

소형 무인기 탐지를 위한 FMCW LiDAR 구현에 관한 연구

조병래*, 선선구**¹, 이종민**²

A Study on the Implementation of FMCW LiDAR for Detecting Small UAVs

Byung-Lae Cho*, Sun-Gu Sun**¹, and Jong-Min Lee**²

요 약

본 논문에서는 주파수 변조 연속파형을 사용하는 LiDAR 시스템의 설계 및 구현에 관하여 제안하였다. 주파수 변조 LiDAR 시스템은 수백미터 이내의 소형 무인기를 탐지할 수 있도록 설계하였으며, 구성품들은 구매가 용이한 상용 부품들로 선정하였다. 제안한 LiDAR의 센서는 1개의 채널로 제작하였으며, 구동부를 통해 관심 영역을 스캔하여 표적을 탐지하도록 설계하였다. 신호처리부에서는 이동표적 탐지 모드와 3차원 영상화 모드로 구분하여 운용되도록 구현하였다. 소형 무인기를 이용하여 실제 시험을 수행하였으며, 설계한 LiDAR는 약 200m 이상 떨어진 거리에서도 표적을 탐지할 수 있다는 것을 확인하였다. 또한 건물 부근에서 소형 무인기가 호버링할 경우 3차원 영상화 모드를 통해 표적을 탐지할 수 있다는 것을 확인하였다.

Abstract

In this paper, a design and implementation of a LiDAR system using a frequency modulated continuous wave is proposed. The frequency modulation LiDAR system is designed to detect small UAVs within several hundred meters, and the components are selected as commercial parts that are easy to purchase. The proposed LiDAR sensor is made with one channel and is designed to detect a target by scanning a region of interest through a driving unit. In the signal processing unit, a moving target detection mode and a 3D imaging mode have been implemented to operate separately. Actual tests were performed using a small UAV, and it was confirmed that the designed LiDAR can detect targets from a distance of about 200 meters or more. In addition, it has been demonstrated that when a small UAV hovering near a building, the target can be detected through the 3D imaging mode.

Keywords

laser radar, FMCW waveform, small UAV detection, moving target detection, 3D imaging

* 국방과학연구소 책임연구원
- ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9160-3362>
** 국방과학연구소 수석연구원 (*¹교신저자)
- ORCID¹: <http://orcid.org/0000-0001-6560-8285>
- ORCID²: <http://orcid.org/0000-0003-0511-3226>

· Received: Sep. 28, 2020, Revised: Nov. 02, 2020, Accepted: Nov. 05, 2020
· Corresponding Author: Sun-Gu Sun
Agency for Defense Development, Yuseong P.O.Box 35, DaeJeon, 34186, Korea,
Tel.: +82-42-821-2983, Email: sun988@add.re.kr

I. 서론

최근 소형 무인기에 대한 관심이 폭발적으로 증대되면서 이를 이용한 연구와 관련 산업은 급속도로 발전하고 있다. 초창기에는 적을 정찰하고 공격하는 군사용으로 활용되던 고정익 형태의 무인기는 IT기술 발전에 힘입어 더 작고, 더 가벼워지고, 더 오래 비행이 가능하며 동시에 다양한 비행능력을 보유한 회전익 소형 무인기 등으로 다양화됨에 따라 취미, 산업, 방송 촬영 등 민간분야로 응용분야가 급속히 넓어지고 있다[1][2].

드론과 같은 회전익 소형 무인기는 적용 소재의 특성상 열 발산과 소음이 작고 일반적으로 운용되는 레이더 파장에 대해 반사도가 낮을 뿐만 아니라 자유로이 정지, 기동 및 회전이 가능한 비행특성 때문에 기존의 일반적인 센서로는 탐지 및 추적에 제한이 있다[3]. 이에 따라 기존의 센서 데이터를 이용하여 회전익 소형 무인기를 탐지 및 추적하기 위한 연구들이 활발히 진행되고 있다[4]. 또한 군사용 거리 측정기(LRF, Laser Range Finder), 자동차 충돌 방지용 LiDAR(Light Detection and Ranging) 등의 분야에 활용되어온 레이저를 이용하여 움직이는 물체를 탐지하는 연구도 진행되고 있다[5].

고속, 고신뢰성 및 비닉성이 요구되는 군사적 부분에서는 펄스방식 LiDAR를 중심으로 기술발전이 진행되어왔다. 펄스 방식 LiDAR는 수 ns의 고속 펄스를 표적에 조사하고, 반사되어 검출되기까지의 시간을 직접 측정하여, 거리를 측정하는 방식이다. 장거리 및 고정밀 측정을 위해서는 고속 신호처리회로와 고민감도 검출기 및 고출력 광원의 개발이 필요하다. 최근 20년간의 기술발전으로 인해 검출기는 단일광자 수준의 민감도를 확보하게 되었으며, 광원의 경우에도 수백 kW(펄스 반복률 수백 kHz 수준)에서 수 MW(펄스 반복률 수십 Hz 수준)급의 출력을 확보하게 되었다. 그러나, 여전히 장거리 표적탐지를 위해서는 지나치게 높은 검출기 민감도와 레이저의 출력이 요구되고 이로 인해 시스템이 크기가 커지고, 외부 잡음에 대해 민감해지는 단점이 있다[6][7].

최근에 이러한 펄스 방식 LiDAR의 단점을 극복

하기 위해 결맞음 주파수 변조(FMCW, Frequency Modulated Continuous Wave) LiDAR 기술이 활발히 연구되고 있다. 결맞음 방식 LiDAR는 간섭효과에 의해 미약해진 표적반사 신호를 증폭시켜 측정하므로, 직접 측정 방식에 비해, 더 높은 민감도를 얻을 수 있으면서도, 높은 성능의 검출기가 필요하지 않아 레이저 출력 측면에서 효과적으로 운용이 가능하다[6]. 본 논문에서는 결맞음 방식 LiDAR로 구성된 센서부, 센서부로 통해 획득되는 신호를 처리하고 제어하는 신호처리부, 센서를 구동하여 일정한 영역을 스캔할 수 있는 구동부로 이루어진 주파수 변조 LiDAR 시스템 구현에 관하여 제안하였다. 구현된 주파수 변조 LiDAR 시스템은 주변 환경에 대한 3차원 영상화 모드와 이동 표적 탐지를 위한 모드로 구성하였으며, 실제 드론을 이용하여 탐지 시험을 수행하였다.

II장에서는 주파수 변조 LiDAR 시스템의 설계 결과를 서술하고, III장에서는 실제 시험 결과들을 보여준다. IV장에서는 구성품 설계 결과 및 시험 결과를 통해 결론을 도출한다.

II. 주파수 변조 LiDAR 시스템 구성

2.1 시스템 설계

주파수 변조 LiDAR 시스템은 수 백 미터 이내의 소형 무인기 표적에 대한 거리 및 속도를 획득할 수 있도록 설계되었다. 순간시계(IFOV) 0.1°의 송수신빔을 사용하여 탐지 영역을 스캔하도록 설정하였다. 레이저 파장은 눈의 안전 및 사용부품의 가용성을 고려하여 1550nm로 하였다.

레이저의 평균출력 P_T 가 표적에 조사될 때, 표적에 반사되어 검출기에 입사되는 표적반사 레이저의 출력 P_R 에 대한 LiDAR 방정식은 다음과 같은 식으로 주어진다[8].

$$P_R = P_T \left(\frac{IFOV}{\theta_t} \right)^2 \left(\frac{\rho_T}{\Omega_T} \right) \left(\frac{\pi D_A^2}{4R^2} \right) \sigma T_A^2 T_T T_R \quad (1)$$

여기서, $IFOV$ 는 순간시계를, θ_t 는 송광레이저의

발산각을 나타낸다. ρ_T 와 Ω_T 는 표적반사율과 표적 반사 입체각을 각각 나타낸다. D_A 와 R 는 수광광학계의 유효구경과 표적거리를 각각 나타낸다. σ 는 송광 레이저 빔의 크기와 표적의 단면적간의 비율을 나타내고, T_A , T_T , T_R 은 대기투과도, 송광광학계의 투과도, 수광광학계의 투과도를 각각 나타낸다. 순간시계(IFOV) 0.1° 와 광섬유의 직경($10.1\mu\text{m}$)으로부터 송수광광학계의 유효 구경 1.5mm 가 얻어졌다. 또한 표적 반사율 0.2, 거리 200m, 레이저 모듈의 출력 2W일 때 신호처리부 입력단에서의 신호대 잡음비는 약 19dB이며, 신호처리단에서의 이득을 고려하였을 때 200 미터 이상에서 소형 무인기의 탐지가 가능하도록 설계되었다.

표적 탐지를 위하여 그림 1과 같이 송신 파형은 주파수 변조 방식을 적용하였다. 송신 파형과 수신 파형의 차에 의해 생기는 신호를 비트 신호(주파수 영역에서는 비트 주파수)라 한다. 비트 주파수는 상승 변조 구간에서는 $f_{Beat} = f_d + f_{rd}$, 하강 변조 구간에서는 $f_{Beat} = f_d - f_{rd}$ 이며, f_d 는 속도에 의해 발생하는 도플러 주파수이고 f_{rd} 는 표적과의 거리에 의해 생기는 주파수이다. 주파수 변조폭(대역폭) 1.5GHz, 변조 시간(τ_c) $50\mu\text{s}$, 표적 거리 400 m, 표적 속도 10m/s 일 때, f_{rd} 는 80MHz, f_d 는 12.9MHz이다. 이에 아날로그-디지털 변환기의 샘플링 주파수는 200MHz 이상이 되도록 설계하였다.

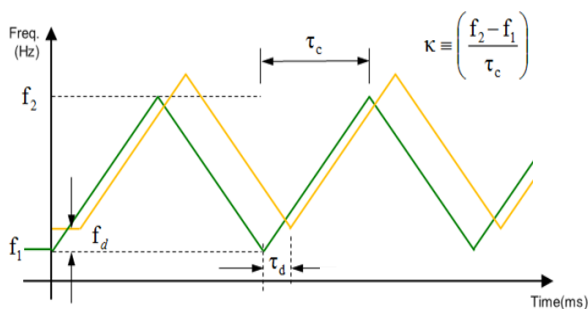


그림 1. 주파수 변조를 이용한 송수신 신호
Fig. 1. Transmitted and received signals using frequency modulation

소형 무인기를 탐지하기 위해 구현된 주파수 변조 LiDAR 시스템은 센서부, 신호처리부, 구동부로 구성되며, 상세 구현 결과는 아래 장에 서술하였다.

2.2 센서부

센서부는 주파수 변조 레이저를 발진/증폭하여 표적에 조사하고, 표적에서 반사된 신호를 획득하여 신호처리부에 전송한다. 센서부는 그림 2와 같이 레이저 발진기/변조기, 증폭기, 송수광 광학계, 고속 레이저 수신기로 구성되며, 전원 공급을 위한 전원 공급장치와 센서 보호를 위한 하우징으로 구성된다.

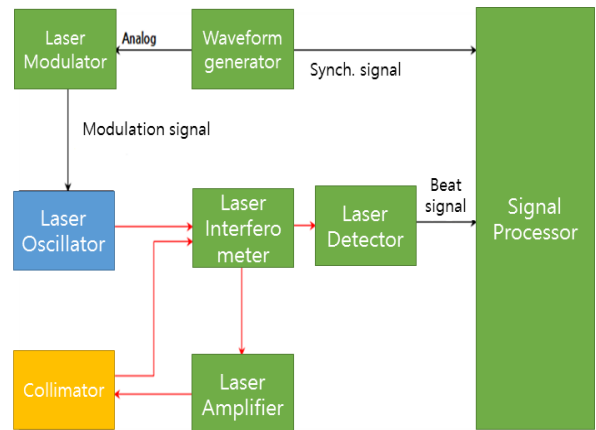


그림 2. 센서부 블록도
Fig. 2. Block diagram of sensor part

레이저 발진기는 레이저의 결맞음 특성(Coherence)이 유지되도록 좁은 선폭(Narrow linewidth)를 가지는 Thorlabs 사의 SFL1550P 레이저 다이오드를 사용하였다. 레이저 다이오드 모듈을 장착하기 위한 마운트는 Thorlabs 사의 LM14S2로 선정하였으며, 레이저 다이오드에서 발생된 열을 외부로 배출하기 위한 냉각핀과 레이저 다이오드의 전류 제어 및 온도 제어를 위한 컨넥터가 장착되어 있다.



그림 3. 레이저 발진기 형상
Fig. 3. Shape of laser oscillator

레이저 변조기는 발진된 레이저의 주파수를 주파수 변조 파형으로 변조한다. 변조기는 레이저 다이

오드의 구동 전류를 제어하는 레이저 전류 제어기와 온도를 제어하는 레이저 온도 제어기로 구성된다. 레이저 전류 제어기는 Thorlabs의 LDC 210C, 레이저 온도 제어기는 Thorlabs 사의 TED 200C로 선정하였다. 또한 구동 전류와 발진 레이저 주파수와 관계가 선형적이지 않으므로 미리 구동 전류와 발진 레이저 주파수와의 관계를 측정하여 의도적으로 왜곡된 구동 전류를 인가하여 레이저 발진 주파수를 선형화하였다[6].

레이저 증폭기는 발진 및 변조된 레이저를 높은 출력으로 증폭하여 표적에 조사하기 위해 사용된다. 2.1 절에서 시스템 설계 시 고려하였던 2W 출력 파워를 제공하는 증폭기로 KEOPSYS 사의 CEFA-C-BO-HP를 선정하였다.



그림 4. 레이저 증폭기의 형상
Fig. 4. Shape of laser amplifier

송수광 광학계는 발진 및 변조된 레이저를 표적에 조사하고, 표적으로부터 반사된 레이저를 검출기에 결상하는 기능을 수행한다. 그림 5는 선정된 Thorlabs사의 F230APC-1550의 형상을 보여주고 있다.



그림 5. 송수광 광학계 형상
Fig. 5. Shape of fiber collimator

고속 레이저 수신기는 입사된 레이저 신호를 전기 신호로 변환하는 기능을 수행한다. 일반적으로 coherent LiDAR 시스템에서는 검출기 자체의 민감

도가 높은 경우 국부 발진기(local oscillator)의 출력으로 인해 포화가 발생하므로 Photo-Diode를 사용한다. 또한 coherent LiDAR 시스템의 출력 신호에는 항상 DC 성분이 포함되어 있어 이를 제거하기 위해 균형 검출기(balanced detector)를 적용하며, Thorlabs 사의 균형 검출기인 PDB420C-AC를 선정하였다.



그림 6. 고속 레이저 수신기 형상
Fig. 6. Shape of high speed laser detector

2.3 신호처리부

신호처리부는 센서부로부터 수신된 비트 신호를 양자화하여 신호처리/표적 추출 과정을 거쳐 제어/전시 컴퓨터로 전송하는 기능을 수행한다.

타이밍 발생 모듈은 센서부에서 수신된 동기 신호를 기준으로 신호처리 모듈의 아날로그-디지털 변환기(ADC, Analog-Digital Converter)의 시작 동기 신호를 생성하고, 신호제어 모듈의 제어 동기 신호를 생성한다. 표준 VME(Versa Module Eurocard) 인터페이스 6U 크기의 보드 내부에 FPGA IP 모듈이 함께 조립된 형태로 구성하였다.

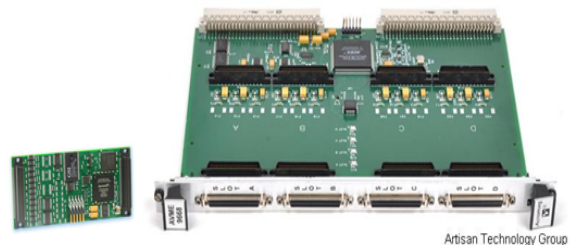


그림 7. 타이밍 발생 모듈 형상
Fig. 7. Shape of timing generation module

신호처리 모듈은 250 Mega-samples/sec 아날로그-디지털 변환기가 내장된 GE ICS-1572A를 선정하였다. 표적 탐지를 위한 오경보율(CFAR, Contant False Alarm Rate) 알고리즘 등 사용자 코드는 FPGA에 삽입하였다.



그림 8. 신호처리 모듈 형상
Fig. 8. Shape of signal processing module

센서부 구동제어 모듈은 구동부를 제어하기 위해 신호제어 모듈에서 수신된 명령에 따라 제어 신호를 생성하며 표준 PMC(PCI Mezzanine Card)인 GE SPR418A를 선정하였다.

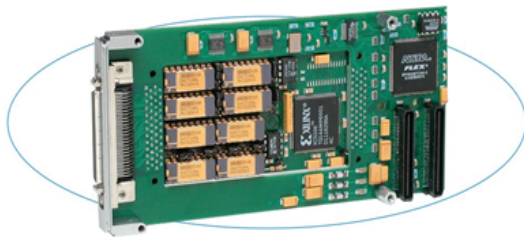


그림 9. 센서부 구동제어 모듈 형상
Fig. 9. Shape of driving control module of sensor part

신호제어 모듈은 신호처리 모듈에서 처리된 비트 신호의 정보를 통해 최종 표적의 거리와 속도로 변환하여 전시 컴퓨터로 전송하는 기능을 수행한다. 또한 탐지 영역의 스캔 주기에 맞추어 구동부가 움직일 수 있도록 제어를 담당하며, 상용 인텔 i7 CPU 기반의 VME SBC(Single Board Computer)를 선정하였다.

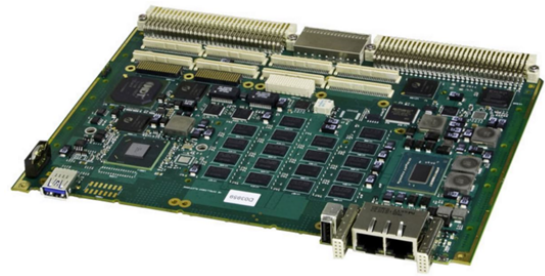


그림 10. 신호제어 모듈 형상
Fig. 10. Shape of signal control module

2.4 구동부

구동부는 레이저 센서를 수평/수직 방향으로 고속/정밀하게 제어하기 위한 것으로, Thorlabs사의 검류계 스캐너(Galvanometer scanner)를 선정하였다. 검류계의 거울은 반사율 및 내구성을 고려하여 금 코팅을 선정하였다. 은 코팅이 투과율 측면에서는 우수하나 산화 등 화학적 안정성이 높은 금 코팅을 적용하였다.



그림 11. 검류계 스캐너 형상
Fig. 11. Shape of galvanometer scanner

III. 실험 결과

그림 12는 실제 제작된 주파수 변조 LiDAR 시스템 형상을 보여주고 있다. 시스템의 크기는 가로×깊이×높이가 각각 600mm×650mm×800mm이며, 하부에 바퀴를 장착하여 이동이 용이하도록 하였다. 신호처리부에서 오경보율 처리 알고리즘은 CA-CFAR(Cell Average-CFAR)를 적용하였으며[9], 임계치는 탐지

모드 시 통상적으로 많이 사용되는 탐지 확률 0.5, 오경보율 10^{-6} 로 하여 결정하였다. 인접 빔에 연속해서 탐지되었을 경우 무게 중심법을 활용하여 연관처리를 수행하였다.

그림 13은 소형 무인기 탐지시험을 위한 장소를 보여주고 있다. 좌측 중간쯤 주파수 변조 LiDAR 시스템을 설치하고 오른쪽 하단 지역에서 소형 무인기(DJI사 멀티콥터)를 비행시켰다. 주파수 변조 LiDAR 시스템 앞에 80m에서 150m 사이에 철조망 및 작은 컨테이너 등의 클러터들이 존재한다. 그림 14와 15는 소형 무인기를 220m 부근에서 탐지한 결과를 보여주고 있다.

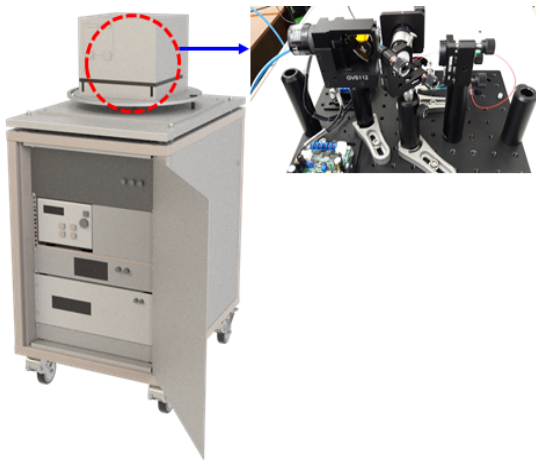


그림 12. 주파수 변조 LiDAR 시스템 형상
Fig. 12. Shape of FMCW LiDAR system



그림 13. 소형 무인기 탐지시험 장소
Fig. 13. Test site for detecting mini-UAVs

그림 14는 탐지된 모든 표적에 대해 거리-방위각 도메인, 거리-고각 도메인으로 나누어 표시한 것이다. 그림 15는 정지된 표적을 제외한 표적들만 3차원 도메인 상에 표시한 것이다. 본 시스템의 신호처리부에 추적 필터를 적용하지 않아 표적 이외에 오표적들이 나타나는 것을 확인할 수 있다.

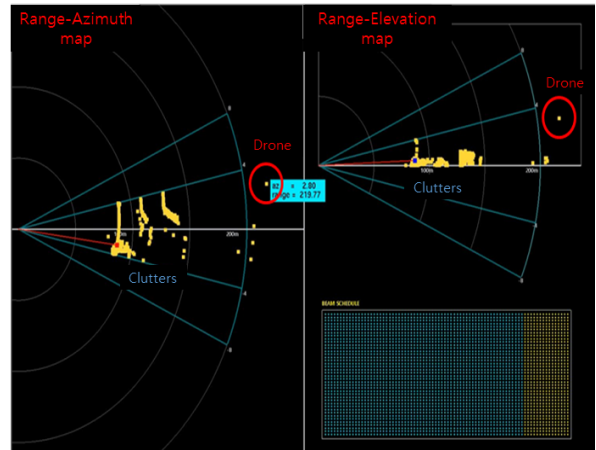


그림 14. 소형 무인기 탐지시험 2차원 결과
Fig. 14. 2D result for detecting test of mini-UAVs

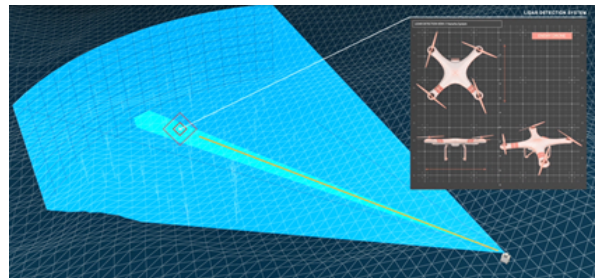


그림 15. 소형 무인기 탐지시험 3차원 결과
Fig. 15. 3D result for detecting test of mini-UAVs

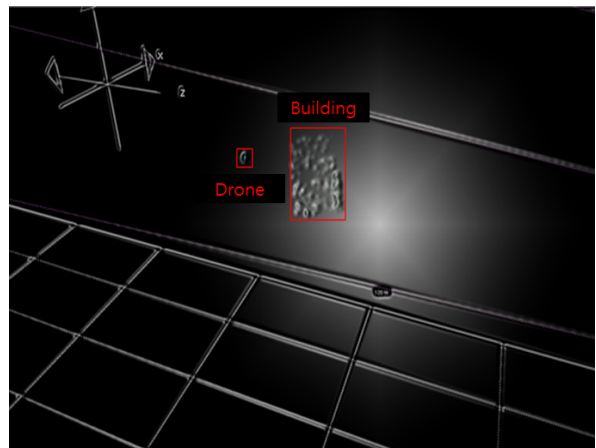


그림 16. 3차원 영상화 모드 시 전시화면
Fig. 16. Display screen in 3D imaging mode

그림 16은 소형 무인기가 건물에 접근 후 호버링하여 이동 표적 탐지모드에서 탐지가 되지 않아 3차원 영상화 모드로 변경하여 탐지한 결과를 보여주고 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 주파수 변조 LiDAR 시스템의 구현에 관하여 제안하였으며, 제작된 시스템을 통해 소형 무인기 탐지 시험을 수행하였다. 시스템의 구성품들은 구매가 용이한 상용 부품들을 선정하여 구성하였다. 본 논문에서는 400m 이내에서 소형 무인기들이 탐지될 수 있도록 설계하여 제작하였다. 센서부는 1개 채널로 구성하여 구동부를 통해 관심영역을 스캔하도록 설계하였다. 실제 소형 무인기를 활용하여 탐지 시험을 수행하였으며, 220m 이상 떨어진 거리에서도 표적을 탐지할 수 있다는 것을 확인하였다. 또한 소형 무인기가 건물 근처에서 호버링 시, 이동 표적 탐지 모드에서는 표적이 탐지되지 않았으나, 3차원 영상화 모드를 활용하여 표적을 탐지할 수 있다는 것을 확인하였다. 향후에는 탐지 거리 확대, 탐지 영역 스캔 속도 향상 및 오경보율 감소를 위한 고출력 증폭기 적용, 센서부의 배열화, 신호처리 알고리즘의 고도화 등의 연구가 진행되어야 할 것이다.

References

[1] J. M. Lee, S. G. Sun, B. L. Cho, J. S. Lee, E. H. Lee, J. P. La, S. P. Hong, and J. P. Kim, "Development of Small Target Detection System using Optical Modulation Characteristics", KIMST Annual Conference Proceedings, Jeju, Korea, pp. 449-450, June 2018.

[2] S. H. Lee and D. S. Ko, "Protective Tree Management Technique using LiDAR 3D Scan Data", Journal of KIIT, Vol. 18, No. 9, pp. 99-106, Sep. 2020.

[3] D. Pistoia, "Detecting and Neutralizing Mini-Drones: Sensors and Effectors against an Asymmetric Threat", The Journal of the JAPCC,

Iss. 25, pp. 81-86, 2018.

[4] J. H. Choi, K. B. Kang, S. G. Sun, J. S. Lee, B. L. Cho, and K. T. Kim, "Efficient Detection of Small Unmanned Aerial Vehicles in Cluttered Environment", The Journal of KIEES, Vol. 30, No. 5, pp. 389-398, May 2019.

[5] S. Crouch, "Velocity measurement in automotive sensing: How FMCW radar and lidar can work together", IEEE Potentials, Vol. 39, No. 1, pp. 15-18, Jan-Feb. 2020.

[6] J. P. La, J. S. Lee, B. L. Cho, S. G. Sun, and J. M. Lee, "Fiber Optic Interferometer and Frequency Linearization Algorithm of Coherent FMCW LiDAR System", KIMST Annual Conference Proceedings, Jeju, Korea, pp. 175-176, June 2017.

[7] R. R. Reibel, N. J. Greenfield, T. J. Berg, B. M. Kaylor and P. A. Roos, Z. W. Barber, and D. M. Klumpar, "Ultra-Compact LADAR Systems for Next Generation Space Missions", 24th Annual AIAA/USU Conference on Small Satellites, SSC10-I-9, Logan, UT, USA, pp. 1-11, Aug. 2010.

[8] J. P. La, J. S. Ko, and C. J. Lee, "System Design and Performance Analysis of 3D Imaging Laser Radar for the Mapping Purpose", Journal of the KIMST, Vol. 17, No. 1, pp. 90-95, Feb. 2014.

[9] M.I. Skolnik, "Introduction to radar systems", 3rd Ed. McGraw-Hill, 2001.

저자소개

조 병 래 (Byung-Lae Cho)



1999년 2월 : 경북대학교
전자전기공학부 (공학사)
2001년 2월 : 포항공과대학교
전자전기공학과 (공학석사)
2005년 2월 : 포항공과대학교
전자전기공학과 (공학박사)
2005년 3월 ~ 2006년 1월 :

포항공과대학교 전자전기공학과 (연구원)
2006년 1월 ~ 현재 : 국방과학연구소 책임연구원
관심분야 : 레이더 신호처리, 영상레이더 등

선 선 구 (Sun-Gu Sun)



1987년 2월 : 한양대학교
전자공학과 (공학사)
1989년 2월 : 한양대학교
전자공학과 (공학석사)
2003년 2월 : 한국과학기술원 전기
및 전자공학과 (공학박사)
1989년 2월 ~ 현재 : 국방과학

연구소 수석연구원

관심분야 : 레이더 신호처리, 영상레이더, 컴퓨터비전 등

이 종 민 (Jong-Min Lee)



1985년 2월 : 경희대학교 물리학과
(이학사)
1988년 2월 : 경희대학교 물리학과
(이학석사)
2007년 2월 : 충남대학교
전파공학과 (공학박사)
1991년 2월 ~ 현재 : 국방과학

연구소 수석연구원

관심분야 : 특수레이더 개발, 센서(광학, 열상, 대구경
망원경) 개발 등