

## AESA 레이다용 송수신모듈 송수신 동시 운용 성능 측정

## Measurement of the AESA Radar Transmit/Receive Module under Simultaneous Transmit/Receive Operation

이호연<sup>\*,\*\*</sup> · 최길웅<sup>\*\*</sup> · 임평순<sup>\*\*</sup> · 양영구<sup>\*</sup>Ho-Yeun Lee<sup>\*\*\*</sup> · Gil-wong Choi<sup>\*\*</sup> · Pyung-Soon Im<sup>\*\*</sup> · Younggoo Yang<sup>\*</sup>

## 요 약

본 논문은 AESA 레이다용 송수신모듈(Transmit Receive Module, TRM)의 송수신 성능 검증을 위한 새로운 측정 방법에 대하여 기술하였다. 일반적인 AESA 레이다용 송수신모듈은 송신과 수신이 구조적으로 분리되어 있기에 내부 신호에 의한 간섭 문제가 적으며 해결이 용이하였다. 하지만 최근 개발되는 송수신모듈은 SiP(System in Package)를 이용한 소형/집적화 구조로 송신과 수신이 통합됨에 따라 송수신 동시 운용 시 내부 신호의 간섭에 따른 송수신 성능을 검증할 필요성이 있다. 또한 기존 자동화 측정 장비는 송수신 성능 시험이 별도로 구성되어 내부 신호 간섭 영향성을 확인하기 어려웠다. 따라서 송수신 동시 운용 시험이 가능한 송수신 검증 자동화 측정 장비를 설계 및 제작하였고, 이를 통해 내부 신호 간섭 영향성을 고려한 송수신모듈 성능을 실험적으로 검증하였다.

## Abstract

This paper presents a novel measurement method for evaluating the transmit/receive performance of the transmit/receive modules (TRMs) in active electronically scanned array (AESA) radar systems. Conventional TRMs structurally separate the transmitter and receiver, minimizing internal signal interference and simplifying performance verification. However, a recently developed TRM utilizes system-in-package (SiP) to achieve a compact and integrated structure. The transmitter and receiver are integrated, necessitating the verification of the transmit/receive performance so as to address the interference of internal signals during simultaneous transmission and reception. Moreover, because conventional automated measurement equipment are limited to testing the performances of the transmitter and receiver separately, assessing the influence of internal signal interference is difficult. Therefore, an automated measuring equipment capable of simultaneously testing the transmitter and receiver operations is proposed. Experimental verification of the performance of the integrated TRM, accounting for the influence of internal signal interference using the proposed equipment, is presented.

Key words: AESA, TRM, SiP, Automated Test Equipment, Internal Signal Interference

## I. 서 론

레이다는 ‘전파를 이용한 탐지 및 거리 측정’이라는 뜻으로, 전자기파를 방사하여 대상 물체의 반사파 또는 산

\*성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과(Department of Electrical and Computer Engineering, Sungkyunkwan University)

\*\*한화시스템(Hanwha Systems Co., Ltd.)

· Manuscript received September 12, 2024 ; Revised October 5, 2024 ; Accepted October 10, 2024. (ID No. 20240912-097)

· Corresponding Author: Younggoo Yang (e-mail: yang09@skku.edu)

란파를 이용하여 물체를 탐지하고 거리, 속도, 방위각 등을 산출하는 시스템이다<sup>[1]</sup>. 초기 레이더는 고이득의 송수신 안테나를 사용하지만 기계 구동식이기 때문에 빔 조향 속도가 느리고 고장률이 높으며 부피가 크고 무거워 정비하기 어려운 단점이 있었다. 이를 개선하기 위해 개별 복사 소자의 위상을 변경하여 전파의 방향을 변경할 수 있는 위상 배열 레이더가 개발되었다.

위상 배열 레이더는 수동형과 능동형으로 구분되며, 수동 위상 배열 레이더(PESA, passive electronically scanned array)는 안테나에 진행파관증폭기(TWTA, travelling wave tube amplifier), 클라이스트론 등의 단일 고출력 송신기로 급전을 하며 위상 변위기에서 전파 빔을 위상 변화를 이용해 전자적으로 형성하고 빔폭을 변화시킨다. 반면 최근 개발되고 있는 능동 위상 배열 레이더(AESA, active electronically scanned array)는 안테나에 급전되는 신호의 크기와 위상을 수천 개에서 수만 개에 해당하는 복사 소자에 연결된 다수의 송수신모듈을 통해 제어함으로써 수동 위상 배열 레이더 대비 빠른 전자적 빔 조향, 다중 빔 형성, 실시간 적응 빔 형성 등 다양한 복사패턴을 형성할 수 있다<sup>[2]~[4]</sup>. 따라서 송수신모듈의 성능과 크기 및 무게는 전체 레이더 시스템의 중요한 요소로 고려되고 있다.

일반적인 능동 위상 배열 레이더의 송수신모듈은 송신과 수신 경로의 신호 및 전원 선로가 물리적으로 구분되어 있기에 송수신모듈 내부 신호의 간섭 영향성 문제가 적으며 해결이 용이하였다. 하지만 최근 개발되는 송수신모듈은 그림 1과 같이 다수의 채널을 가지며, SiP(system in package)를 이용한 소형/집적화 구조로 송신 HPA(high power amplifier)와 수신 LNA(low noise amplifier) 그리고 송수신 경로를 전환하는 Switch가 하나의 FEM(front end module)에 통합되고 빔 조향을 위한 Phase Shifter와 DSA(Digital step attenuator)가 MFC(multi function chip)로 통합되어 구성되기에<sup>[5],[6]</sup>, 송수신 동시 운용 시 내부 신호 간섭에 대한 송수신 성능의 영향성 검증이 필요하다. 또한 기존의 송수신모듈 자동화 측정 장비는 송수신 성능 시험이 별도로 구성되기에 동시 운용 시 발생할 수 있는 문제점을 파악하기 어렵다<sup>[7]</sup>.

따라서 본 논문에서는 송수신모듈의 동시 운용 시 성

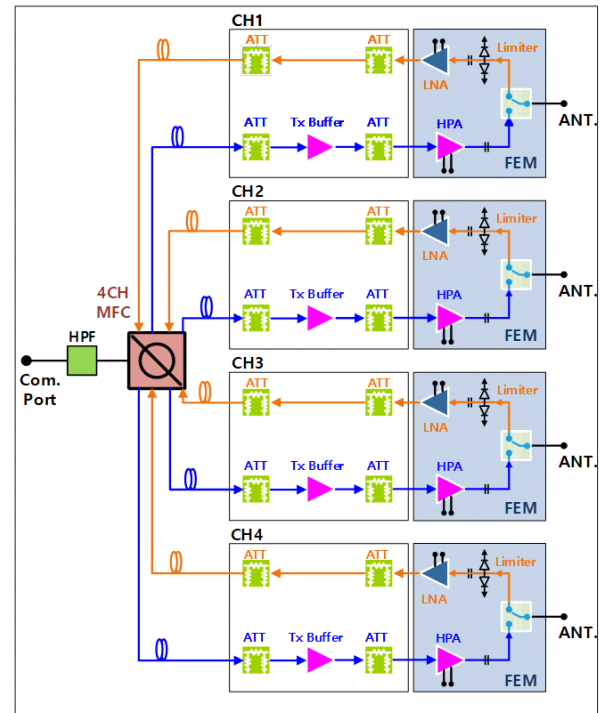


그림 1. 4채널 송수신모듈 구조

Fig. 1. Structure of the quad-transmit/receive module (QTRM).

능의 문제점을 확인하고, 이를 측정할 수 있는 송수신 검증 자동화 측정 장비의 설계 및 제작 그리고 측정 결과를 기술하였다.

본 논문의 구성은 II장에서 송수신모듈 동시 운용 측정 시 내부 신호 간섭에 의한 영향성을 기술하였고, III장에서는 송수신 검증 자동화 측정 장비의 구성품 설계와 제작을 통한 송수신 동시 운용 성능 측정 결과를 기술하였다. IV장에서는 결론에 관해 기술하고 본 연구가 갖는 특성 및 향후 연구에 관하여 기술하였다.

## II. 송수신 동시 운용 성능 영향성 분석

송수신 동시 운용 성능을 검증하기 위해 그림 2와 같이 시험을 구성하였고, 그림 3과 같이 전원 및 제어 신호를 레이더 운용 타이밍으로 공급하기 위해 신호 변환 장치와 전원공급기를 사용하였다. 또한 신호 발생기의 송신 입력과 수신 입력 펄스 신호는 신호 변환 장치의 동기 신

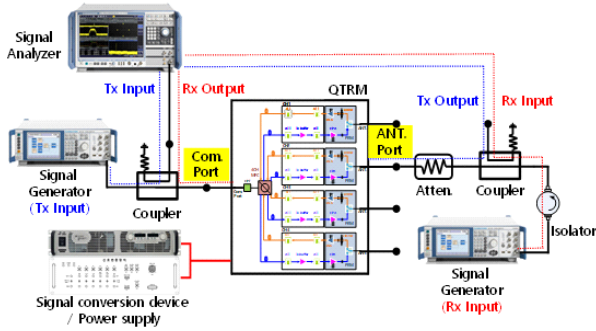


그림 2. 송수신 동시 운용 시험구성도

Fig. 2. Configuration of simultaneous operation test for transmit/receive.

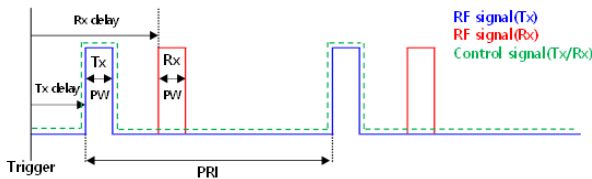
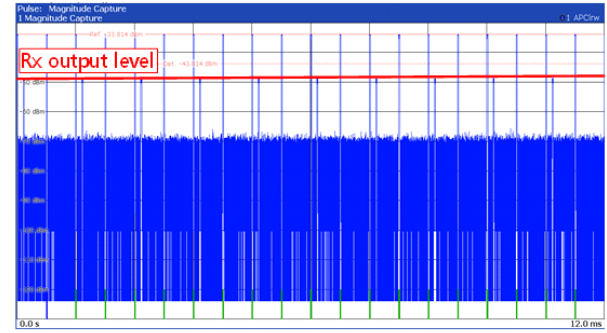


그림 3. RF 및 제어 신호의 타이밍도

Fig. 3. Timing diagram of the RF and control signals.

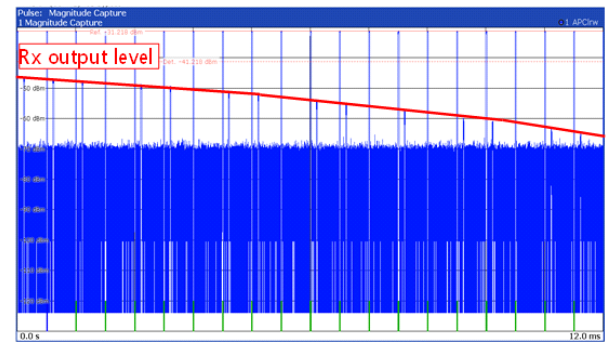
호를 이용하여 동작하도록 구성하였다. 송수신모듈의 Com. Port에 연결되는 Coupler는 송신 입력과 수신 출력 신호를 동시에 확인할 수 있으며, ANT. Port의 Coupler는 송신 출력과 수신 입력 신호를 동시에 확인할 수 있다. 또한 ANT. Port에는 송신 출력을 감쇄하기 위한 Attenuator를 사용하였으며, 수신 입력 신호를 발생하는 신호 발생기의 입력에는 Isolator를 사용하여 송신 출력 신호가 신호 발생기로 유입되는 것을 방지하였다.

그림 4는 송수신모듈의 운용 조건에 따른 시험 결과를 나타낸다. 기존 자동화 측정 장비의 개별 운용 시험 조건에서는 그림 4(a)와 같이 정상적인 수신 출력 성능을 확인할 수 있었다. 반면, 그림 2의 송수신 동시 운용 시험 조건에서 수신 출력 성능 확인 시 그림 4(b)와 같이 정상적이었던 RF 신호 크기가 점진적으로 감소하며 최종적으로 신호가 발생하지 않는 현상이 발생하였다. 이와 같은 현상은 송수신 동시 운용 시 송신 출력 RF 신호가 FEM 내부에서 간섭 현상을 일으켜, 수신 LNA의 동작 조건으로 설정한 Gate 전압이 점진적으로 감소하여 발생하는 것으로 확인되었다. 따라서 송수신모듈의 LNA Gate bias 회로



(a) 송수신 개별 운용 시험 결과

(a) Individual operation test results for the transmit/receive.



(b) 송수신 동시 운용 시험 결과

(b) Simultaneous operation test results for the transmit/receive.

그림 4. 송수신모듈 성능 결과 비교

Fig. 4. Comparison of performances of the TRM.

의 병렬 Capacitor 값의 크기를 증가하여 송신 RF 신호에 의한 간섭 현상을 최소화였고, 설정한 Gate 전압을 유지하도록 하였다. 개선 후 수신 출력 성능 측정 시 정상적인 RF 신호 크기를 확인할 수 있었다. 하지만 그림 2의 송수신 동시 운용 시험구성도는 송신 출력과 수신 출력을 동시에 확인하기 위해서는 신호 분석기 장비가 추가로 필요하며, 다수의 채널을 가진 송수신모듈 또는 송수신블록을 측정하려면 매번 수동으로 채널을 변경해서 측정해야 하는 단점을 가진다. 따라서 이를 개선할 수 있는 자동화 측정 장비를 설계 및 제작하였다.

### III. 송수신 검증 자동화 측정 장비 제작 및 측정

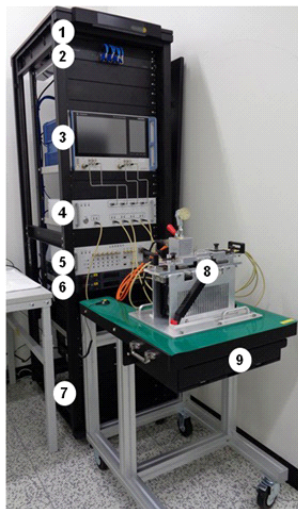
#### 3-1 송수신 검증 자동화 측정 장비 설계 및 제작

송수신 검증 자동화 측정 장비는 송수신 동시 운용 성

능을 자동으로 제어하여 측정할 수 있는 시험 구성을 위해 그림 5와 같이 네트워크 분석기, 전원공급기, 스위칭 허브 및 데스크탑 등의 상용 장비와 자체 설계한 스위치 매트릭스, 신호 변환 장치, 송수신모듈을 장착할 수 있는 전용 치구, 측정 장비를 제어하여 사용자 설정에 따라 시험이 가능한 자동화 측정 GUI를 설계 및 제작하였다.

스위치 매트릭스는 송수신 동시 운용을 측정할 수 있는 시험 환경을 갖도록 2개의 신호 발생기가 포함된 네트워크 분석기와 송수신모듈을 연결하는 장치로서, 4채널 송수신모듈의 측정 채널을 자동으로 제어하여 시험 구성 변경 없이 측정할 수 있도록 IN/OUT Port 1개와 ANT Port 4개 그리고 SP4T(Single Pole 4 Throw)를 제어하기 위한 제어 모듈의 구성으로 설계 및 제작하였다.

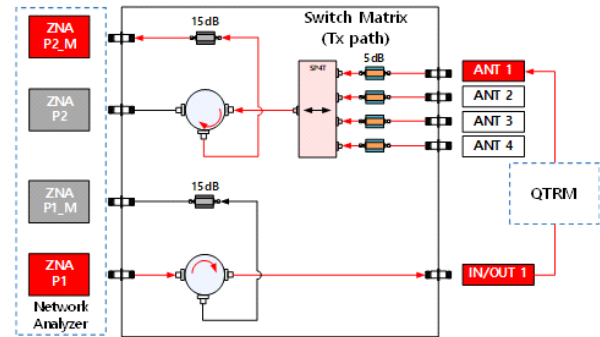
그림 6은 스위치 매트릭스 내부 구성을 포함한 송수신 동시 운용 시험의 측정 구성도이다. IN/OUT Port는 송수신모듈의 송신 입력 신호 제공과 수신 출력 신호 측정을 위한 Port로써 그림 6(a)의 송신 입력 신호 제공 시에는 네트워크 분석기에서 발생한 펄스 신호가 Circulator를 통해 출력되며 송수신모듈에 사용자가 설정한 크기의 펄스 신호를 제공해준다. 그림 6(b)의 수신 출력 신호 측정 시 Circulator는 네트워크 분석기로 수신 출력 신호가 입력되는 것을 억제하며, 네트워크 분석기의 수신 Port와 연결되



Item	Specification	Note
Size(cm)	60(W)×200(H)×72(D)	40U
Input Power	AC 220V	-
No.	Components	
1	Ethernet cable stand	
2	Switching hub	
3	Network Analyzer	
4	Switch Matrix	
5	Signal conversion device	
6	Power supply	
7	Desktop and Monitor	
8	TRM jig	
9	Test stand	

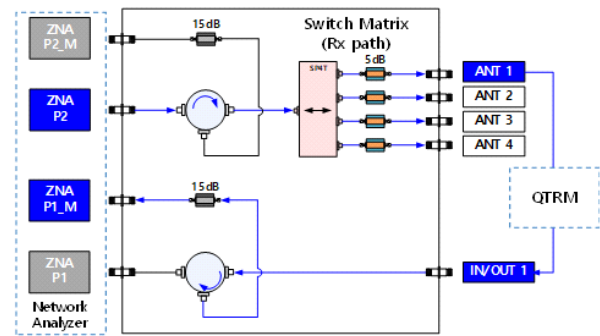
그림 5. 송수신 검증 자동화 측정 장비

Fig. 5. Automated measurement equipment for transmit/receive verification.



(a) 송신 측정 구성도

(a) Configuration of transmitter measurement



(b) 수신 측정 구성도

(b) Configuration of receiver measurement

그림 6. 송수신 동시 운용 시험구성도

Fig. 6. Configuration of the simultaneous operation test for the transmit/receive.

어 정확한 수신 출력 신호를 측정하게 된다. 또한 수신 Port에 입력되는 수신 출력 신호의 과입력을 방지하기 위해 Attenuator를 사용하였다. ANT Port는 송수신모듈의 송신 출력 신호 측정과 수신 입력 신호 제공을 위한 Port로써 그림 6(a)의 송신 출력 신호 측정 시에는 Attenuator를 사용하여 신호의 크기를 감쇄하며, SP4T를 통해 측정 채널을 선택하게 된다. IN/OUT Port와 마찬가지로 Circulator를 사용하여 네트워크 분석기로 송신 출력 신호가 입력되는 것을 억제하며, 네트워크 분석기의 수신 Port와 연결되어 Attenuator를 통과한 송신 출력 신호를 측정하게 된다. 그림 6(b)의 수신 입력 신호 제공 시에는 네트워크 분석기에서 발생한 펄스 신호가 Circulator를 통해 출력되며, SP4T를 통해 사용자가 원하는 측정 채널로 전





### 3-2 송수신 검증 자동화 측정 장비 측정 및 결과

송수신 동시 운용 성능 측정을 위한 자동화 측정 장비의 기본 운용 절차는 그림 8과 같다. 자동화 측정 GUI를 실행하면 Database를 기반으로 장비 초기화 및 Data Load 과정을 수행한다. 이후 스위칭 허브를 통한 네트워크 분석기, 스위치 매트릭스, 신호 변환 장치 및 전원공급기와 의 상호 통신을 통해 연결 상태를 점검 및 전신한다. 연결

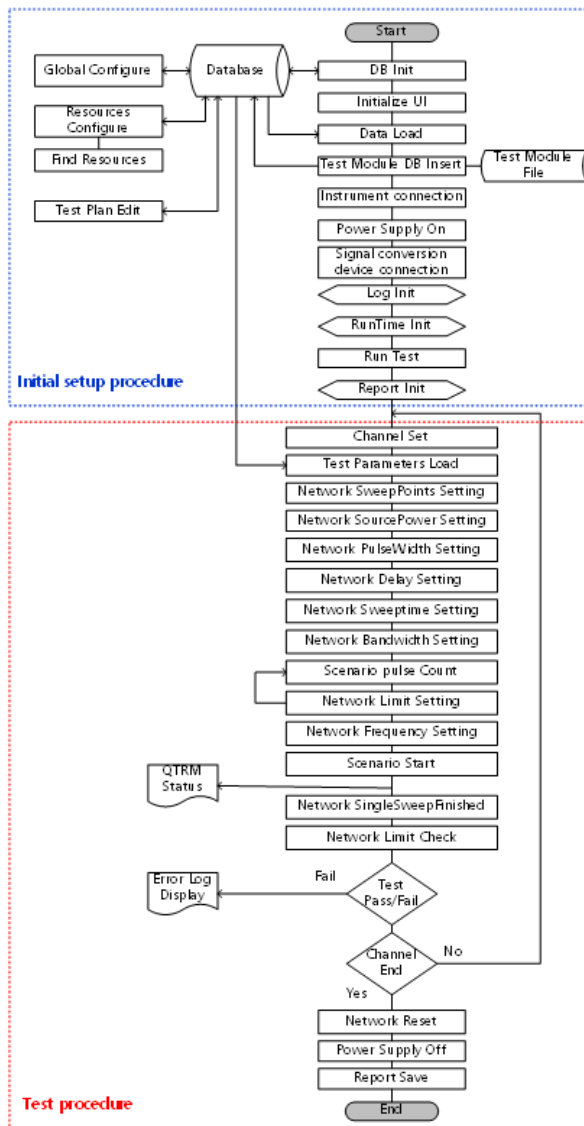


그림 8. 자동화 측정 장비 운용 절차

Fig. 8. Operation procedure of the automated test equipment.

상태가 정상으로 확인되면 사용자는 네트워크 분석기와 연결된 스위치 매트릭스와 RF 케이블의 손실을 보상하기 위해 Calibration을 수행한다. Calibration은 송수신 입력에 정확한 신호를 인가하기 위해 Power sensor를 이용하여 Power Calibration을 수행 후 출력 손실을 보상하기 위해 기 완료된 입력 케이블을 출력 케이블과 연결하여 경로 손실에 대한 Thru Calibration을 수행한다. 본 자동화 시험의 레이다 운용 파형은 신호변환장치에서 발생한 TR Gate 신호를 이용하여 송신 구간에서는 네트워크 분석기의 1 Port를 사용하며, 수신 구간에서는 2 Port를 이용하여 사용자가 설정한 Parameter를 기준으로 송수신 RF 신호가 발생하도록 하였다.

시험을 위해 송수신모듈 전용 치구에 송수신모듈을 장착 후 GUI의 Run을 실행하면, 사용자가 기설정된 Parameter인 Sweep Point, Source Power, Pulse Width, Tx/Rx delay, Sweep time, Bandwidth, Pulse count를 네트워크 분석기에 설정하게 된다. 이후 측정 주파수와 송수신 신호의 크기 Limit을 설정하고 송수신 동시 운용 시험은 자동으로 진행하게 된다. 위 과정은 사용자의 설정에 따라 단독 채널 시험 후 종료되거나 다수의 채널을 모두 시험 후 종료되도록 할 수 있다. 시험이 완료되면 측정 자료를 기반으로 최종 성적서를 생성하고 종료된다.

그림 9는 송수신 검증 자동화 측정 장비를 이용한 측정 결과를 나타낸다. 레이다 운용 타이밍으로 송수신 동시

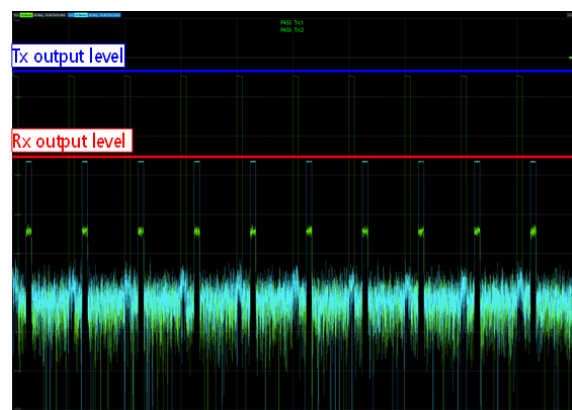


그림 9. 송수신 동시 운용 측정 결과

Fig. 9. Measurement results of the simultaneous operation for the transmit/receive.

운용 시 사용자가 설정한 송수신 구간에서 송신 출력과 수신 출력 신호가 정상적으로 출력되는 것을 확인할 수 있으며, 각 출력의 상한선과 하한선을 설정해 실제 측정 크기를 확인하기 전에 송수신모듈의 송수신 동시 운용 성능의 정상/비정상을 판단 할 수 있다. 또한 시험 도중 송수신모듈의 상태 정보를 감시하여 GUI 내 전시 및 전원을 차단하는 기능을 가진다.

#### IV. 결 론

최근 개발되고 있는 능동 위상 배열 레이다에는 수천 개의 소형/집적화 구조를 가진 송수신모듈이 탑재되어 운용되기에 레이다 운용 파형 및 모드를 고려한 성능 검증이 필수적이다. 따라서 본 논문에서는 송수신모듈의 성능 검증을 위한 새로운 측정 방법에 대하여 제안하고, 송수신 동시 운용 성능 측정을 위한 송수신 검증 자동화 측정장비를 설계 및 제작하였다.

본 자동화 측정 장비는 기존 송수신모듈 자동화 측정 장비와 달리 송신 출력과 수신 출력 성능을 동시에 확인할 수 있으며, 다양한 레이다 운용 파형에 대하여 시험이 가능하도록 송수신 펄스폭(PW)과 펄스 반복 주기(PRI)를 변경할 수 있다. 또한 펄스 개수를 조정하여 점진적으로 수신 신호 크기가 감소하는 현상 분석이 가능하고, 송신과 수신 파형 간의 지연 시간도 사용자의 설정에 따라 변경 가능하므로 레이다 운용 시 발생하는 다양한 상황을 모사할 수 있는 장점을 가진다. 또한 기존 수동 시험은 채널별 테스트 구성 변경 및 송수신 개별 시험으로 인해 4 채널 송수신모듈 시험 시 1시간 20분이 소요되지만, 본 자동화 측정 장비는 테스트 구성의 변경 없이 송수신 출력을 동시에 확인하기에 30분의 시험 시간이 소요된다. 이는 능동 위상 배열 레이다에 장착되는 약 1,000개의 송수신모듈의 시험을 가정하면 약 1,333시간이 소요되던 것을 500시간으로 단축할 수 있게 된다.

본 논문에서 제안된 송수신 동시 운용 성능 측정 및 자동화 검증 장비의 설계/제작을 통해 송수신모듈 성능 검증 방법에 대한 방향성을 제시했다는 점에서 본 연구의 중요성을 확인할 수 있었다. 능동 위상 배열 레이다용 송수신모듈의 소형/집적화는 반도체 소자 및 기술의 발전으

로 점차 고도화될 것이며, 이에 따라 다양한 측정 방법이 필요하게 될 것이다. 따라서 본 연구를 바탕으로 향후 송수신모듈의 주요 성능 항목에 대해서도 동시 운용 조건을 적용한 측정 방법에 대한 연구를 진행하여 송수신모듈 개발에 기여할 수 있을 것으로 판단된다.

#### References

- [1] M. E. Russell, "Future of RF technology and radars," in *2007 IEEE Radar Conference*, Waltham, MA, Apr. 2007, pp. 11-16.
- [2] H. M. Yi, B. C. Jun, and B. H. Lee, "Miniaturization development of transmit/receive module using a 10W MEMS switch," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 20, no. 12, pp. 2417-2424, Dec. 2016.
- [3] K. Y. Jung, "Long-range multi-function radar for combat technology trend and development direction," *The Proceedings of the Korea Electromagnetic Engineering Society*, vol. 25, no. 2, pp. 21-29, Mar. 2014.
- [4] H. M. Yi, J. H. Choi, and I. T. Han, "Development of the frequency synthesizer for multi-function radar," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 22, no. 8, pp. 1099-1106, Aug. 2018.
- [5] J. M. Yang, H. S. Kwon, H. M. Yi, Y. K. Park, K. B. Sim, and J. H. Im, et al., "Study on a radar module for active phased array radars," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 35, no. 1, pp. 67-80, Jan. 2024.
- [6] J. H. Choi, J. M. Yang, M. S. Kwon, T. W. Kim, D. S. Kim, and I. T. Han, et al., "Development of the scalable radar module," in *Autumn Annual Conference of Korea Institute of Military Science and Technology 2022*, Daejeon, 2022, pp. 698-699.
- [7] B. J. Park, S. Y. Choi, W. S. Choi, and B. H. Lee, "Automatic measurement and calibration of transmit/receive module for active phased-array antenna device,"

*Journal of Korean Institute of Information Technology,*

vol. 20, no. 8, pp. 69-77, Aug. 2022.

이 호 연 [성균관대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0000-0002-6404-3881>



2012년 2월: 명지대학교 전자공학과 (공학사)

2012년 2월~2016년 3월: 케이엠더블유 주임연구원

2016년 4월~현재: 한화시스템 전문연구원

2023년 2월~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 석사과정

[주 관심분야] 송수신모듈(TRM), RF Power Amplifier, 능동 위상 배열 안테나 시스템 등

임 평 순 [한화시스템/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-0801-0970>



2015년 2월: 충남대학교 전자전파정보통신공학과 (공학사)

2017년 2월: 충남대학교 전자전파정보통신공학과 (공학석사)

2017년 9월~현재: 한화시스템 선임연구원

[주 관심분야] 송수신모듈(TRM), 능동 위상 배열 안테나 시스템 등

최 길 응 [한화시스템/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-5386-852X>



2004년 2월: 광운대학교 전자공학부 (공학사)

2006년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학석사)

2011년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학박사)

2011년 2월~현재: 한화시스템 수석연구원

[주 관심분야] RF, RF Power Amplifier, 송수신모듈(TRM), 능동 위상 배열 안테나 시스템 등

양 영 구 [성균관대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-3463-0687>



1997년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학사)

2002년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)

2002년 3월~2002년 7월: 포항공과대학교 전자전기공학과 박사후 연구원

2002년 8월~2005년 2월: Skyworks Solutions Inc., Senior Electronic Engineer

2005년 3월~현재: 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 교수

[주 관심분야] 초고주파 회로설계, 무선통신 송/수신기 시스템 설계, 비선형 회로 분석 및 시뮬레이션 기법 연구