : 한국과학기술원 전기
및 전자공학부(공학석사)
2016년 2월 : 한국과학기술원 전기
및 전자공학부(공학박사)
2016년 2월 ~ 현재 :
국방과학연구소 선임연구원
관심분야 : 직류-직류 변환기,
배터리 충전 시스템, 무선 전력 전송, 항공기 레이더

김 홍 이 (Hong Yi Kim)



2007년 2월 : 홍익대학교
전기공학과(공학사)
2021년 8월 : 한국과학기술원
전기 및 전자공학부(공학박사)
2023년 4월 ~ 현재 : 한화시스템
수석연구원
관심분야 : RF 시스템, 레이더

서 승 희 (Seunghee Seo)



1992년 2월 : 충남대학교

전자공학과(공학사)

1996년 2월 : 충남대학교

전자공학과(공학석사)

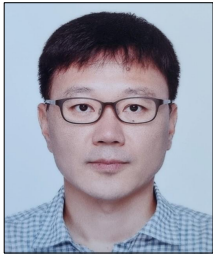
1996년 2월 ~ 현재 :

국방과학연구소 수석연구원

관심분야 : 레이더, 주파수 선택

표면(FSS), AESA 안테나

김 동 환 (Donghwan Kim)



2007년 2월 : 서울대학교

전기 및 컴퓨터공학부(공학석사)

2021년 2월 : 충남대학교

전자공학과(공학박사)

2007년 2월 ~ 현재 :

국방과학연구소 책임연구원

관심분야 : AESA 레이더, 레이더

신호처리, 레이더 시험평가