

포토닉스 기반 FMCW 레이다 송수신 시스템 설계

Design of Photonics-Based FMCW Radar Transceiver System

류성준* · 김민철 · 박신명 · 경민구 · 장성훈* · 신진우*

Sungjun Yoo* · Minchul Kim · Sinmyong Park · Min-Gu Kyung · Sunghoon Jang* · Jinwoo Shin*

요 약

본 논문에서는 광소자를 이용하여 포토닉스 기반 FMCW 레이다 송수신 시스템을 설계 및 제작하고, 연동시험과 야외 환경에서 통합시험을 통해 그 성능을 검증하였다. 구현된 포토닉스 기반 레이다 시스템은 고해상도 ISAR 영상을 위해 기존 RF 신호 생성 방식에서는 기술의 제한이 있는 X-band 중심주파수의 20 %에 해당하는 대역폭을 갖는 LFM 파형을 광전변환 모듈을 이용하여 생성하고, 반사된 광대역 표적신호를 광소자를 이용하여 직접 처리한다. 실방사 시연을 위해 RF 출력전력은 장거리모드용 7 W, 단거리모드용 100 mW로 설정하였다. 모의표적장치를 이용하여 탐지추적 시험을 수행하였고, RCS 10 m² 표적에 대해 탐지거리 성능을 확인하였다. 실효적 드론을 이용하여 X-band의 20 %의 대역폭을 갖는 LFM 파형으로 해상도 7.5 cm의 고해상도 ISAR 영상을 획득하였다. 본 연구를 통해 국내 포토닉스 기반 레이다의 기술 확보와 탐지/추적 및 ISAR 영상용 FMCW 레이다 기술 개발에 활용이 가능함을 확인하였다.

Abstract

Photonics-based radar system is designed and fabricated for X-band frequency-modulated continuous-wave (FMCW) radar with optical devices, and it is demonstrated by conducting system integration and far-field tests. The photonics-based radar system generates broadband linear frequency-modulated (LFM) signals with a bandwidth that is 20% of the X-band of the center frequency for high-resolution inverse synthetic-aperture radar (ISAR) images by using an electro-optical modulator. It directly processes broadband target signals with photonics devices. To perform a field test using the proposed photonics-based radar transceiver system, the output powers for the long-range and short-range modes were designed to be 7 W and 100 mW, respectively. The far-field test confirmed a detection range of the simulated target with a 10-m² radar cross section (RCS). A drone ISAR image with a 7.5-cm high-range resolution is achieved by applying broadband LFM signals with a bandwidth that was 20 % of the X-band. The result of this study can enhance the ability to design photonics-based radar systems and assist the development of FMCW radar for detection, tracking, and ISAR images.

Key words: Radar, Microwave Photonic-Based Radar, Photonic-Based Radar

I. 서 론

최근 민간 및 군 영역에서 무인항공기 및 드론과 같이

크기가 작은 인공표적에 대한 레이다 탐지 및 식별 기술들이 많이 연구되고 있다^{[1]~[3]}. 표적을 탐지하는 것뿐만 아니라, 클러터와의 구분을 위해 물체 식별이 중요하다.

LIG넥스원(주) (LIG Nex1 Co., Ltd.)

*국방과학연구소 (Agency for Defense Development)

· Manuscript received August 5, 2021 ; Revised September 2, 2021 ; Accepted September 24, 2021. (ID No. 20210805-065)

· Corresponding Author: Jinwoo Shin (e-mail: sjinu@add.re.kr)

고해상도 분해능을 통한 식별을 위해서 레이더는 높은 주파수에서 광대역의 파형을 생성하고, 표적에 의해 반사된 광대역의 표적신호를 실시간으로 처리할 수 있는 능력이 요구된다^{[4],[5]}. 하지만 레이더 송신기에서 DDS(direct digital synthesis)를 이용하여 광대역 특성을 갖는 LFM(linear frequency modulation) 신호를 직접 생성하는 것은 한계가 존재하며, 레이더 수신기에서 광대역의 레이더 신호를 처리하기 위해서는 ADC(analog to digital converter)의 입력 대역폭과 샘플링 주파수에 의해 기술적인 제한을 받게 된다^[6]. 이러한 기존 RF(radio frequency) 기반 레이더의 기술적 한계를 극복하기 위해 광소자를 이용한 포토닉스 기반 레이더에 대한 관심이 높아지고 있다^{[7]~[9]}.

본 논문에서는 광소자를 이용한 포토닉스 기반 레이더 시스템의 설계, 제작 및 시험에 관한 내용을 기술하였다. 송신경로에서는 국내 공정을 이용하여 제작한 DPMZM(dual-parallel Mach-Zehnder modulator) 광전변환 모듈을 이용하여 DDS에서 생성한 X-band의 5%의 대역폭을 갖는 신호를 4 체배하여 기존 RF 시스템에서는 생성하기 어려운 중심주파수 X-band의 20%에 해당하는 대역폭을 갖는 광대역 LFM 파형을 보다 용이하게 생성할 수 있다. 수신경로에서는 표적에 의해 반사된 광대역 LFM 신호를 RF 신호의 주파수 하향변환 없이 국내 공정을 이용하여 제작한 광소자인 PM(phase modulator)와 광필터를 통해 De-Chirp을 수행하여 beat frequency로 직접 하향 변환한다^[10].

제작된 포토닉스 기반 레이더는 실험실 환경에서의 연동시험과 실외 환경에서의 통합시험을 통해 검증하였다. 실험실 환경에서 수행한 계측기를 이용한 포토닉스 기반 레이더의 연동시험은 광전변환 모듈을 이용한 송신경로의 광대역 LFM 신호 생성결과와 모의표적장치를 RF 케이ابل로 직접 연동하여 광소자를 이용한 수신경로의 De-Chirp 결과인 beat frequency를 계측기를 이용하여 검증하였다. 실외 환경에서 수행한 포토닉스 기반 레이더의 통합시험에서는 안테나 실방사를 통해 모의표적장치를 이용한 탐지추적모드의 결과와 실험적 드론을 이용한 고해상도 ISAR(inverse synthetic aperture radar) 영상모드를 검증하였다. 최근 발표된 고해상도 ISAR 영상을 획득하기 위해 X-band, K-band, Ka-band, W-band 등에서 다양한 연구가 진행된 바 있으나, RCS(radar cross section) 3~100

m²의 표적을 이용하여 실험실 수준에서 포토닉스 기반의 레이더 송수신 시스템의 기술을 확인하는 수준에 머물러 있다^{[8]~[10]}. 레이더 시스템 체계에 주로 사용되는 X-band를 이용하여 포토닉스 기반 레이더 송수신 장치를 설계 및 제작하여 실내 및 실외시험으로 장치의 성능을 다양하게 확인한 연구는 처음으로 시도된 것으로 확인되며, RCS 1 m² 이하의 드론표적을 탐지, 추적, 영상획득을 함으로 포토닉스 기반 레이더 송수신 시스템에 대한 검증은 하였다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 포토닉스 기반 레이더의 설계 방안과 주요 모듈들의 설계 및 제작결과에 관한 내용을 다루고, 3장에서는 제작된 모듈을 통합하여 실험실 환경에서 수행한 포토닉스 기반 레이더의 연동시험과 실외 환경에서 모의표적장치와 실험적 드론을 이용하여 수행한 탐지추적모드와 ISAR 영상 모드의 시험결과 내용을 기술하였다. 마지막으로 4장에서는 본 연구의 결론을 기술하였다.

II. 포토닉스 기반 레이더 설계 및 제작

2-1 포토닉스 기반 레이더 설계

포토닉스 기반 레이더는 먼저 송신파형생성모듈에서 S-band의 중간주파수가 20%에 해당하는 대역폭의 LFM 파형을 생성하며, 생성된 중간주파수는 DPMZM을 거쳐 X-band의 중심주파수로 변환된다. X-band 중심주파수 기준 20% 대역폭의 LFM 파형으로 주파수 상향변환하고, 저잡음 증폭된 레이더 수신신호는 PM으로 인가되어 광송수신모듈에서 FMCW(frequency modulation continuous wave)의 beat frequency로 주파수 하향변환된다. 또한 송신신호의 고출력 신호증폭 및 수신신호의 저 잡음 증폭을 위한 송수신모듈, 신호처리 및 제어를 담당하는 신호 및 데이터처리모듈, 송수신장치의 탐지/추적모드 성능검증을 위한 모의표적장치가 있으며, 추가로 ISAR 영상모드 성능검증을 위해 드론 모의표적장치가 사용된다. 설계된 광자기반 송수신장치의 내부 구성은 그림 1과 같다.

2-2 송신파형생성모듈 설계 및 제작

그림 2는 송신파형생성모듈의 내부 구성을 보여준다.

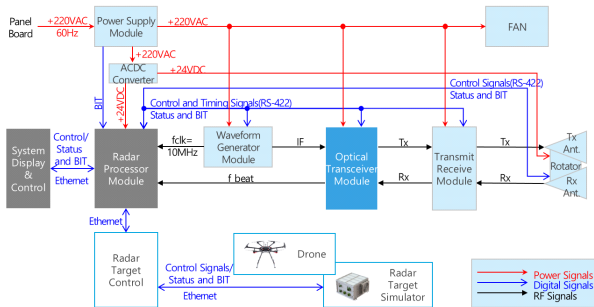


그림 1. 포토닉스 기반 레이더 내부 구성 구성도
Fig. 1. Schematic of photonics-based radar system system.

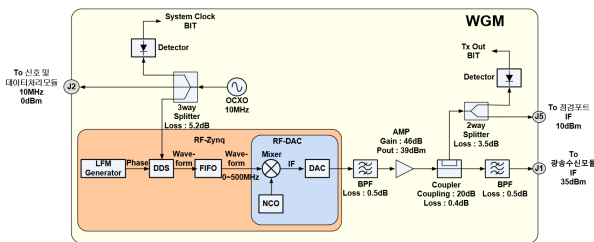


그림 2. 송신파형생성모듈 내부 구성
Fig. 2. Schematic of WGM (waveform generator module).

탐지추적모드 및 ISAR 모드를 위해 1.25 MHz, X-band 기준 5% 대역폭을 갖는 LFM 파형을 생성하며, 대역폭 특성에 따른 ISAR 모드에서 해상도 변화를 확인하기 위해 X-band 기준 1.25 % 대역폭의 LFM 파형을 추가로 생성하도록 설계하였다.

그림 3은 송신과형생성모듈의 운용 타이밍 설계를 나타낸다. 송신과형생성모듈 출력과형신호는 운용 타이밍에 맞춰 신호 및 데이터처리모듈로부터 입력되는 제어명

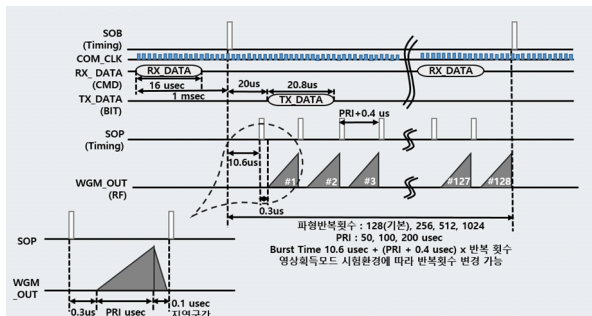


그림 3. 송신파형 생성모듈 운용 타이밍
Fig. 3. Operational timing of WGM.

령과 SOB(start of burst), SOP(start of pulse) 타이밍 신호에 따라 생성된다. SOB Rising 시점으로부터 1 msec 전에 제어명령을 수신하여 파형생성에 필요한 준비를 수행한다. SOB Rising 시점으로부터 10.6 usec 이후에 SOP가 생성되고, 출력파형신호는 SOP를 기준으로 생성한다. 송신파형 생성모듈은 SOB Rising 시점으로부터 20 usec 후에 이전 SOB에서 수집한 BIT(built in test) 결과를 신호 및 데이터 처리모듈로 전송한다.

설계된 송신파형생성모듈은 19인치 랙 형태로 구성되며, IQD사의 IQOV-164 10 MHz OCXO를 기준 주파수로 사용하였으며, S-band의 광대역 LFM 파형을 생성하는 송신파형생성회로로 구성되어 있다. 제작된 송신파형생성모듈의 형상은 그림 4와 같다.

그림 5는 제작된 송신과형생성모듈의 성능 시험 결과를 보여주며, 성능 시험을 위해 출력주파수 및 출력전력, 대역폭, 위상잡음을 측정하였다. 그림 5(a)는 측정된 출력

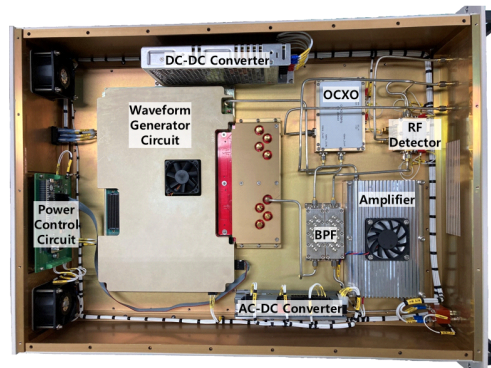


그림 4. 송신파형 생성모듈 제작 형상
Fig. 4. Photograph of WGM.

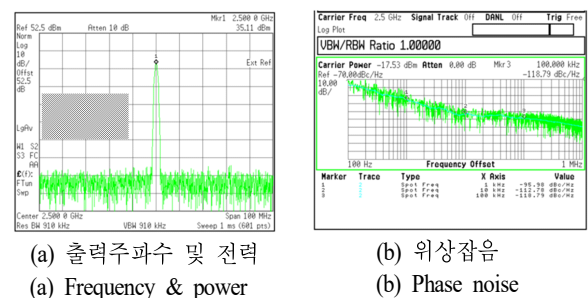
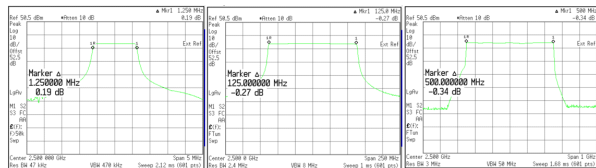


그림 5. 송신파형 생성모듈 측정 결과
Fig. 5. Measured results of WGM.



(a) 1.25 MHz (b) 1.25 % (X-band) (c) 5 % (X-band)

그림 6. 송신과형 생성모듈 대역폭 측정 결과
Fig. 6. Measured results for bandwidth of WGM.

주파수 및 출력전력 측정결과이다. IF 주파수의 출력주파수와 30 dBm 이상의 출력전력 특성을 가지는 것으로 측정되었다. 그림 5(b)는 위상잡음 특성을 측정한 결과로 -98 dBc/Hz @ 1 kHz, -110 dBm/Hz @ 10 kHz, -120 dBc/Hz @ 100 kHz의 성능을 보인다.

그림 6은 대역폭 측정결과를 보여준다. 송신과형 생성모듈의 측정결과, 1.25 MHz 및 X-band에서 1.25 %, 5 % 대역폭 특성을 보이며, 고조파 및 불요파는 각각 -65 dBc 이하의 값을 가짐을 확인하였다.

2-3 광송수신모듈 설계 및 제작

광송수신모듈은 광변조기(DPMZM, PM)를 사용하여 S-band의 RF 신호를 입력받아 X-band 신호로 변조하여 송신신호를 생성하고, X-band의 수신신호를 입력받아 FMCW의 beat frequency를 생성하는 기능을 수행한다. 광송수신모듈로 입력되는 S-band의 주파수 f_0 신호는 90° Hybrid Coupler를 통해 DPMZM으로 입력되고, DPMZM 내에서 광원인 레이저 다이오드의 광신호 f_c 와 변조된다. DPMZM의 변조된 출력 광신호는 PD(photo detector)를 통해 광전변환된다. PD에서 출력된 RF 신호는 2차 고조파 신호 차이인 $4 \times f_0$ 의 주파수를 갖는다. 결과적으로 IF 주파수 및 대역폭이 4 배배되어 X-band의 중심주파수 및 20% 대역폭을 갖는 RF 신호로 변조된다. 광송수신모듈의 수신경로는 외부에서 입력되는 X-대역의 레이더 수신신호가 PM에 입력되어 송신 광신호와 변조되고, 수신 PD를 통해 광전 변환된 beat frequency를 생성한다. 광송수신모듈의 내부 구성은 그림 7과 같다.

그림 8은 제작된 광송수신모듈의 형상을 보여준다. 광송수신모듈은 2U 높이의 19인치 표준랙으로 제작되었으며, 220 VAC 상용전원으로 동작하고 SMPS(switching mode

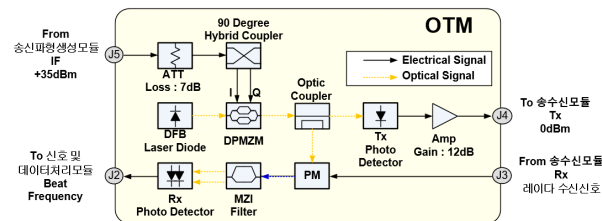


그림 7. 광송수신모듈 내부 구성
Fig. 7. Schematic of OTM (optical transceiver module).

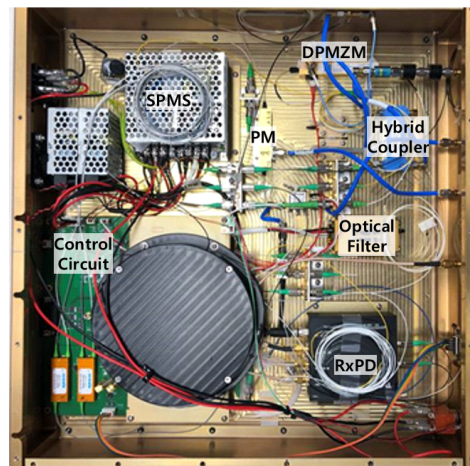


그림 8. 광송수신모듈 제작 형상
Fig. 8. Photograph of OTM.

power supply)에서 내부 구동에 필요한 DC 전원을 생성한다. 제어회로에서는 제어명령을 수신하여 각 구성품의 제어를 수행하고, BIT를 수집하여 전송하는 기능을 수행한다. 제어회로에 실장된 광스위치, SOA(semiconductor optical amplifier), DFB-LD (distributed feedback laser diode)의 광소자는 PCB (printed circuit board)에서 직접 제어하고, DPMZM, PM, 광필터, 광검출기의 광소자는 연결케이블로 제어한다. S-band 입력 신호의 I/Q 신호 생성을 위한 90° Hybrid Coupler를 사용하였다. 송신신호 변조를 위한 DPMZM과 수신신호 변조를 위한 PM 및 광필터는 국내 공정 개발로 만들어진 소자를 사용하였다.

제작된 광송수신모듈의 성능 확인을 위하여 광신호원 및 RF 주파수에 대한 특성을 계측기를 이용하여 측정하였다. 광신호원은 20 dBm, 파장대역은 1,550 nm로 측정되었으며, 그림 9는 OTM의 RF 특성을 측정한 결과이다. 그

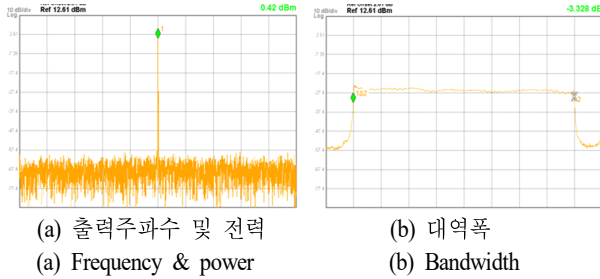


그림 9. 광송수신모듈 측정 결과
Fig. 9. Measured results of OTM.

그림 9(a)는 X-band 중심주파수에서 0 dBm 이상의 출력신호를 보이며, X-band 기준 20 % 대역폭 특성을 만족함을 그림 9(b)와 같이 확인하였다.

2.4 송수신모듈 설계 및 제작

송수신모듈은 X-band의 레이더신호를 송신하기 위한 송신신호 전력증폭 기능과 안테나로부터 인가된 레이더 수신신호를 입력받아 이를 저 잡음 증폭하는 기능을 수행한다. 송신경로는 높은 출력전력을 위해 고출력증폭기를 적용하였고, 스위치를 사용하여 장거리모드와 단거리모드를 변경할 수 있다. 수신경로는 저 잡음 증폭을 위해 LNA(low noise amplifier)를 적용하였고, 수신경로 보호를 위해 Limiter가 내장된 LNA로 구성된다. 송신/수신경로에 불요파와 고조파를 억제하기 위해 BPF로 구성된다. 송수신모듈의 내부 구성은 그림 10과 같다.

송신경로는 송신신호의 전력증폭 기능을 수행하며, 운용자의 선택에 따라 송신출력전력이 변경된다. 장거리모

드에서는 38.4 dBm (7 W)의 출력전력을 갖고, 단거리모드에서는 20 dBm의 출력전력을 갖도록 설계하였다. 장거리모드와 단거리모드는 스위치를 사용해 제어되며, 단거리모드는 최종단 증폭기의 드라이버 출력을 사용한다. 수신경로는 레이더 수신신호를 저 잡음 증폭하는 기능을 수행하며, 수신경로는 49 dB의 수신이득과, 2.5 dB 이하의 잡음지수 특성을 만족하도록 회로를 설계하였다. 수신경로의 수신이득과 잡음지수를 만족시키도록 설계하였다. 추가로 수신회로에 대한 점검을 위해 송신단의 SW#1을 이용하여 수신회로로 직접 신호가 전달되도록 설계하였으며, 이는 광송수신모듈로 인가되는 0 dBm 신호를 수신단에 전달하여 수신회로의 정상 동작 여부를 확인하도록 한다. 송신단으로부터 연결되는 커플러의 경우 손실은 약 0.5 dB가 되도록 설계하였다.

그림 11은 송수신모듈의 제작 형상을 보여준다. 송신경로에는 최종 출력전력을 만족하기 위해 Qorvo사의 TGA2704SM 증폭기를 사용하였으며, 수신경로에는 저잡음 증폭과 과전력 입력에 대한 회로 보호를 위해 Limiter가 삽입된 Qorvo사의 QPM1000 LNA를 적용하였다. 송수신회로의 중단 증폭기의 열적 안정성 확보를 위해 방열팬을 적용하였고, 입출력 신호에 대한 자체점검을 위해 Coupler와 RF Detector를 구성하였다.

그림 12는 송수신모듈 송신경로의 출력전력 측정결과이다. 주파수 $f_c \pm 1$ GHz 대역에 대해서 단거리모드는 20 ~ 21 dBm, 장거리모드는 37 ~ 39.5 dBm으로 목표성능을 만족하였다.

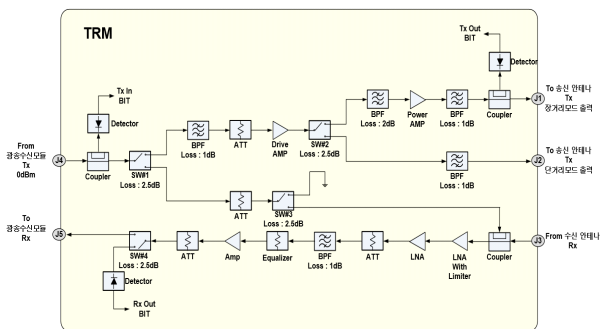


그림 10. 송수신모듈 내부 구성
Fig. 10. Schematic of TRM (transmit receive module).

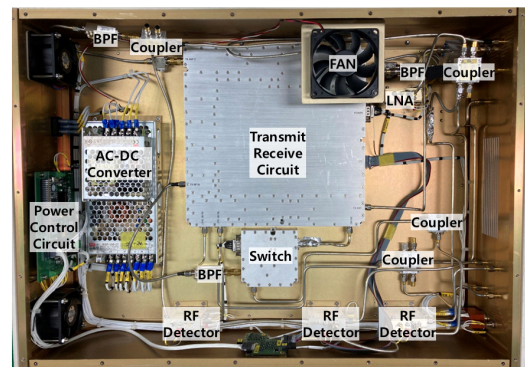


그림 11. 송수신모듈 제작 형상
Fig. 11. Photograph of TRM.

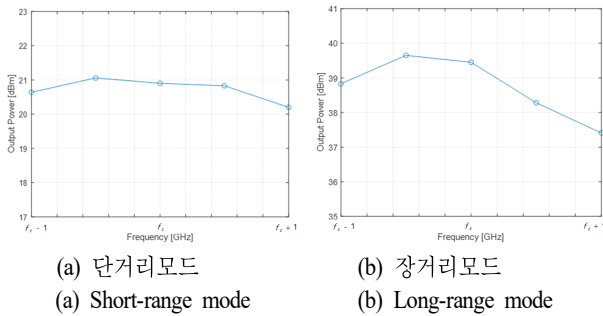


그림 12. 송수신모듈 측정 결과
Fig. 12. Measured results of TRM.

III. 포토닉스 기반 레이더 송수신 시스템 시험 결과

3-1 포토닉스 기반 레이더 연동시험

제작된 포토닉스 기반 레이더 송수신 시스템의 연동시험을 수행하였다. 그림 13은 포토닉스 기반 레이더 송수신 시스템의 연동시험을 위한 시험구성을 보여준다. 송신 파형생성모듈, 광송수신모듈, 송수신모듈, 신호 및 데이터처리모듈은 19 인치 캐비닛에 장착하여 연동시험을 수행하였다. 송신파형생성모듈, 광송수신모듈, 송수신모듈을 연동하여 송신신호를 스펙트럼 분석기를 이용하여 출력레벨과 대역폭을 측정하였으며, Channel Power는 38 dBm 이상으로 확인되었다. 그림 14는 ISAR 영상모드의 대역폭 X-band 기준 5 %와 X-band 기준 20 %의 대역폭 측정결과이다. 광소자를 이용한 X-band의 광대역 송신신호 연동이 정상적으로 동작하는 것을 확인하였다.

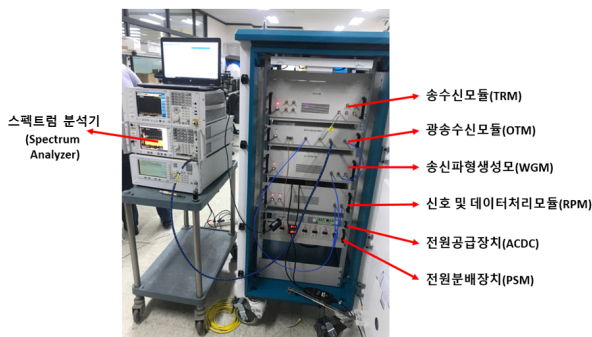


그림 13. 포토닉스 기반 레이더 연동시험 구성 사진
Fig. 13. Set-up of system integration test for photonics-based radar transceiver system.

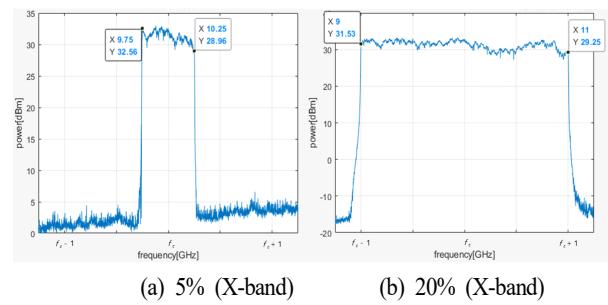


그림 14. 대역폭 측정 결과
Fig. 14. Measured results of bandwidth.

그림 15는 포토닉스 기반 레이더 송수신장치의 수신경로를 확인하기 위한 beat frequency 측정 결과를 보여준다. 수신경로의 정상 동작 여부를 확인하기 위해 모의표적장치를 케이블로 연결하였으며, 모의표적 시나리오는 최소 원거리장의 90배 거리에서 속도 30 m/s로 접근하는 시나리오로 구성하였다. 광송수신모듈 출력인 beat frequency를 스펙트럼 분석기를 이용하여 측정하였다.

FMCW 파형에서 거리에 대한 beat frequency(f_{rbeat})와 속도에 의한 beat frequency(f_{vbeat})는 식 (1)과 식 (2)로 결정되고, 최종 beat frequency는 거리에 의한 beat frequency와 속도에 의한 beat frequency의 합으로 정해진다.

$$f_{rbeat} = \frac{2BR}{cT} \quad (1)$$

$$f_{vbeat} = \frac{2fV}{c} \quad (2)$$

여기서 B 는 대역폭, R 은 표적거리로 각각 최소 원거리장의 90배 및 45배, c 는 빛의 속도, T 는 PRI(pulse repetition

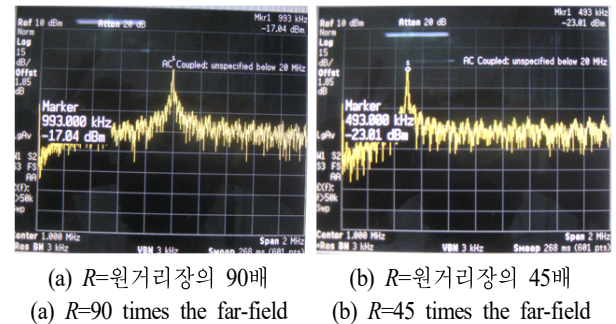


그림 15. Beat frequency 측정 결과
Fig. 15. Measured results of beat frequency.

interval)로 200 usec, f_c 는 중심주파수, V 는 속도 -30 m/s이다. 표적거리에 해당하는 beat frequency는 1 MHz와 500 kHz이다. 속도 -30 m/s에 해당하는 beat frequency는 -2 kHz이다. 이론적인 계산을 통해 도출된 beat frequency는 998 kHz와 498 kHz이며, 계측기를 이용하여 측정한 beat frequency는 표적이 최소 원거리장의 90배에 있을 때 993 kHz, 표적이 최소 원거리장의 45배에 있을 때 493 kHz로 측정되었다. 이론적인 계산을 통해 예측한 결과와 측정결과 사이에 5 kHz Offset이 존재함을 알 수 있다. 이것은 광송수신모듈 수신경로 자체 Delay에 의한 Offset 값으로 신호처리에서 거리 30 m에 의한 Offset 보정을 수행한다. 연동시험을 통해 광소자를 이용한 광자기반 레이더의 송신/수신경로의 정상적인 동작을 확인하였다.

3-2 포토닉스 기반 레이더 송수신 시스템 실외시험

최종적으로 제작된 포토닉스 기반 레이더 송수신 시스템의 성능을 확인 및 검증하기 위해 실외에서 시험을 진행하였다. 포토닉스 기반 레이더 장치와 50 m 이상 떨어진 곳에 모의표적장치와 모의표적용 혼안테나를 설치하였으며, ISAR 영상모드 확인을 위해 포토닉스 기반 레이더 장치에서 약 80 m 떨어진 위치에서 DJI사의 M600 드론을 운용하였다.

그림 16은 모의표적장치를 이용한 탐지추적모드 시험을 수행결과를 보여준다. 시험결과, 원거리장의 90 배의 거리에서부터 표적을 탐지해서 추적하고, 원거리장의 45 배의 거리까지 추적을 수행하는 것을 확인하였다. 드론을 이용하여 ISAR 영상모드 시험을 수행하였다. 드론은 지상에서 약 25 m 공중으로 띄우고, 레이더 안테나와 거리

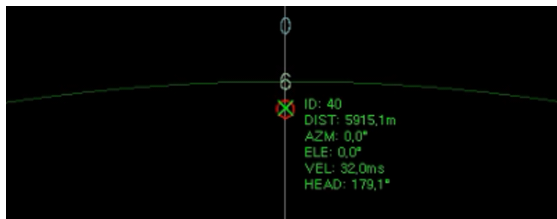
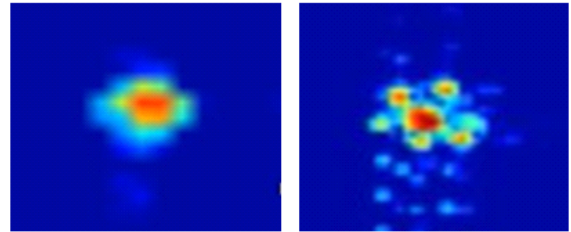


그림 16. 모의표적장치를 이용한 탐지거리 측정결과
Fig. 16. Measured result of detection range by using radar target simulator.



(a) Drone (M600)



(b) 5 % (X-band)

(c) 20 % (X-band)

그림 17. 드론을 이용한 ISAR 영상 측정결과
Fig. 17. Measured results of ISAR image using drone.

는 약 80 m인 위치에서 시험을 수행하였다. ISAR 영상모드의 대역폭을 X-band의 5 %와 X-band의 20 % 두 가지 경우에 대해 시험을 수행하여 대역폭에 의해 영상품질이 개선되는 것을 확인하였다. 그림 17은 ISAR 영상모드 시험결과이다. 기존 RF 기반 레이더에서와 같이 대역폭이 X-band의 5 %와 같이 광대역 신호 생성 및 처리에 제한이 있을 경우, 드론이 하나의 포인트로 보여 물체 식별이 불가능하다. 하지만 광대역 특성을 갖는 포토닉스 기반 레이더 송수신 장치를 이용할 경우, 드론의 몸체와 6개의 모터가 구분되어 식별이 가능한 것을 확인할 수 있다. ISAR 영상의 해상도는 식 (3)에 의해 대역폭에 따른 해상도는 각각 30 cm, 7.5 cm이다.

$$\Delta R = \frac{c}{2B} \quad (3)$$

IV. 결 론

본 논문에서는 광소자를 이용하여 X-band 포토닉스 기반 레이더 송수신 시스템을 설계 및 제작하였다. 주요 모듈에 대한 설계, 제작 및 시험을 통한 성능 검증결과를 기술하였다. 또한 광자기반 레이더의 연동시험과 야외 시험을 통해 탐지추적모드와 ISAR 영상모드 성능을 검증하였

다. 고해상도 ISAR 영상 획득을 위해 DDS에서 생성한 X-band의 5 % 대역폭의 중간주파수 신호를 광소자인 DPMZM에 입력하여 4 체배된 중심주파수 X-band 중심주파수의 20 %에 해당하는 대역폭의 LFM 파형을 생성하고, 출력전력은 장거리모드용 7 W, 단거리모드용 100 mW를 출력한다. 기존 RF 기반 레이더에서와 같이 광대역 신호 생성 및 처리에 제한이 있어 X-band의 5 % 대역폭을 갖는 ISAR 영상으로는 식별이 불가능한 실효적 드론에 대해서 X-band의 20 % 대역폭을 갖는 LFM 파형으로 드론의 몸체와 6개의 모터가 구분되어 식별이 가능한 해상도 7.5 cm의 고해상도 ISAR 영상을 야외시험을 통해 확인하였다.

References

- [1] M. Jian, Z. Lu, and V. C. Chen, "Drone detection and tracking based on phase-interferometric Doppler radar," in *2018 IEEE Radar Conference*, Apr. 2018, pp. 1146-1149.
- [2] B. K. Kim, J. Park, S. Park, T. Kim, D. Jung, and D. Kim, et al., "Drone detection with chirp-pulse radar based on target fluctuation models," *ETRI Journal*, vol. 40, no. 2, pp. 188-196, 2018.
- [3] J. Chung, "Implementation of precise drone positioning system using differential global positioning system,"

Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society, vol. 21, no. 1, pp. 14-19, 2020.

- [4] M. I. Skolnik, *Radar Handbook*, New York, NY, McGraw-Hill, 2008.
- [5] M. A. Richards, J. A. Scheer, and W. A. Holm, *Principle of Modern Radar: Basic Principle*, SciTech, Raleigh, NC, 2010.
- [6] P. Ghelfi, et al., "Photonics in radar systems: RF integration for state-of-the-art functionality," *IEEE Microwave Magazine*, vol. 16, no. 8, pp. 74-83, Sep. 2015.
- [7] P. Ghelfi, F. Laghezza, F. Scotti, G. Serafino, S. Pinna, and D. Onori, et al., "A fully photonics-based coherent radar system," *Nature*, vol. 507, pp. 341-345, 2014.
- [8] R. W. Ridgway, C. L. Dohrman, and J. A. Conway, "Microwave photonics programs at DARPA," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 32, no. 20, pp. 3428-3439, Oct. 2014.
- [9] 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.
- [10] Y. Bae, M. Yi, J. Shin, and S. Lee, "X-band photonic-based pulsed radar architecture with a high range resolution," *Applied Sciences*, vol. 10, no. 18, p. 6558, 2020.

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

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

박 신 명 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-0594-337X>



2011년 2월: 홍익대학교 전자전기공학부 (공학사)
2013년 2월: 홍익대학교 전자정보통신공학과 (공학석사)
2018년 8월: 홍익대학교 전자정보통신공학과 (공학박사)
2019년 6월~현재: LIG넥스원 선임연구원

[주 관심분야] 전파 산란, 레이더 신호처리

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 책임

연구원

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

경 민 구 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-2946-4760>



2010년 6월: 한국항공대학교 항공전자및통신공학부 (공학사)
2013년 2월: 한국항공대학교 정보통신공학과 (공학석사)
2013년 4월~현재: LIG넥스원 선임연구원
[주 관심분야] 시스템 엔지니어링, 소프트웨어 설계

신 진 우 [국방과학연구소/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-1841-8451>



1995년 2월: 서울시립대학교 전자공학과 (공학사)
1997년 2월: 서울시립대학교 전자공학과 (공학석사)
2014년 8월: 서울시립대학교 전자공학과 (공학박사)
1997년 2월~현재: 국방과학연구소 책임

연구원

[주 관심분야] 전자파 해석, 디지털 능동위상배열 안테나, 레이더 시스템, 광자 레이더