

고해상도 ISAR 영상을 위한 광자 기반 FMCW 송수신 시스템 설계

Design of Photonics-Based FMCW Transceiver System for High-Resolution ISAR

류성준 · 배영석 · 이민우 · 장성훈 · 유준형 · 남정빈 · 신진우

Sungjun Yoo · Youngseok Bae · Minwoo Yi · Sunghoon Jang · Joon Hyung Ryoo · Jeongbin Nam · Jinwoo Shin

요 약

본 논문에서는 고해상도 ISAR(inverse synthetic aperture radar) 영상을 위한 광자 기반 레이더용 송수신 시스템 설계 기술을 제안하였다. 제안된 광자 기반 레이더 송수신 시스템은 광소자를 이용하여 광대역 특성의 파형을 도출하였으며, 레이더 송수신 시스템의 대역폭 특성에 따른 표적 탐지 성능을 레이더 시스템의 모델링 및 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 최종적으로 이를 검증하기 위해 제안된 송수신 시스템을 제작하고, 소형 표적인 드론을 이용하였으며, 제안된 송수신 시스템의 대역폭이 증가함에 따라 고해상도 ISAR 영상 획득이 가능함을 확인하였다.

Abstract

This paper proposes a design for a photonics-based radar system for high-resolution inverse synthetic-aperture radar (ISAR) images. The proposed radar system can derive broadband characteristics using optical elements, such as phase modulator, laser source, and dual parallel Mach-Zehnder modulator (DPMZM). The detection performance and ISAR images for the target are observed according to the bandwidth of the radar system using modeling and simulation (M&S) for the proposed radar system. To verify the effectiveness of the bandwidth of the radar system, the proposed radar system are fabricated, and its performances are measured using a small drone in a practical environment. The results prove that the proposed FMCW radar system is a suitable candidate to overcome the limitations of bandwidth and high resolution.

Key words: Radar, Microwave Photonics-Based Radar, Photonic Radar, Radar Transceiver System

I. 서 론

최근 무인기 및 드론과 같은 소형 비행체의 기술이 점차 발전함에 따라 기체의 크기의 소형화, 무게의 경량화 및 비행거리 증가 등이 가능해졌으며, 이는 기존 레이더 시스템을 위협하는 표적으로 발전하고 있다^{[1][2]}. 이와 같은 이유로 레이더 시스템의 다기능 및 다중 대역 감시 등

성능의 고도화가 요구됨에 따라 광대역 및 저 잡음 특성을 갖는 레이더 시스템의 필요성이 증가하고 있으며, 전자소자를 이용한 레이더 시스템의 기술적 한계를 극복하기 위해 광자 기반 마이크로파 기술(microwave photonics)이 제안되었다^[3]. 광자 기반 마이크로파 기술은 광대역 특성, 저 손실 및 저 전파왜곡, 주파수 유연성 등의 장점을 가지고 있어 소형 비행체를 식별하는 데 장점이 있다

국방과학연구소 (Agency for Defense Development)

· Manuscript received November 19, 2020 ; Revised December 24, 2020 ; Accepted February 1, 2021. (ID No. 20201119-014S)

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

[4],[5]. 무인기 및 드론과 같은 소형의 표적을 정확히 탐지하기 위해 광자 기반 마이크로파 기술을 적용하여 RCS (range cross section)가 $1 \sim 100 \text{ m}^2$, 레이더로부터 표적까지의 거리 약 $1 \sim 1,200 \text{ m}$ 에서 탐지한 선행연구가 발표된 바 있다. W-대역에서 고해상도 ISAR 영상을 획득하기 위해 93 GHz의 중심주파수 및 8 GHz 대역폭의 시스템을 설계한 연구가 제안되었으나, 탐지거리 및 표적의 RCS는 각각 0.8 m , 2.52 m^2 로 확인되었다^[5]. 또한 소형 표적을 탐지하기 위한 시스템으로 K-대역에서 8 GHz의 대역폭을 갖는 시스템을 제안한 연구가 있으나, 탐지거리는 5 m 이하의 성능을 보이며, 실내 환경을 갖는 실험실 수준의 연구로 확인된다^{[6]~[8]}. 실제 광자 기반 레이더 송수신 시스템이 사용될 외부 환경을 고려하여 시스템으로부터 1,200 m 떨어진 거리에서 Boeing 737을 표적으로 ISAR 영상을 획득한 연구가 발표되었으나, 표적의 RCS가 약 100에 근접하므로 스텔스기, 드론, 무인기 등의 낮은 RCS를 탐지하는 데 어려움이 있을 것으로 사료된다^[9]. 이와 같이 발표된 선행 연구는 광자 기반의 마이크로파 기술을 이용하여 기술의 가능성을 확인하는 수준에 머물러 있으며, 실제 레이더 시스템 체계에 주로 사용되는 X-대역에서 적용 가능성에 대한 연구 결과는 전무한 실정이다.

본 논문에서는 고해상도 ISAR(inverse synthetic aperture radar) 영상을 위한 광자 기반 FMCW(frequency modulated continuous wave) 레이더용 송수신 시스템 설계 기술을 제안한다. 제안된 송수신 시스템은 광대역 특성을 얻기 위해서 레이저 신호원, DPMZM(dual-parallel Mach-Zehnder modulator) 등의 광소자를 이용하여 X-대역에서 2 GHz 대역폭의 신호를 생성하였다. 대역폭에 따른 레이더 시스템의 성능을 분석하기 위해서 광자 기반 송수신 시스템 및 ISAR 영상획득 알고리즘을 모델링하였으며, 이를 이용하여 제안된 시스템의 성능을 사전에 예측하였다. 최종적으로 고해상도 ISAR 영상 획득이 가능한 FMCW 송수신시스템을 제작하였으며, 이를 이용하여 실방사 환경에서 대역폭에 따른 ISAR 영상 및 표적 탐지 성능을 확인하였다.

II. 광자 기반 송수신 시스템 및 ISAR 모델링

2.1 광자 기반 송수신 시스템 설계

그림 1은 광자 기반 FMCW 송수신 시스템 구성도를

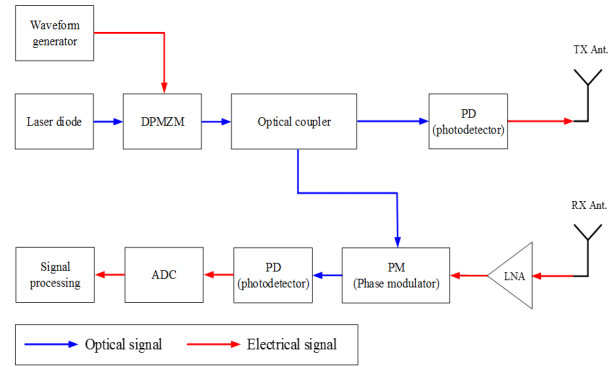


그림 1. 광자 기반 FMCW 송수신 시스템 구성도

Fig. 1. Schematic of the proposed photonic-based FMCW transceiver system.

보여준다. 광자 기반 송수신 시스템은 기존 전자식 레이더 시스템에 적용되는 DDS(Direct Digital Synthesizer) 방식이 아닌 레이저 신호원, DPMZM 등의 광소자를 이용하여 광대역 특성을 도출한다^[3]. 레이저 다이오드에서 발생된 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$E_i = E_c \cos(w_c t) \quad (1)$$

여기서 E_c 는 인가된 신호의 크기, w_c 는 레이저 주파수이다.

레이저 신호원과 중심주파수 2.5 GHz, 대역폭 500 MHz를 갖는 IF(intermediate frequency) 신호가 DPMZM으로 인가되며, 레이저 신호원에서 인가된 신호는 DPMZM을 거쳐 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{DPMZM}(t) = E_c \left[\sum_{n=1}^{\infty} J_{4n-2}(m) \left\{ \cos(2\pi(f_c + (4n-2)f_{IF})t) + \cos(2\pi(f_c - (4n-2)f_{IF})t) \right\} \right] \quad (2)$$

여기서 f_{IF} 는 기저대역 주파수, m 은 DPMZM에서 변조수 차수, J_{4n-2} 는 Bessel 함수에서 $(4n-2)$ 차수를 의미한다. 식 (2)에서 2차 이상의 고주파 신호원이 매우 작으므로 근사화하면 식 (3)과 같이 표현할 수 있다^[10].

$$E_{DPMZM}(t) \cong E_c J_2(m) \left[\cos(2\pi(f_c + 2f_{IF})t) + \cos(2\pi(f_c - 2f_{IF})t) \right] \quad (3)$$

위의 식과 같이 중심주파수 2.5 GHz, 대역폭 500 MHz를 갖는 IF 파형은 DPMZM을 거쳐 4 체배 되어 중심주파

수 10 GHz, 대역폭 2 GHz의 신호로 변환된다. 광소자 기반을 이용하여 생성된 파형은 기존의 레이더의 믹서 및 필터 등과 같은 전자소자 없이 생성된 신호이기 때문에 신호대비 잡음 특성이 우수하며, 광 신호원 및 DPMZM을 이용하여 대역폭 특성을 효과적으로 늘릴 수 있다^{[3],[8],[10]}.

생성된 광대역 파형은 송신안테나를 통해 표적으로 방사되며, 표적에 반사되어 돌아오는 신호는 수신안테나를 통해 수신한다. DPMZM을 거친 송신신호와 수신안테나를 통해 들어온 신호는 PM(phase modulator)으로 인가되며, 이는 PD(photo detector)를 거쳐 전기신호로 변환되어 신호처리를 수행하여 표적의 거리 및 ISAR 영상을 획득한다.

2.2 ISAR 영상 시뮬레이션 및 분석

제안된 광자 기반 레이더 시스템의 ISAR 영상을 대역폭에 따라 사전에 예측하기 위해서 ISAR 영상획득 알고리즘을 모델링 및 시뮬레이션하였다. 제안된 레이더 시스템의 대역폭에 따라 표적의 1차원 영상인 HRRP(high resolution range profile)와 ISAR 영상의 변화를 확인하였다. 그림 2는 제안된 송수신 시스템의 성능평가를 위해 산란체 표적을 모델링한 형상을 보여준다. 레이더 관점에서 표적은 산란점들의 공간적인 분포로 나타낼 수 있으며, 고주파에서는 표적 산란파는 여러 개의 산란점에 의

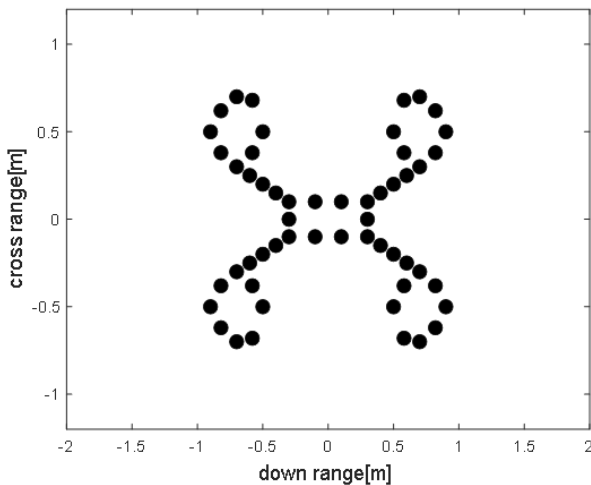


그림 2. 레이더 성능 평가를 위한 점 산란체 표적
Fig. 2. Scattering target for evaluating the ISAR images.

해서 산란된 전자파의 합으로 표현된다^[11].

$$x(m,n) = \sum_{k=1}^K s_k e^{\frac{j4\pi f_m}{c}(x_k \cos\theta_k + y_k \sin\theta_k)} + u(m,n) \quad (4)$$

여기서 K 는 표적의 산란점 개수를 나타내며, s_k 는 각 산란점의 크기를 의미한다. c 는 빛의 속도로 3×10^8 m/sec이며, $u(m,n)$ 은 평균값이 0인 AWGN(addictive white Gaussian noise)이다.

표적을 구성하는 각 산란점에 대한 수신 신호는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있으며, BW 는 대역폭, PW 는 펄스폭(pulse width)을 나타낸다.

$$R_k(t) = \exp\left\{j2\pi\left(-\frac{BW}{2}(t-\tau_k) + \frac{1}{2}\frac{BW}{PW}(t-\tau_k)^2\right)\right\} \exp\{j2\pi f_c(t-\tau_k)\} \quad (5)$$

각 산란점에 대한 수신신호는 다음의 식 (6)으로 나타낼 수 있으며, 위의 수식을 기반으로 각 산란점의 신호를 합하게 되면 최종적으로 표적 신호를 생성할 수 있다. 그림 2는 제안된 레이더의 성능평가를 위해 산란체 표적을 모델링한 형상을 보여준다.

$$s_k(t) = \exp\left\{j2\pi\left(\frac{BW}{2}(\tau_k - \tau_0) + \frac{1}{2}\frac{BW}{PW}(\tau_0 - \tau_k)(2t - \tau_k - \tau_0)\right)\right\} \exp\{j2\pi f_c(-\tau_k)\} \quad (6)$$

획득된 표적신호를 이용하여 ISAR 영상 획득을 위해서 표적 움직임을 보상하기 위해서는 각 펄스에서 형성된 HRRP에 대해서 거리정렬 및 위상보정을 수행한다. 거리정렬을 위해서 ARP(average range profile) 알고리즘을 사용하였으며, 위상보정을 위해서 MEPA(minimum entropy phase adjustment) 방법을 사용하였다^[12]. 그림 2에서 획득된 산란체 표적이 150 RPM의 회전속도를 갖는다고 가정하였으며, 레이더 송수신 시스템의 대역폭이 변함에 따라 시뮬레이션을 진행하였다.

그림 3은 제안된 레이더 시스템의 대역폭에 따른 ISAR 영상을 확인한 결과를 보여준다. 레이더 시스템의 대역폭이 0.5 GHz에서 4 GHz까지 변함에 따라 산란체 표적에 대한 ISAR 영상을 확인하였다. 대역폭이 높아짐에 따라 산란체 표적이 정확하게 탐지함을 알 수 있으며, 대역폭이 2 GHz 이상일 때 표적의 형상이 보다 정확하게 식별

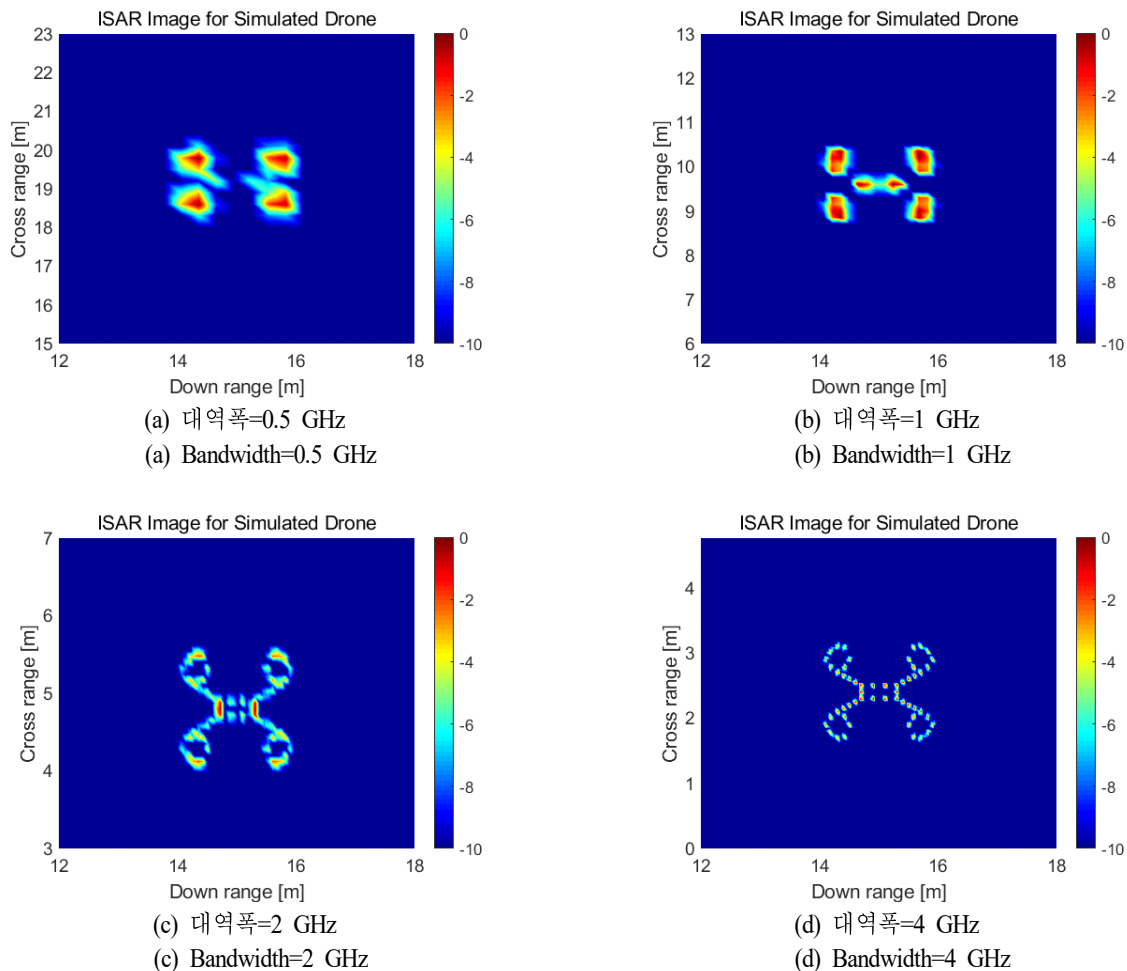


그림 3. 레이더 시스템 대역폭에 따른 표적 ISAR 영상

Fig. 3. ISAR images according to the bandwidth of radar transceiver system.

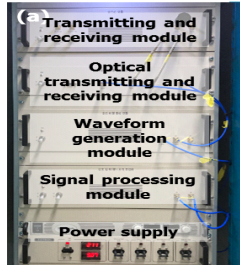
되는 것을 확인하여 제안된 레이더 시스템을 설계할 때 제안된 광자 기반 레이더 시스템의 대역폭은 2 GHz가 되도록 하였다.

III. 제작 및 측정결과

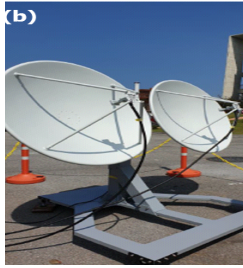
그림 4는 제안된 광자 기반 FMCW 송수신 시스템을 제작된 형상으로 보여준다. 제안된 송수신 시스템은 송수신모듈, 광 송수신모듈, 송신과형생성모듈, 신호 및 데이터처리부, 전원 공급 및 분배장치로 구성된다. 송신 및 수신안테나는 35.6 dB 이득을 갖는 반사판 안테나이고, 드론 표적의 직경은 1.2 m, 날개는 6개로 구성되어 있다.

그림 5는 제안된 광자 기반 FMCW 레이더를 이용하여 고해상도 ISAR 영상 획득이 가능한지 확인하기 위해 대역폭을 0.5 GHz와 2 GHz로 변화시키면서 드론 표적의 ISAR 영상을 확인한 결과를 보여준다. 그림과 같이 제안된 송수신 시스템의 대역폭이 0.5 GHz일 때 드론 표적이 모호하게 보이는 반면, 대역폭을 2 GHz로 조정하였을 때 표적의 몸체, 날개 부분의 모티가 선명하게 식별되는 것을 확인할 수 있다.

표 1은 광자 기반 레이더 송수신 시스템을 이용하여 고해상도 ISAR 영상을 얻기 위한 선행연구와 본 논문에서 제안된 송수신 시스템의 성능 비교를 진행하였다. 표에서



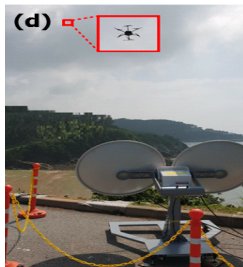
(a) 광자 기반 송수신 시스템 형상
(a) Photonix-based transceiver system



(b) 송신 및 수신 안테나
(b) Photograph of Tx. and Rx. antennas

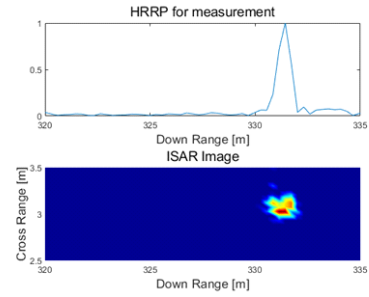


(c) 드론 표적
(c) Photograph of the drone target (M-600)

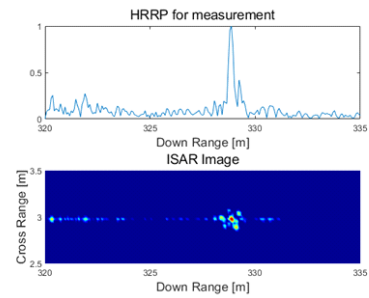


(d) 제안된 레이더 송수신 시스템 운용사진
(d) Photograph of the proposed radar system in operation

그림 4. 제안된 광자 기반 FMCW 송수신 시스템 형상
Fig. 4. Photograph of the proposed photonic-based FMCW transceiver system.



(a) 대역폭=0.5 GHz
(a) Bandwidth=0.5 GHz



(b) 대역폭=2 GHz
(b) Bandwidth=2 GHz

그림 5. 송수신 시스템 대역폭에 따른 ISAR 영상

Fig. 5. ISAR images according to the bandwidth of proposed photonic-based transceiver system.

와 같이 광자 기반 레이더를 실내 실험실 환경에서 가능성을 확인하는 수준에 머물러 있기 때문에 광자 기반 레이더를 X-대역에 적용하여 외부환경에서 성능 시험을 한 결과는 기존 선행 연구와 차별화되는 점이며, 향후 레이더 분야에 활용 가치가 높을 것으로 사료된다. 또한 제안된 광자 기반 송수신 시스템은 RCS가 낮은 드론 표적을 이용하여 1,100 m에서 고해상도의 ISAR 영상을 획득했음을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 광자 기반 레이더 시스템 설계 기술을 제안하였다. 제안된 레이더 시스템은 고해상도 ISAR 영상을 얻기 위해 2 GHz 광대역 특성의 파형을 갖도록 설계되었다. 레이더 시스템의 대역폭을 0.5 GHz에서 4 GHz 까지 변화시키기에 따라 표적 ISAR 영상을 확인하기 위해

표 1. 광자 기반 레이더 송수신 시스템에 관한 연구와 성능 비교

Table 1. Comparison with researches on photonics-based transceiver system.

| Ref. | Frequency (GHz) | Bandwidth (GHz) | Detection range (m) | RCS (m ²) | Target | Field test |
|----------|-----------------|-----------------|---------------------|-----------------------|------------------|------------|
| [5] | 93 | 8 | 0.8 | 2.52 | Metallic plate | Indoor |
| [7] | 22 | 8 | 2.35 | - | Electrical fan | Indoor |
| [8] | 22 | 8 | ~2 | 0.27 | Corner reflector | Indoor |
| [9] | 22 | 8 | 3.5 | - | Corner reflector | Indoor |
| [6] | 35 | 10 | 1,200 | ~100 | Boeing 737 | Outdoor |
| Proposed | 10 | 2 | 1,100 | 0.1 | Drone | Outdoor |

모델링 및 시뮬레이션을 진행하였다. 이를 검증하기 위해 제안된 레이더 시스템을 제작하고, 소형 드론 표적을 이용하여 제안된 레이더 시스템의 X-대역에서 2 GHz의 넓은 대역폭으로 고해상도 ISAR 영상을 획득함을 확인하였다.

References

- [1] C. Kyrkou, T. Theocharides, "Emergency net: Efficient aerial image classification for drone-based emergency monitoring using atrous convolution feature fusion," *IEEE Journal of Selected Topics in Applied Earth Observations and Remote Sensing*, vol. 13, pp. 1687-1699, Mar. 2020.
- [2] K. J. Wu, T. S. Gregory, J. Moore, B. Hooper, D. Lewis, and Z. T. H. Tse, "Development of an indoor guidance system for unmanned aerial vehicles with power industry applications," *IET Radar, Sonar & Navigation*, vol. 11, no. 1, pp. 212-218, Jan. 2016.
- [3] 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, 2017.
- [4] F. Zhang, B. Gao, and S. Pan, "Photonics-based MIMO radar with high resolution and fast detection capability," *Optics Express*, vol. 26, no. 13, p. 17529, 2018.
- [5] S. Peng, S. Li, X. Xue, X. Xiao, D. Wu, and X. Zheng, et al., "High-resolution W-band ISAR imaging system utilizing a logic-operation-based photonic digital-to-analog converter," *Optics Express*, vol. 26, no. 2, pp. 1978-1987, 2018.
- [6] 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, p. 16274, 2017.
- [7] X. Ye, F. Zhang, Y. Yang, and S. Pan, "Photonics-based radar with balanced I/Q de-chirping for interference-suppressed high-resolution detection and imaging," *Photonics Research*, vol. 7, no. 3, p. 265, 2019.
- [8] S. Li, Z. Cui, X. Ye, J. Feng, Y. Yang, and Z. He, et al., "Chip-based photonic radar for high-resolution imaging," 2019. Available: <https://arxiv.org/abs/1905.12802>
- [9] A. Wang, J. Wo, X. Luo, Y. Wang, W. Cong, and P. Du, et al., "Ka-band microwave photonic ultra-wideband imaging radar for capturing quantitative target information," *Optics Express*, vol. 26, no. 16, pp. 20708-20717, 2018.
- [10] Y. Bae, M. Yi, J. Shin, and S. G. Lee, "X-Band photonic-based pulsed radar architecture with a high range resolution," *Applied Science*, vol. 10, no. 18, p. 6558, 2020.
- [11] L. C. Potter, D. M. Chiang, R. Carriere, and M. J. Gerry, "GTD-based parametric model for radar scattering," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 43, no. 10, pp. 1058-1067, Oct. 1995.
- [12] C. Özdemir, *Inverse Synthetic Aperture Radar Imaging with MATLAB Algorithms*, New York, NY, John Wiley & Sons, 2012.

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

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

배 영 석 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-7841-3858>



2009년 2월: 고려대학교 전기전자공학과 (공학사)
2011년 2월: 고려대학교 전기전자컴퓨터공학과 (공학석사)
2011년 1월~현재: 국방과학연구소 선임연구원

[주 관심분야] 광자 레이더 송수신기, 광

마이크로파 기술

유 준 형 [국방과학연구소/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-1726-9159>



1983년 2월: 고려대학교 전자공학과 (공학사)

1990년 2월: 서울대학교 전자공학과 (공학석사)

2015년 12월~현재: 국방과학연구소 책임연구원

[주 관심분야] 광자 레이더, 전자전

이 민 우 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-2965-1133>



2005년 8월: 성균관대학교 물리학과 (이학사)

2012년 8월: 한국과학기술원 물리학과 (이학박사)

2012년 9월~현재: 국방과학연구소 선임연구원

[주 관심분야] 고출력 전자파 기술, 테라헤르츠, 배열안테나, 광자 레이더

남 정 빈 [국방과학연구소/기능원]

<https://orcid.org/0000-0003-4222-4822>



2015년 2월: 한국폴리텍바이오대학 생명 의약분석과 (전문학사)

2015년 2월~2016년 8월: 동아쏘시오 홀딩스 백신연구팀 연구원

2017년 3월~현재: 국방과학연구소 기능원

[주 관심분야] Cell Culture, Transfection, PCR, 광자 레이더

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, 레이
다 시스템, 광자 레이더