

포토닉스 기반 송수신기 연동 광대역 능동위상배열 시스템

Development for Wide-Band Active Array System with Photonics-Based Optical Transceiver

류성준 · 김민철* · 정채현* · 박재욱* · 이재민* · 장성훈

Sungjun Yoo · Minchul Kim* · Chaehyun Jung* · Jaewook Park* · Jaemin Lee* · Sunghoon Jang

요약

본 논문에서는 광소자를 이용하여 포토닉스 기반 송수신기를 포함한 광대역 능동위상배열 시스템의 개발 및 근접전계 시험을 통해 측정된 송신/수신 빔 특성을 소개한다. 제안된 송수신기는 RF 기반 송수신 모듈과 광신호 기반 광송수신 모듈로 구성되며, RF 기반 송수신 모듈에 마이크로스트립 다이폴 복사소자를 2×8 배열 구조로 배치하였다. 광송수신 모듈은 광변조기를 이용하여 주파수 상향/하향 변환을 수행하며, 광송수신 모듈은 모노펄스 각도 추출을 위해 A/B/C/D 4 개의 수신채널로 구성된다. 광대역 빔 조향을 위해 송신모듈과 수신모듈에는 실시간 지연소자를 적용하였고, 전자적 빔 조향 범위는 방위각 방향으로 ±20° 범위에서 가능하다. 제작된 송수신기의 송신/수신 빔 패턴 성능을 확인하기 위해 근접전계 시험 시설을 이용하였다. 빔 조향 확인 결과, Ku 대역의 중심주파수 기준 13 % 이상의 대역폭에서 방위각 방향으로 ±20° 범위에서 빔 조향 오차 최대 0.9° 이하로 빔 조향되는 것을 확인하였다. 또한 수신 4 채널의 광배열을 통해 모노펄스 기울기를 획득하고, 야외시험을 통해 표적의 탐지/추적 및 영상획득이 가능함을 확인하였다.

Abstract

This paper describes the development of a wide-band active array system with a photonics-based optical transceiver module (OTM) and measurement results of Tx/Rx beam characteristics using near-field measurements. The proposed transceiver consists of an RF transceiver module and an OTM. The RF transceiver module was designed as a 2×8 array using a microstrip dipole antenna. The OTM performs frequency up/down conversion using an optical modulator and has four Rx channels of A/B/C/D for mono-pulse angle extraction. The transmit and receive modules include a true-time delay to electronically steer the wide-band beam over an azimuth angle of ± 20°. The Tx/Rx beam pattern is measured at a near-field measurement facility. The beam steering error is less than 0.9° over the ±20° azimuth angle in the wide Ku-band. In addition, the monopulse slope is obtained from the Rx 4 optic array, and the function of the monopulse calibration is verified using outdoor measurements.

Key words: Photonic-Based Transceiver, Active Array System, Optical Transceiver Module

「이 논문은 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임.」

국방과학연구소(Agency for Defense Development)

*LIG넥스원(주)(LIG Nex1 Co., Ltd.)

· Manuscript received October 11, 2022 ; Revised November 10, 2022 ; Accepted February 14, 2023. (ID No. 20221011-082)

· Corresponding Author: Sunghoon Jang (e-mail: jangsh@add.re.kr)

I. 서 론

최근 미래 레이더 신기술로 레이더의 소형 경량화를 위해 광소자를 기반으로 하는 포토닉스 기반 레이더 기술들이 국내외에서 많이 연구되고 있다^{[1]~[4]}. 기존 레이더에서 송신신호의 LFM(linear frequency modulation) 파형은 DDS(direct digital synthesizer)를 이용해서 생성하지만 수 GHz의 대역폭을 갖는 광대역 LFM 신호를 직접 생성하는 것에서는 한계가 존재하며, 수신기에서 광대역의 레이더 신호를 처리하기 위해서는 ADC(analog to digital converter)의 샘플링 주파수에 의해 기술적인 제한을 받게 된다. 광소자를 이용한 포토닉스 기반 레이더는 송신경로에서는 광변조기 DPMZM(dual-parallel Mach-Zehnder modulator)을 이용하여 DDS에서 생성한 수백 MHz의 대역폭을 갖는 LFM 신호를 4채배하여, 수 GHz의 대역폭을 갖는 광대역 LFM 신호를 보다 용이하게 생성할 수 있다^[3]. 수신경로에서는 표적에 의해 반사된 광대역 LFM 신호를 광변조기인 PM(phase modulator)과 광필터를 통해 de-chirp을 수행하여 비트 주파수로 직접 하향 변환하여 광대역 수신신호를 보다 쉽게 처리할 수 있다. 하지만 기존의 대부분의 선행 연구들에서는 실험실 수준에서 포토닉스 기반 레이더 송수신 기술의 가능성 및 개념을 검증하는 수준에 머물러 있다. 최근 수동형 안테나를 적용하여 송신/수신 채널을 구성하여 포토닉스 기반 레이더 송수신 기술을 보고한 사례가 있으나, 단일 채널로 구성된 단순한 구조의 포토닉스 기반 송수신 시스템 기술이다^{[2]~[4]}. 포토닉스 기반 송수신 기술을 레이더 등 다양한 응용분야에 실제 적용하기 위해서는, 포토닉스 기반 송수신 기술의 특징인 광대역 LFM 신호를 빔 조향하기 위한 연구와 다수의 수신 채널을 보유한 광배열 구조를 적용하여 수신 부배열을 통한 수신 빔 형성에 대한 방안과 검증에 대한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 광소자를 이용한 포토닉스 기반 송수신기의 설계, 제작 및 시험에 관한 내용을 기술하였다. Ku 대역에서 광대역 신호를 능동위상배열을 통해 빔 조향하고, 다수의 채널로 구성된 광배열을 적용한 수신 부배열에 대한 연구는 최초로 시도된 것으로 확인되며, 포토닉스 기반 광대역 능동위상배열 송수신기의 송신/수신 빔

패턴 특성에 대해 근접전계 시험을 통해 검증을 하였다.

논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 포토닉스 기반 광대역 능동위상배열 송수신기의 설계 방안과 주요 구성품들의 설계 및 제작결과에 관한 내용을 다루고, III장에서는 제작된 송수신기의 송신/수신 빔 특성 성능검증을 위해 수행한 근접전계 시험의 결과 내용을 기술하였다. 마지막으로 IV장에서는 본 연구의 결론을 기술하였다.

II. 포토닉스 기반 능동위상배열 송수신기 설계 및 제작

2-1 포토닉스 기반 능동위상배열 송수신기 설계

포토닉스 기반 광대역 능동위상배열 송수신기는 송신 파형생성모듈, 광송수신 모듈 그리고 송신모듈/수신모듈로 구성된다. 먼저 송신파형 생성모듈에서 DDS를 이용하여 S 대역의 중간주파수 신호를 생성하고 증폭기를 거쳐 광송수신 모듈로 전달한다. 광송수신 모듈은 인가된 중간주파수 신호를 광변조기 DPMZM에 인가하여 광변조를 수행하고 송신 PD(photo detector)를 통해 광전변환을 하여 Ku 대역의 송신신호로 주파수 상향 변환한다. 상향 변환된 송신신호는 송신모듈로 인가되어 실시간 지연소자를 통한 광대역 빔 조향과 고출력 신호증폭하여 복사소자를 통해 송신 빔을 방사한다^[5]. 레이더 수신신호는 복사소자를 통해 수신모듈로 인가되고, 수신모듈에서는 저잡음 증폭 후 실시간 지연소자를 통해 빔 조향하고, 16채널의 수신신호를 결합기를 이용하여 4채널씩 결합하여 각각 A/B/C/D 4개의 부배열로 합성해서 광송수신 모듈로 인가된다. 광송수신 모듈에서는 DPMZM의 출력신호를 광커플러와 광분배기를 이용하여 4개의 수신채널에 인가해주고 4개의 부배열 수신 신호는 PM에서 광변조된다. 광변조된 수신신호는 광필터를 통해 주파수가 선택되고 수신 PD를 통해 광전변환하여 FMCW(frequency modulation continuous wave)의 비트 주파수로 주파수 하향 변환된다. A/B/C/D 4개의 부배열 수신신호를 이용해서 합채널과 차채널을 생성할 수 있고 모노펄스 기울기를 확인할 수 있다. 설계된 포토닉스 기반 광대역 능동위상배열 송수신기의 내부 구성은 그림 1과 같다.

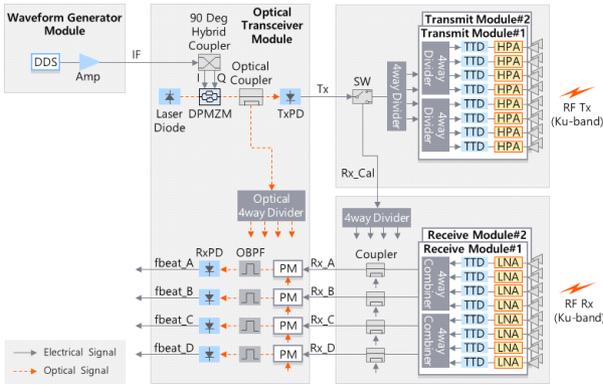


그림 1. 포토닉스 기반 광대역 능동위상배열 시스템 내부 구성 구성도

Fig. 1. Schematic of photonics-based wide-band active array system.

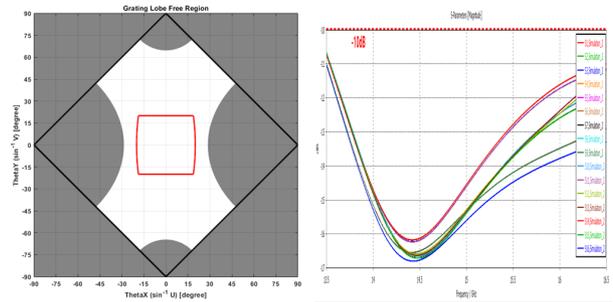
2-2 광대역 평면형 능동위상배열 안테나 설계 및 제작

설계된 광대역 평면형 능동위상배열 안테나는 마이크로스트립 다이폴 복사소자를 2×8 배열 구조로 배치하였다. 능동위상배열 안테나는 각 배열 복사소자의 위상을 조절하여 원하는 방향으로 송/수신 빔 조향을 하도록 설계한다. 빔을 조향할 때 원하는 방향 이외에 위상이 2π의 배수가 되는 방향에서 신호의 합이 최대가 되는 그레이팅 로브(grating lobe)가 발생한다. 그레이팅 로브는 배열 간의 거리(d), 최대 운용주파수의 파장(λ_h), 최대 빔조향각(θ_{max})에 의해 식 (1)과 같이 결정된다^[6].

$$d \leq \frac{\lambda_h}{1 + \sin\theta_{max}} \quad (1)$$

최대 운용주파수와 최대 빔조향각에서 그레이팅 로브가 발생하지 않도록 배열 간격을 고려해야 한다. 요구되는 빔 조향 범위는 방위각 방향으로 ±20°이고, 최소 간격은 $d \leq 0.745 \lambda_h$ 이다. 그림 2는 2×8 배열 구조에 대한 시뮬레이션 결과이다. 그림 2(a)는 최대 운용주파수 및 최대 빔조향각에서 그레이팅 로브가 발생하지 않도록 배열 간격을 설계한 결과이고, 그림 2(b)는 Ku 대역 중심주파수에서 대역폭 20% 이상의 광대역 반사계수 특성을 갖도록 설계한 결과이다.

그림 3은 시뮬레이션을 통해 설계한 광대역 안테나



(a) 그레이팅 로브 시뮬레이션 (b) 반사계수
(a) Grating lobe simulation (b) Reflection coefficient

그림 2. 광대역 평면형 능동위상배열 안테나 설계 결과
Fig. 2. Wide-band planar active array antenna design result.

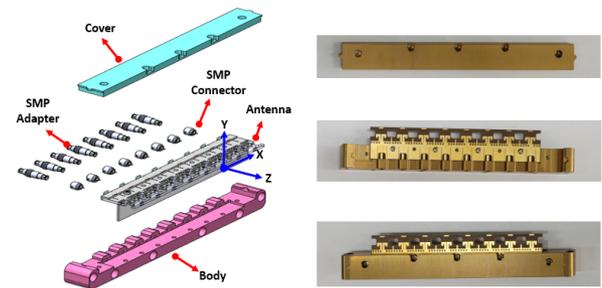


그림 3. 제작된 광대역 배열안테나
Fig. 3. Manufactured wide-band array antenna.

1×8 제작 형상이다. 1×8 마이크로스트립 다이폴 복사소자를 바디 기구물에 조립하고 송신모듈/수신모듈과 블라인드(blind) 체결을 위해 SMP(sub-miniature push-on) 커넥터를 적용하였다. 그림 4는 제작된 2×8 광대역 평면형 능동위상배열 안테나 제작 형상이다. FMCW를 위해 송신용 2×8 안테나와 수신용 2×8 안테나로 구성되고, 송신/수

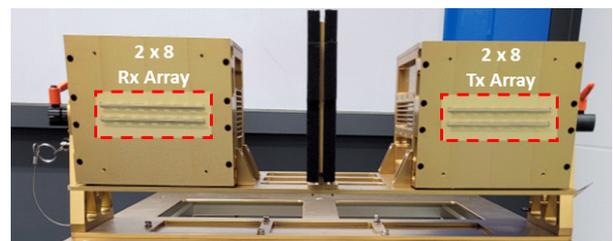


그림 4. 제작된 2×8 광대역 평면형 능동위상배열 안테나
Fig. 4. Manufactured 2×8 wide-band planar active array antenna.

신 간 격리도 개선을 위해 가운데 격벽 구조를 적용하였다.

2-3 광송수신 모듈 설계 및 제작

광송수신 모듈은 광변조기 DPMZM을 이용하여 S 대역의 IF 신호를 입력받아 Ku 대역 신호로 상향 변환하여 송신신호를 생성하고, Ku 대역의 수신신호를 입력받아 광변조기 PM를 이용하여 FMCW의 비트 주파수로 하향 변환하는 기능을 수행한다. 송신경로 J₂ 입력단에서 S 대역의 주파수 f_0 신호는 90° hybrid coupler를 통해 DPMZM으로 입력되고, DPMZM 내에서 광원인 레이저 다이오드의 광신호 f_c 와 변조된다. DPMZM의 변조된 출력 광신호는 PD를 통해 광전 변환된다. PD에서 출력된 RF 신호는 2차 고조파 신호 차이인 $4 \times f_0$ 의 주파수를 갖는다^[7]. 결과적으로 IF 주파수 및 대역폭이 4채배되어 RF 신호로 변조된다. 수신경로는 외부에서 입력되는 레이더 수신신호가 PM에 입력되어 송신 광신호와 변조되고, 수신 PD를 통해 광전 변환된 비트 주파수를 생성한다. 수신경로는 모노펄스 각도 추출을 위해 A/B/C/D 4개의 수신채널을 제공한다. 광송수신 모듈의 내부 구성은 그림 5와 같다.

그림 6은 제작된 광송수신 모듈의 형상을 보여주며, 2U 높이의 19인치 표준랙을 이용하여 제작하였다. 내부는 2층 구조로 구성되고, 1층에는 220 VAC 상용전원을 인가받아 내부 구동에 필요한 DC 전원을 생성하는 SMPS (switching mode power supply), 제어명령을 수신하여 각

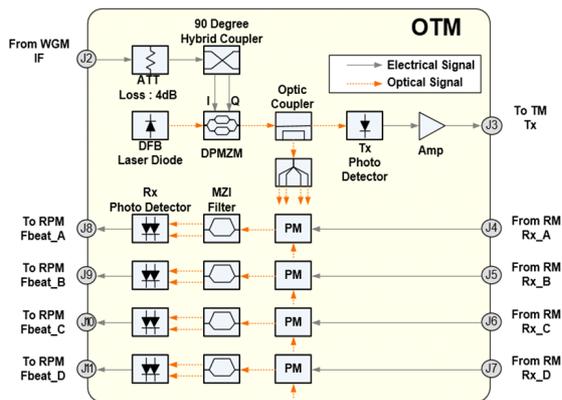
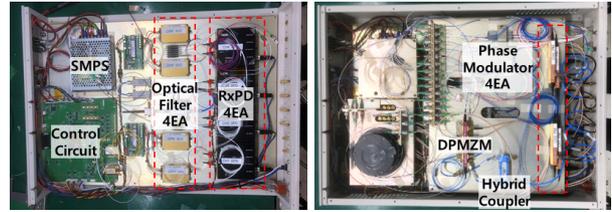


그림 5. 광송수신 모듈 내부 구성
Fig. 5. Schematic of OTM (optical transceiver module).



(a) 1층 부품 배치 (b) 2층 부품 배치
(a) Components on 1st floor (b) Components on 2nd floor

그림 6. 광송수신 모듈 제작 형상

Fig. 6. Photograph of OTM.

구성품의 제어를 수행하고, BIT를 수집하여 전송하는 제어회로 등으로 구성된다. 2층에는 S 대역 입력 신호의 I/Q 신호 생성을 위한 90° hybrid coupler, 송신경로 및 수신경로 주파수 변환을 위한 광변조기(DPMZM, PM) 등으로 구성된다.

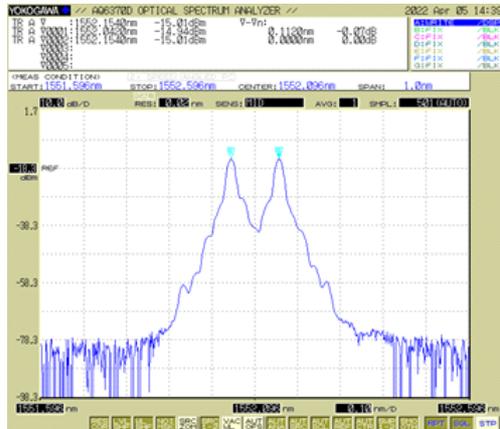
제작된 광송수신 모듈의 성능 확인을 위하여 광신호원, 광신호스펙트럼, RF 주파수에 대한 특성을 측정기를 이용하여 측정하였다. 광신호원의 파장대역은 1,550 nm로 측정되었으며, 그림 7(a)는 RF 주파수 f_{min} 을 도출하기 위해 광송수신 모듈의 DPMZM 바이어스 값을 조정하여 광학스펙트럼기(OSA)를 이용하여 도출한 광신호 성능을 확인한 결과를 보여준다. 그림과 같이 0.112 nm의 파장 차이가 도출되며, 이는 RF 신호인 f_{min} 으로 변환된다. 그림 7(b) 및 7(c)는 각각 RF 주파수 f_{mid} 와 f_{max} 중심주파수를 도출할 때의 광신호 출력레벨이며, 이론값과 동일하게 0.12 nm 및 0.13 nm 파장 차이가 발생하는 것을 확인할 수 있다.

그림 8은 광송수신 모듈의 RF 특성을 측정한 결과이다. 그림 8(a)는 Ku 대역 중심 주파수 기준 13% 이상 대역폭 특성을 만족함을 그림 8(b)와 같이 확인하였다.

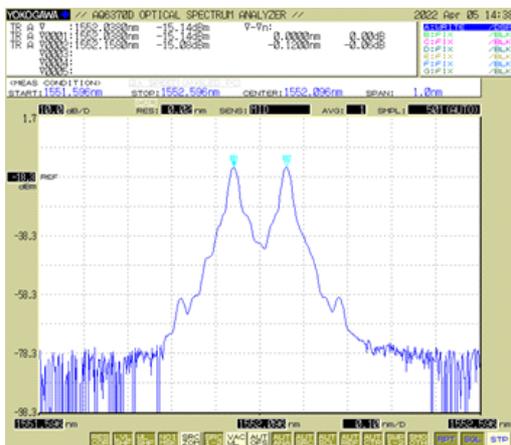
III. 포토닉스 기반 능동위상배열 시스템 근접전계 시험 결과

3-1 송신 근접전계 시험 결과

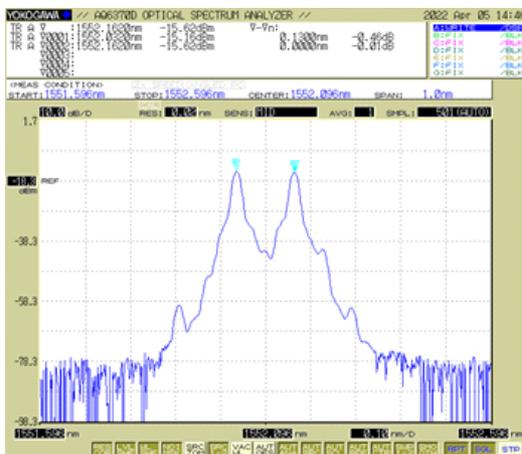
제작된 포토닉스 기반 광대역 능동위상배열 시스템의 빔 패턴 특성 확인을 위해 그림 9와 같이 근접전계 시험 시설에서 시스템 시험을 구성하였다.



(a) $\Delta \lambda = 0.112 \text{ nm}$



(b) $\Delta \lambda = 0.12 \text{ nm}$



(c) $\Delta \lambda = 0.13 \text{ nm}$

그림 7. 광송수신 모듈 광신호 측정 결과
 Fig. 7. Measured optical signal results of OTM.

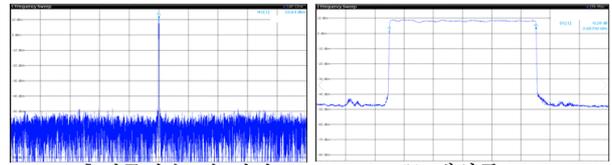


그림 8. 광송수신 모듈 RF 신호 측정 결과
 Fig. 8. Measured RF results of OTM.

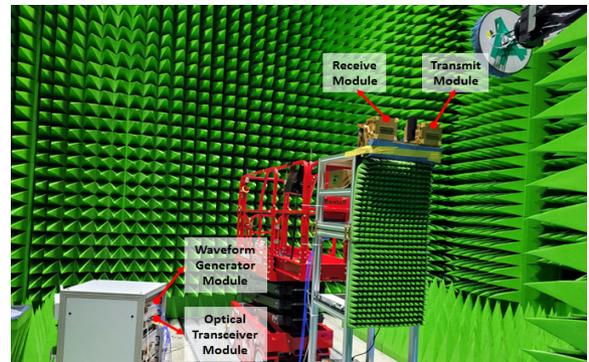


그림 9. 근접전계 시험 구성
 Fig. 9. Test configuration for near field measurement.

그림 10과 같이 송신 근접전계 시험을 구성해서 네트워크분석기(PNA-X)를 통해 송신 빔 패턴 특성을 측정하였다. 송신 빔 패턴을 측정하기 전 각 배열소자를 개별로

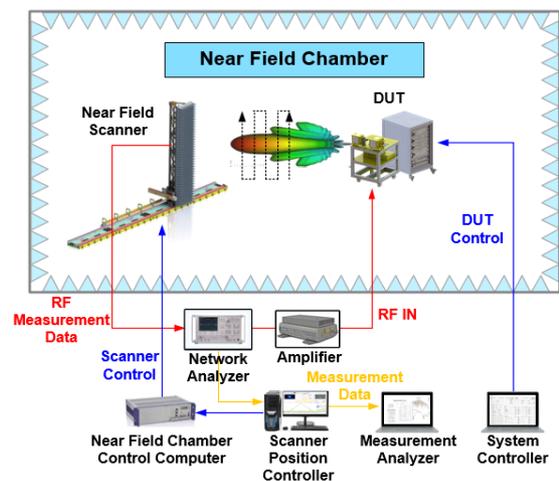


그림 10. 송신 근접전계 시험 구성도
 Fig. 10. Block diagram for transmit near field measurement.

하나씩 동작시켜 위상을 측정하고, 그중 하나의 소자를 기준으로 위상을 정렬하기 위한 위상 정렬값을 추출해서 제어기에 장입 후 매번 전원 인가 시 동일한 정렬데이터를 적용할 수 있도록 하였다.

송신 빔 패턴은 균일(uniform) 분포를 사용하였고, 목표 성능확인을 위해 Bore-sight에서 평면형(planar) 근접전계 시험을 통해 측정된 데이터를 원전계 패턴으로 변환하였다[8][9]. 측정 결과, 그림 11과 같이 Bore-sight에서 유효방사출력(EIRP)을 확인할 수 있다. 유효방사출력의 목표 성능 대비 최소 주파수(f_{min})에서 3 dB 이상, 중심 주파수(f_{mid})에서 4 dB 이상, 최대 주파수(f_{max})에서 3 dB 이상의 값으로 목표성능이 만족됨을 확인하였다.

빔 조향 시 송신 빔 패턴 확인을 위해 최소 주파수, 중간 주파수, 최대 주파수의 방위각에서 5° 단위 총 9개 지점에서 빔 조향 특성을 확인하였다. 그림 12는 빔 조향 시 방위각 및 고각 1D 단면 송신 빔 패턴 측정결과이다. 송신 빔 조향 시 빔 중심, 빔 조향 오차, 방위각/고각 빔폭, 방위각/고각 부엽준위를 측정하였다. 빔 조향 오차는 최소 주파수에서 최대 0.48°, 중심 주파수에서 최대 0.58°, 최대 주파수에서 최대 0.77° 이내임을 확인할 수 있다. 동작 주파수에서 동일한 시간 지연값을 인가하여 빔 조향 제어 시 빔 squint 현상 없이 광대역 빔 조향이 가능함을 확인하였다.

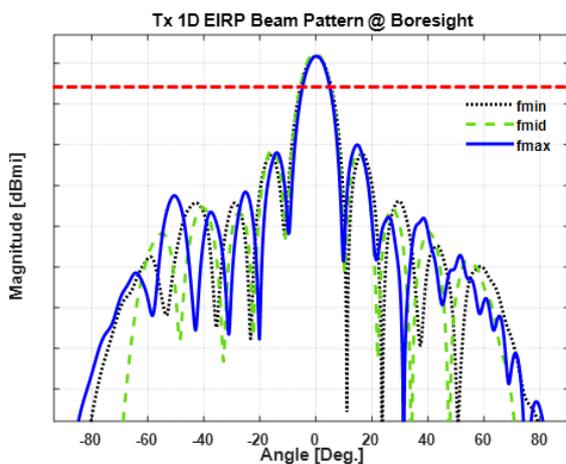
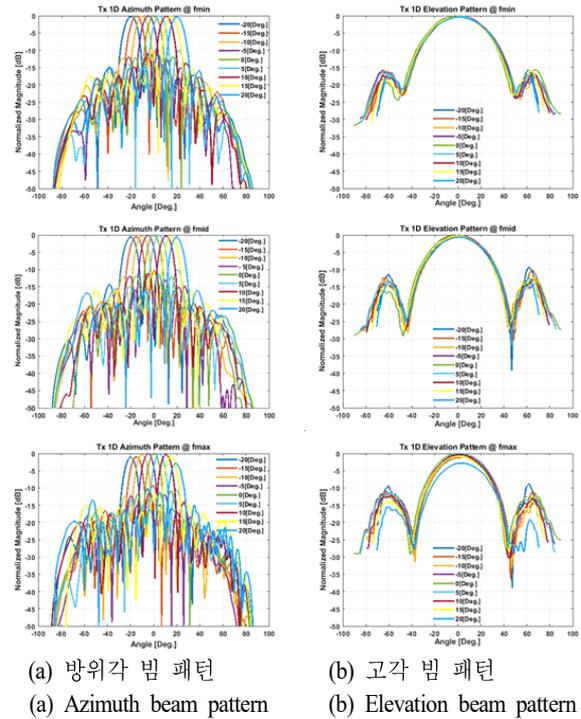


그림 11. Bore-sight EIRP 측정결과(f_{min} , f_{mid} , f_{max})
 Fig. 11. Bore-sight EIRP measurement result (f_{min} , f_{mid} , f_{max}).



(a) 방위각 빔 패턴 (b) 고각 빔 패턴
 (a) Azimuth beam pattern (b) Elevation beam pattern
 그림 12. 빔 조향 시 방위각 및 고각 1D 단면 송신 빔 패턴 측정결과(f_{min} , f_{mid} , f_{max})
 Fig. 12. Azimuth and elevation 1D cut transmit beam pattern measured result of beam steering (f_{min} , f_{mid} , f_{max}).

3-2 수신 근접전계 시험 결과

그림 13은 수신 근접전계 시험 구성도이다. 수신경로는 복사소자를 통해 Ku 대역 신호를 수신하고 광송수신 모듈에서 주파수 하향변환하기 때문에 입/출력신호의 주파수가 다르게 된다. 따라서 수신 근접전계 시험 구성은 송신과 달리 네트워크분석기를 이용하지 않고 주 장비의 Ku 대역 송신신호를 증폭하여 근접전계 프로브를 통해 송신하고 주 장비의 수신경로에서 하향 변환된 수신신호를 디지털신호로 변환하여 저장장치에 저장했다가 시험이 완료되면 저장된 측정데이터를 분석해서 빔 패턴 분석을 수행한다.

수신 빔 패턴은 균일(uniform) 분포를 사용하였고, 송신 빔 패턴 분석과 동일하게 목표 성능확인을 위해, Bore-sight에서 평면형(planar) 근접전계 시험을 통해 측정된 데이터를 기준으로 원전계 패턴으로 변환하였다. 측정 결

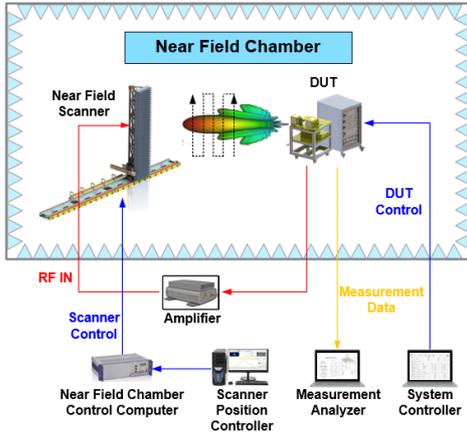


그림 13. 수신 근접전계 시험 구성도
Fig. 13. Block diagram for receive near field measurement.

과, 그림 14와 같이 bore-sight에서 전체 수신경로 이득을 확인할 수 있다. 전체 수신경로 이득은 목표성능 대비 최소 주파수, 중심 주파수에서, 최대 주파수에서 1 dB 이상으로 목표성능이 만족됨을 확인하였다.

그림 15는 빔 조향 시 방위각 및 고각 수신 빔 패턴 측정결과이며, 최소 주파수, 중간 주파수, 최대 주파수에서 방위각 방향 5° 단위로 최대 조향 범위인 ±20°까지 총 9개 빔 조향 특성을 확인하였다. 수신 빔 조향 시 빔 중심, 빔 조향 오차, 방위각/고각 빔폭, 방위각/고각 부엽준위 등을 측정하였다. Bore-sight를 기준으로 최소 주파수에서

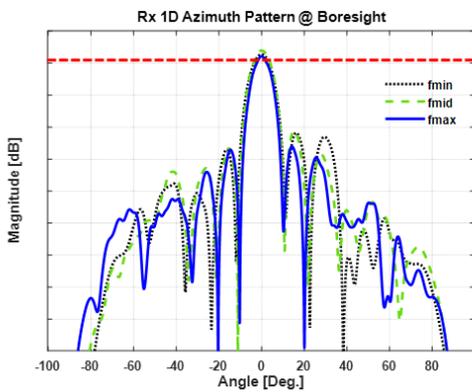
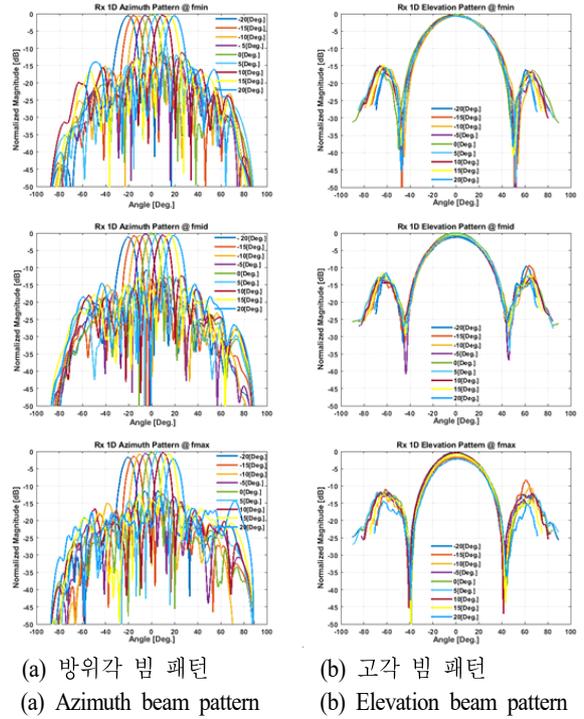


그림 14. Bore-sight 전체 수신경로 이득 측정결과(f_{min} , f_{mid} , f_{max})
Fig. 14. Bore-sight receive gain measurement result (f_{min} , f_{mid} , f_{max}).



(a) 방위각 빔 패턴 (b) 고각 빔 패턴
(a) Azimuth beam pattern (b) Elevation beam pattern

그림 15. 빔 조향 시 방위각 및 고각 1D 단면 수신 빔 패턴 측정결과(f_{min} , f_{mid} , f_{max})
Fig. 15. Azimuth and elevation 1D cut receive beam pattern measured result of beam steering (f_{min} , f_{mid} , f_{max}).

3 dB 빔폭은 방위각 10.22°, 고각 41.26°, 부엽준위는 방위각 -12.25 dB 이하, 고각 -16.16 dB 이하이며, 중심 주파수에서 3 dB 빔폭은 방위각 9.76°, 고각 38.09°, 부엽준위는 방위각 -12.57 dB 이하, 고각 -12.92 dB 이하이고, 최대 주파수에서 3 dB 빔폭은 방위각 8.76°, 고각 32.82°, 부엽준위는 방위각 -14.11 dB 이하, 고각 -11.69 dB 이하이다.

그림 16은 방위각 방향 합, 차 패턴이다. 모노펄스 기울기(slope)는 근접전계 시험을 통해 측정된 데이터를 기준으로 원전계 패턴으로 변환한 합 패턴(sum), 차 패턴(diff)의 허수부에 의해 식 (2)와 같이 결정된다.

$$Slope = \text{imag} \left(\frac{Diff}{Sum} \right) \quad (2)$$

식 (2)를 이용하여 확인한 모노펄스 기울기는 그림 17과 같다. 파란색 그래프는 수신 근접전계 시험을 통해 획

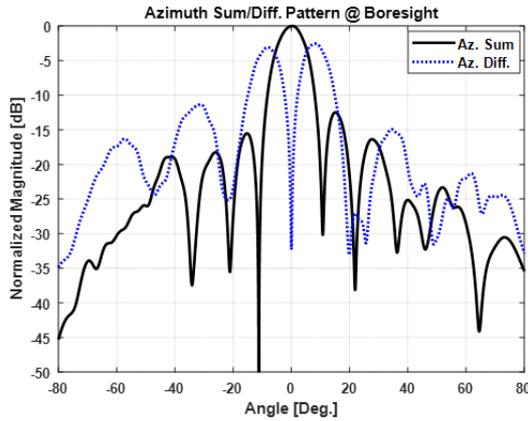


그림 16. 수신 방위각 합/차 패턴
Fig. 16. Rx. azimuth sum/diff. pattern.

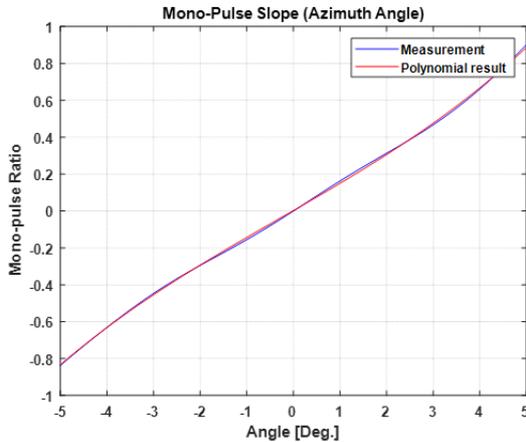


그림 17. 방위각 모노펄스 기울기
Fig. 17. Azimuth mono-pulse slope.

특한 합, 차 패턴의 실제 측정결과에 의한 모노펄스 기울기이고, 빨간색 그래프는 polyfit 함수를 이용하여 3차 다항식의 계수를 계산한 모노펄스 기울기이다. 실제로 처리부의 신호처리에는 이 3차 다항식의 모노펄스 기울기를 기준데이터로 장입하여, 표적신호의 모노펄스 각도를 추출하는 데 사용하였다.

근접전계 시험을 통해 추출한 모노펄스 기울기를 이용하면 실 운용 시 표적의 각도 정확도를 높일 수 있지만, 실 운용 시 수신경로의 상태 변화에 의해 합, 차 채널의 상대적인 위상 변화가 생길 수 있으며, 이로 인해 모노펄스 기울기는 근접전계 시 추출한 값과 달라질 수 있게 되

고, 이는 각도 정확도의 열화로 탐지/추적 성능 저하의 원인이 된다. 이를 보상하기 모노펄스 보정 기능을 수행하게 되고, 모노펄스 보정 기능을 수행하기 위해 근접전계 시험 시 모노펄스 보정 기준값(Cal_{REF})을 추출하며, 이 값을 기준으로 실 운용 시의 보정 측정값(Cal_{MEA})과 비교하여 보상함으로써 식 (3)과 같이 근접전계 상태의 모노펄스 기울기를 유지할 수 있게 된다.

$$\begin{aligned} Sum_F &= Sum \times (Cal_{REF}^S - Cal_{MEA}^S) \\ Diff_F &= Diff \times (Cal_{REF}^D - Cal_{MEA}^D) \end{aligned} \quad (3)$$

수신경로의 상태 변화를 실시간으로 보정하기 위한 모노펄스 보정 기능을 구현하였고, 이를 수신 근접전계 시험에서 검증하였다. 수신경로의 상태 변화를 모사하기 위해 수신경로에 시험용 RF 케이블을 추가 연결하였다. 그림 18은 모노펄스 보정 기능 확인 결과이다. 파란색 점선은 수신경로의 상태 변화로 인해 빔 패턴이 깨지는 현상으로 빔 조향 중심이 방위각 방향으로 2.2° 오차가 발생하고, 방위각 부엽준위가 -12.57 dB에서 -8.96 dB로 열화된 것을 확인할 수 있다. 검은색 실선은 수신경로에 시험용 RF 케이블이 추가된 상태에서 모노펄스 보정 기능을 수행해서 빔 패턴이 정상적으로 보정되는 것을 확인할 수 있다.

그림 19는 제안된 포토닉스 기반 능동위상배열 시스템을 이용하여 야외시험 구성 및 결과를 보여준다. 드론 (Matrice 600) 표적을 이동경로 1~3으로 이동시키면서 탐

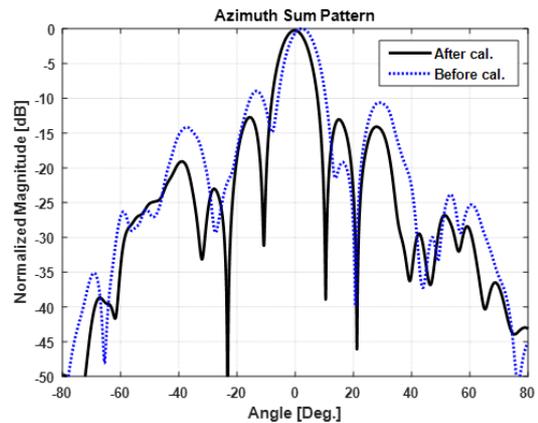


그림 18. 모노펄스 보정 기능 확인 결과
Fig. 18. Confirmed result of mono-pulse calibration.

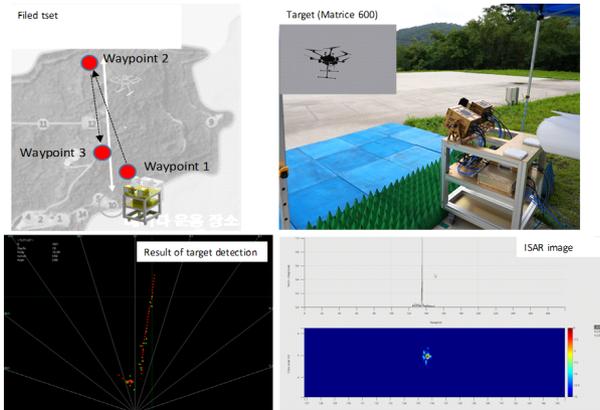


그림 19. 제작된 포토닉스 기반 능동위상배열 시스템을 이용한 야외시험

Fig. 19. Field test using proposed active array system.

지/추적을 진행하였으며, 시스템으로부터 약 200 m 거리에 근접할 때 ISAR 영상을 도출한 결과를 보여주며, 광대역 송수신 신호를 이용하여 표적의 실제형상과 유사한 영상 획득이 가능함을 확인하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 광소자를 이용하여 Ku 대역 포토닉스 기반 송수신기를 연동한 광대역 능동위상배열 시스템을 설계 및 제작하고, 근접전계시험을 통해 송수신기의 성능 측정 결과를 확인하였다. 포토닉스 송수신기 기반 광대역 능동위상배열 시스템은 DDS에서 S 대역의 중간주파수 신호를 생성하고, 광소자인 DPMZM을 이용하여 4채배된 Ku 대역 송신신호를 생성한다. 수신신호는 모노펄스 형성을 위해 A/B/C/D 4개의 부배열로 구성되고, 광소자인 PM을 이용하여 FMCW의 비트 주파수로 하향 변환한다. 능동위상배열 안테나는 마이크로스트립 다이폴 복사소자를 2×8 배열구조로 적용하였고, 하나의 빔 조향 설정값으로 광대역 빔 조향을 위해 송신모듈과 수신모듈에 실시간 지연소자를 적용하였다. Ku 대역 중심 주파수 기준 13 % 이상의 대역폭을 이용하여 송신 근접전계 시험을 통해 송신 빔 패턴 및 EIRP 측정 결과를 확인하였고, 수신 근접전계시험을 통해 수신 빔 패턴 및 전체 수신경로 이득 측정 결과를 확인하였다.

수신경로의 상태변화를 모사해서 수신 빔 패턴이 틀어졌을 때 모노펄스 보정 기능을 통해 수신 빔 패턴이 보정되는 것을 근접전계 시험을 통해 확인하였으며, 추가적으로 야외시험을 통해 표적의 탐지/추적 및 영상획득이 가능함을 확인하였다. 본 논문을 통해 개발된 시스템은 향후 개발되는 국내 포토닉스 기반 레이더의 기술 개발에 도움이 될 것으로 사료된다.

References

- [1] F. Zhang, Q. Guo, and S. Pan, "Photonics-based real-time ultra-high-range-resolution radar with broadband signal generation and processing," *Scientific Reports*, vol. 7, no. 1, p. 13848, Oct. 2017.
- [2] P. Ghelfi, F. Laghezza, F. Scotti, G. Serafino, S. Pinna, and D. Onori, "Photonics in radar systems: RF integration for state-of-the-art functionality," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 16, no. 8, pp. 74-83, Sep. 2015.
- [3] Y. Bae, M. Yi, J. Shin, and S. G. Lee, "X-band photonic-based pulsed radar architecture with a high range resolution," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 18, p. 6558, Sep. 2020.
- [4] S. Yoo, M. Kim, S. Park, M. G. Kyung, S. Jang, and J. Shin, "Design of photonics-based FMCW radar transceiver system," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 32, no. 10, pp. 933-941, Oct. 2021.
- [5] M. Longbrake, "True time-delay beamsteering for radar," in *2012 IEEE National Aerospace and Electronics Conference (NAECON)*, Dayton, OH, Jul. 2012, pp. 246-249.
- [6] M. I. Skolnik, *Radar Handbook*, New York, NY, McGraw-Hill, 2008.
- [7] F. Zhang, Q. Guo, Z. Wang, P. Zhou, G. Zhang, and J. Sun, et al., "Photonics-based broadband radar for high-resolution and real-time inverse synthetic aperture imaging," *Optics Express*, vol. 25, no. 14, pp. 16274-16281, Jul. 2017.

[8] A. C. Newell, R. D. Ward, and E. J. McFarlane, "Gain and power parameter measurements using planar near-field techniques," *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, vol. 36, no. 6, pp. 792-803, Jun. 1988.

[9] J. J. H. Wang, "An examination of the theory and practices of planar near-field measurement," *IEEE Transactions on Antennas Propagation*, vol. 36, no. 6, pp. 746-753, Jun. 1988.

류 성 준 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-0911-2186>



2014년 2월: 홍익대학교 전자전기공학과 (공학사)

2016년 8월: 홍익대학교 전자정보통신공학과 (공학석사)

2019년 8월: 홍익대학교 전자정보통신공학과 (공학박사)

2019년 9월~11월: 홍익대학교 메타물질 전자소자연구센터 연구교수

2019년 12월~현재: 국방과학연구소 선임연구원

[주 관심분야] GPS 배열안테나, 안테나 설계 및 위치 최적화, 광자 레이더

박 재 욱 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-2735-1324>



2009년 2월: 숭실대학교 정보통신전자공학부 (공학사)

2011년 2월: 숭실대학교 정보통신공학과 (공학석사)

2017년 1월~현재: LIG넥스원 선임연구원 [주 관심분야] 레이더 신호처리, 광자레이더

김 민 철 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-4801-0027>



2005년 2월: 성균관대학교 정보통신공학부 (공학사)

2007년 2월: 서울대학교 전기컴퓨터공학과 (공학석사)

2007년 1월~현재: LIG넥스원 수석연구원 [주 관심분야] 레이더 시스템, 광자레이더, 능동위상배열 송수신기

이 재 민 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-2293-0976>



2011년 2월: 경기대학교 전자공학부 (공학사)

2013년 2월: 충남대학교 전파공학과 (공학석사)

2013년 1월~현재: LIG넥스원 선임연구원 [주 관심분야] 위상 배열 안테나 설계, 레이더 시스템, 초고주파 수동회로 설계

정 채 현 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-5836-3715>



2008년 2월: 충남대학교 전기정보통신공학과 (공학사)

2010년 2월: 한국과학기술원 전자전기공학과 (공학석사)

2010년 1월~현재: LIG넥스원 수석연구원 [주 관심분야] 레이더 시스템, 광자레이더, 마이크로파탐색기

장 성 훈 [국방과학연구소/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-3100-0834>



1996년 2월: 서울시립대학교 전자공학과 (공학사)

1998년 2월: 서울시립대학교 전자공학과 (공학석사)

2015년 2월: 서울시립대학교 전자공학과 (공학박사)

1998년 2월~현재: 국방과학연구소 책임연구원

[주 관심분야] 레이더 시스템, RF Photonics, 디지털 레이더 등