

Flash 방식 FMCW 라이다의 Coherent Detection을 위한 Array Balanced Photodetector 구현

권순욱*, 최선작*, 백지은*, 노정현*, 김태근**, 이준호°

Implementation of Array Balanced Photodetector for Coherent Detection of a Flash FMCW LiDAR

Kwon Soonwook*, Choi Sunjak*, Baek Jieun*, Roh Cheong Hyun*, Kim Tae Geun**, Lee Junho°

요 약

본 논문에서는 Flash 방식 FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave) 라이다(Light Detection And Ranging; LiDAR) 구현에 적합한 3D 및 4D 센싱을 위하여 Balanced Photodetection 수신기법을 통한 2×2 Array BPD(Balanced Photodetector)를 연구한다. FMCW 라이다는 송신부, 믹싱부, 수신부로 구성했으며, 이를 통해 비트 신호를 수신하였다. 수신된 비트 신호에 FFT(Fast Fourier Transform) 과정을 거쳐 거리 정보를 획득했다. 2×2 Array BPD를 구동하기 위해 회로를 제작했으며, 회로는 반전 증폭기, 차동 증폭기로 구성되어 있다. 파형 발생기를 통해 발생된 신호를 인가하여 제작된 구동 회로를 테스트하였고, 2×2 Array BPD를 FMCW 라이다 시스템에 적용하여 실제 비트 신호를 수집했다. 실험을 통해 비트 신호의 차동 증폭 전, 후를 비교 분석하여 신호의 세기가 증가하는 것을 확인할 수 있다.

키워드 : 라이다, 센싱, 반전 증폭기, 차동 증폭기, 파형 발생기

Key Words : LiDAR, Sensing, Inverting Amplifier, Differential Amplifier, Waveform Generator

ABSTRACT

In this paper, 2×2 Array BPD(Balanced Photodetector) using Balanced Photodetection receiver method is studied for 3D and 4D sensing suitable for Flash-type FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave) LiDAR(Light Detection And Ranging) implementation. The FMCW LiDAR consists of a transmitter, a mixer, and a receiver, and receives a beat signal through this. The received beat signal acquired distance information through the FFT(Fast Fourier Transform) process. A circuit was made to drive the 2×2 Array BPD, and the circuit consists of an inverting amplifier and a differential amplifier. The manufactured driving circuit was tested by applying the signal generated through the waveform generator, and the actual beat signal was collected by applying the 2×2 Array BPD to the FMCW LiDAR system. Through the experiment, it can be confirmed that the signal strength is increased by comparing and analyzing before and after the differential amplification of the beat signal.

* 본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2021M3H4A3A02086938)

• First Author : Korea University, Korea Electronics Technology Institute, kwonsoonwook@keti.re.kr, 학생회원

° Corresponding Author : Korea Electronics Technology Institute, junholee@keti.re.kr, 정회원

* Korea Electronics Technology Institute, {sunjakchoi, bjieun, chroh}@keti.re.kr, 학생회원

** Korea University, tgkim1@korea.ac.kr, 정회원

논문번호 : 202205-067-A-RE, Received April 30, 2022; Revised May 25, 2022; Accepted May 26, 2022

1. 서 론

라이더(Light Detection And Ranging; LiDAR)는 레이저 빛을 조사한 뒤 목표물에 반사되어 돌아오는 빛을 수신하여 목표물까지의 거리, 방향, 속도 등을 측정할 수 있는 기술이다^[1]. 라이더 거리 측정 기술은 크게 ToF(Time of Flight) 기술과 FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave) 기술이 있다. 그 중 FMCW 라이더는 반복적으로 주파수가 변조되는 레이저 빛을 목표물에 조사한 뒤 반사되어 돌아오는 빛과 혼합되어 간섭 현상을 일으키며, 비트 신호를 생성한다. 수신된 비트 신호는 FFT(Fast Fourier Transform) 과정을 통해 주파수로 확인할 수 있다. 비트 주파수는 물체까지의 거리로 인해 광학 경로의 차이가 발생하므로 물체까지의 거리를 측정할 수 있다^[2]. 905nm 파장의 펄스 레이저를 사용하는 ToF 라이더의 경우 물 흡수도가 낮다는 이유로 광 출력이 높아질 경우 Eye-Safety의 치명적인 문제를 야기하는 반면^[3] FMCW 라이더의 경우 1,550nm 파장의 연속파 레이저를 사용하기 때문에 물 흡수도가 높아서 빛이 망막까지 도달하지 못하므로 Eye-Safety를 확보할 수 있다. Flash방식은 라이더 빔 조향 방식 중 하나로 회전 소자를 포함하는 다른 빔 조향 방식과는 달리 목표물을 한 번에 조사하여 2D 이미지를 검출할 수 있다. 2D 이미지를 검출하기 위해서는 수신부가 Array 형태의 수신 소자의 형태로 구성되어야 한다. Flash 방식은 데이터 포착 속도가 빠르며^[4], 회전소자 없이 FoV(Field of View)를 확보하여 내구성을 높일 수 있다는 이점이 있다. 따라서, 1,550nm 파장을 사용하는 FMCW 라이더와 빔 조향 방식으로는 내구성이 높고 소형화가 가능한 Flash 방식의 연구가 필요하다.

본 논문에서는 1,550nm 파장의 DFB(Distributed Feedback Diode) LD(Laser Diode)를 이용하여 FMCW 라이더 시스템을 구현했다. 구현된 FMCW 라이더 시스템은 송신부, 믹싱부, 수신부로 나눌 수 있다. 믹싱부를 통해 빛이 혼합되어 비트 신호를 생성하고 이는 수신부의 BPD(Balanced Photodetector)를 통하여 수신된다. 수신된 비트 신호는 오실로스코프를 통해 분석하고, FFT과정을 통해 주파수로 변환되며 거리 정보를 파악할 수 있다.

그리고 Flash방식에서 2D 이미지를 수신할 경우 Array 형태의 수신 소자가 필요하다. 따라서 Array 형태의 Balanced Photodetection이 가능하도록 2x2 Array BPD를 설계 및 제작했다. 제작한 2x2 Array BPD를 통해 실제 거리를 측정하며 일반 BPD와의 차

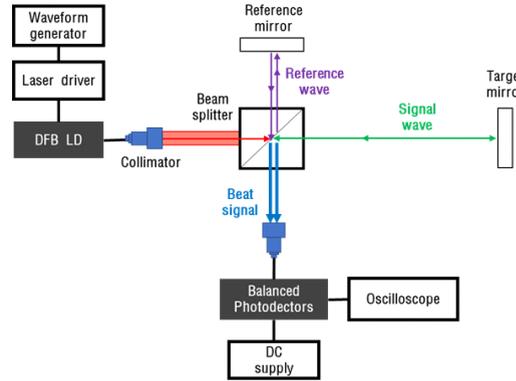


그림 1. 기본적인 FMCW 라이더 시스템 모식도
Fig. 1. Basic FMCW LiDAR system schematic

이에 대해 분석한다. 이러한 Array BPD는 정사각형으로 구성되어 있기 때문에 추가적인 광 부품이 필요할 시에 유연하게 적용 가능하며 균일하게 2D 이미지 수신이 가능하여 정보처리 부분에서도 유리하게 작용할 수 있다.

본문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 FMCW 라이더의 거리 측정 원리와 2x2 Array BPD 설계 및 시뮬레이션에 대해 설명하였으며, 3장에서는 구현된 FMCW 라이더 시스템을 통한 비트 신호 발생으로 일반 BPD와 2x2 Array BPD를 통한 비트 신호 수집을 비교 분석하였다. 4장에서는 비교 분석을 통하여 결론을 맺고, 추후 연구 방향에 대해서 소개하였다.

II. FMCW 라이더 시스템 거리 측정 원리 및 빔 조향 방식과 2x2 Array BPD 설계

2.1 FMCW 라이더 시스템 거리 측정 원리

FMCW 라이더는 레이저가 갖는 중심 주파수의 변조를 기반으로 목표물을 감지한다^[2]. 주파수 변조된 레이저의 빛이 신호파와 참조파로 나뉘지며 서로 다른 경로로 향하게 된다. 신호파는 목표물을 향해 진행하고, 참조파는 참조 거울을 향해 진행한다. 목표물에 반사되어 돌아오는 신호파와 참조 거울에 반사되어 돌아오는 참조파는 서로 혼합되어 간섭을 일으키며 비트 신호를 생성한다. 이러한 비트 신호는 FFT과정을 거쳐 특정 주파수를 보이게 되고, 이러한 주파수를 비트 주파수라고 한다. 비트 주파수는 신호파가 진행하여 목표물에 반사되기까지의 거리를 나타낸다.

f_0 의 중심 주파수를 갖는 레이저를 발진할 경우 전 기장은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

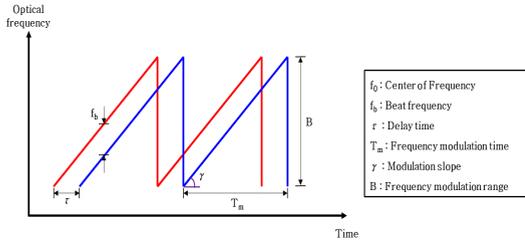


그림 2. FMCW 라이다 거리측정 원리
Fig. 2. FMCW LiDAR distance measurement principle

$$E_0(t) = E_0 \exp[j2\pi f_0 t] \quad (1)$$

레이저의 주파수 변조를 위해 외부에서 변조 신호를 인가한다. 그림 2는 시간에 따라 레이저의 중심주파수가 시간에 따라 변조되는 그래프이다. 변조된 주파수 $f_m(t)$ 는 식 (2)와 같이 표현한다.

$$f_m(t) = \gamma t + f_0 \quad (2)$$

식 (1)과 식 (2)을 통해 주파수 변조된 레이저의 전기장 $E_{fm}(t)$ 은 식 (3)과 같이 표현한다.

$$\begin{aligned} E_{fm}(t) &= E_0 \exp \left[j2\pi \int_0^t f_m(t) dt \right] \\ &= E_0 \exp \left[j2\pi \int_0^t (f_0 + \gamma t) dt \right] \\ &= E_0 \exp \left[j \left\{ 2\pi \left(f_0 t + \frac{1}{2} \gamma t^2 \right) \right\} \right] \end{aligned} \quad (3)$$

목표물과 떨어진 거리 R 은 식 (4)과 같이 표현할 수 있다.

$$R = \frac{c\tau}{2} \quad (4)$$

c 는 빛의 속도, τ 는 신호파와 참조파의 시간 차이를 의미한다. 신호파 $E_s(t, \tau)$ 와 참조파 $E_{LO}(t)$ 를 전기장으로 나타내면 식 (5), (6)처럼 나타낼 수 있다.

$$E_{LO}(t) = E_{LO} \exp \left[j \left\{ 2\pi \left(f_0 t + \frac{1}{2} \gamma t^2 \right) \right\} \right] \quad (5)$$

$$E_s(t, \tau) = E_s \exp \left[j \left\{ 2\pi \left(f_0 (t - \tau) + \frac{1}{2} \gamma (t - \tau)^2 \right) \right\} \right] \quad (6)$$

신호파 $E_s(t, \tau)$ 와 참조파 $E_{LO}(t)$ 가 간섭을 일으키

며, 혼합된 두 신호의 세기는 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} I(t, \tau) &= |\Sigma E|^2 \\ &= I_{LO} + I_s + 2\sqrt{I_{LO}I_s} \cos[2\pi f_b t + \varphi_b] \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)에서 f_b 는 신호파와 참조파가 간섭을 통해 발생시킨 비트 주파수를 나타낸다. 비트주파수는 식 (4)에서 τ 를 비트주파수 f_b 와 변조 기울기 γ 로 나타낼 수 있고, 변조 기울기 γ 은 주파수 변조 시간 T_m 과 주파수 변조 범위 B 로 표현할 수 있다. 따라서 목표물과의 거리 R 은 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \frac{cT_m}{2B} f_b \quad (8)$$

2.2 라이다 빔 조향 방식

라이다는 기본적으로 목표물을 스캔하기 위해 기계식 스캐닝 방식, MEMs(Micro Electro Mechanical Systems) 스캐닝 방식, Flash 방식이 있다.

2.2.1 기계식 스캐닝 방식

기계식 스캐닝 방식은 360°로 회전하는 스캐너를 사용하여 수평각을 확보한다. 스캐너에 포함되어 있는 거울을 일정 각도 회전시켜서 수직각을 확보한다⁵⁾. 확보된 수평각과 수직각을 통해 순차적으로 목표물을 조사하여 FoV를 결정한다. 이러한 방식은 회전소자를 포함하기 때문에 충격과 진동에 취약하여 출력 이미지에 영향을 줄 수 있다.

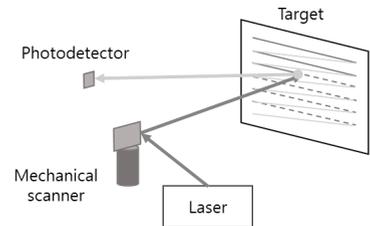


그림 3. 기계식 스캐닝 방식 모식도
Fig. 3. Mechanical scanning type schematic

2.2.2 MEMs 스캐닝 방식

MEMs 스캐닝 방식은 외부에서 전기적 자극에 의해 기울기가 달라지는 거울을 사용하여 FoV를 형성한다⁶⁾. MEMs 스캐닝 방식도 기계식 스캐닝 방식과 마찬가지로 회전 소자로 인해 충격과 진동에 취약하다.

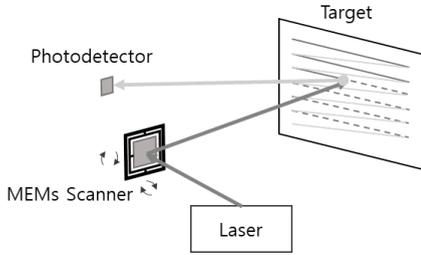


그림 4. MEMs 스캐닝 방식 모식도
Fig. 4. MEMs scanning type schematic

2.2.3 Flash 방식

Flash 방식은 레이저 빔사이즈를 확장할 수 있는 광학부품을 통해서 목표물을 한번에 조사하고 이를 통해 FoV를 결정한다. 목표물을 확장된 빔을 통해 조사하기 때문에 수신부는 2D 이미지를 수신할 수 있는 Array 형태의 수신 소자가 필요하다. Flash 방식은 확장된 빛이 이미지로 수신되기 때문에 데이터 측면에서 캡처 속도가 빠르며, 회전 소자를 포함하지 않기 때문에 다른 방식에 비해 진동 및 충격에 영향을 덜 받는다. 뿐만 아니라 회전 소자를 포함하지 않으므로 전체 시스템의 크기를 줄일 수 있다는 장점이 있다.

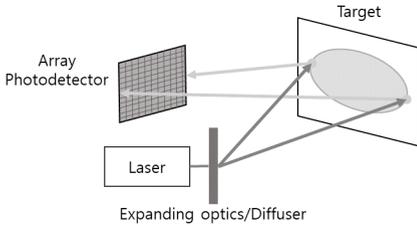


그림 5. Flash 방식 모식도
Fig. 5. Flash type schematic

2.3 2×2 Array BPD 설계

2×2 Array BPD를 설계하기 위해 BPD 회로, 위상 반전 증폭기, 차동 증폭기를 통해 회로를 설계하고 시뮬레이션 하였다. 두 개의 BPD로 수신된 광 신호 중 하나는 반전 증폭기를 통해 위상 반전되고, 비 반전된 신호와 반전된 신호가 차동 증폭기를 통해 증폭된 신호로 출력된다.

2.3.1 Balanced photodetector

BPD는 2개의 PD(Photodiode)를 사용하며, 같은 광 신호가 두 PD에 입력될 경우 TIA(Transimpedance Amplifier)를 통해 변환된 광 전류의 차이를 차동 증폭하는 수신소자이다[7].

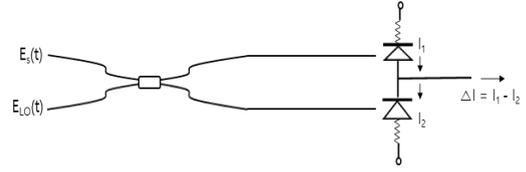


그림 6. Balanced photodetector 모식도
Fig. 6. Balanced photodetector schematic

두 PD에 수신되는 광 필드는 전력, 주파수, 위상으로 표현할 경우 식 (9), 식 (10)으로 나타낼 수 있다.

$$E_s(t) = \sqrt{P_s(t)} \cdot \exp(j\phi_s(t)) \cdot \exp(j\omega_s t) \quad (9)$$

$$E_{LO}(t) = \sqrt{P_{LO}(t)} \cdot \exp(j\phi_{LO}(t)) \cdot \exp(j\omega_{LO} t) \quad (10)$$

두 광 신호가 완벽히 절반으로 분리되었다면, BPD를 통해 출력되는 광 전류는 식 (11)과 같다.

$$\begin{aligned} \Delta I(t) &= I_1(t) - I_2(t) \\ &= 2R\sqrt{P_s(t)P_{LO}(t)} \cdot \sin((\omega_s - \omega_{LO}) \cdot t + \phi_s(t) - \phi_{LO}(t)) \end{aligned} \quad (11)$$

비트주파수를 나타내는 $\omega_s - \omega_{LO}$ 가 식 (11)에 의해 2배 증폭된 것을 확인할 수 있다.

2.3.2 반전 증폭기

반전 증폭기는 수신된 신호의 위상을 반전시키기 위해 사용한다[8].

$$V_o = -\frac{R_f}{R_1} V_1 \quad (12)$$

반전 증폭기의 출력은 식 (12)와 같이 입력 신호의

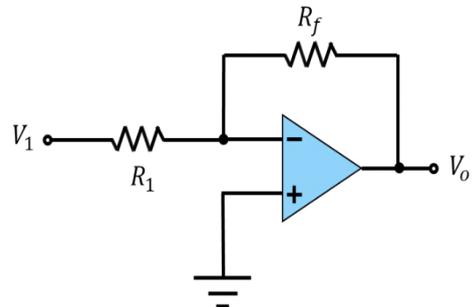


그림 7. 반전 증폭기
Fig. 7. Inverting amplifier

위상이 반전되어 출력된다.

2.3.3 차동 증폭기

차동 증폭기는 두개의 입력 신호의 차이를 증폭한다⁸⁾.

$$V_o = V_2 - V_1 \left(\frac{R_3}{R_1} \right) \quad (13)$$

차동 증폭기의 출력 신호는 식 (13)과 같이 두 신호의 차이에 비례하게 출력되는 것을 확인할 수 있다.

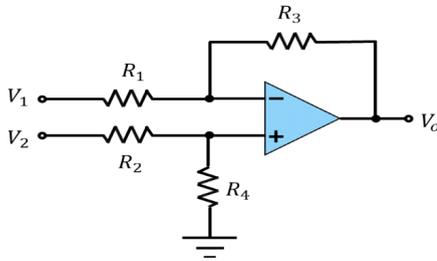


그림 8. 차동 증폭기
Fig. 8. Differential amplifier

III. 실험

3.1 FMCW 라이다 시스템 셋업 및 거리측정 결과
거리측정을 위해 마이켄슨 간섭계를 통해 FMCW 라이다 시스템을 셋업 했다. 그림 9와 같이 레이저, 빔 스플리터, 참조 거울, 타겟 거울, BPD로 구성했다.

레이저는 DFB 레이저를 사용했다. 주파수 변조를 위해 파형 발생기를 통해 변조 신호를 인가했다. 변조

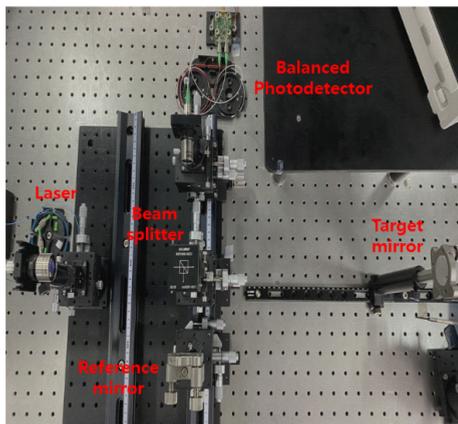


그림 9. FMCW 라이다 시스템
Fig. 9. FMCW LiDAR system

신호는 주기 1 kHz, 진폭 4 mVpp로 설정했다. 설정된 변조 신호를 레이저에 인가하면 주파수 변조 주기 1 ms, 주파수 변조 범위 10.5 GHz로 주파수 변조된다. 주파수 변조된 레이저 빛이 빔 스플리터를 통해 참조파와 신호파로 분리된다. 참조파는 참조 거울에 반사되고, 신호파는 타겟 거울에 반사된다. 이렇게 반사된 참조파와 신호파는 빔 스플리터를 통해 혼합되며 간섭을 일으킨다. 간섭을 통해 발생한 비트 신호는 BPD를 통해 수신된다. BPD로 수신된 비트 신호는 오실로스코프를 통해 측정 및 분석하여 FFT된 비트 주파수를 확인할 수 있다. 타겟과의 거리는 20 cm로 설정했다. 그림 10은 비트 신호 파형과 FFT 주파수를 나타낸다.

비트 신호 측정 결과 14.2 kHz의 비트 주파수를 확인할 수 있다.

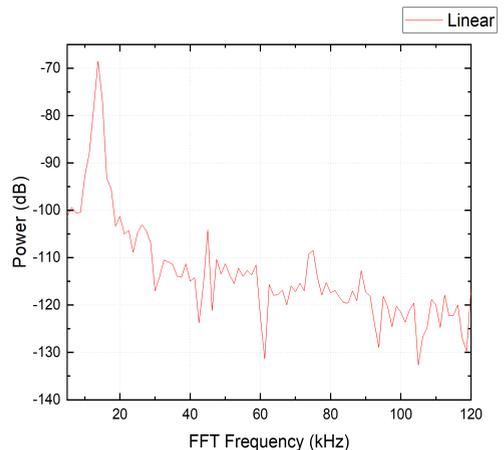
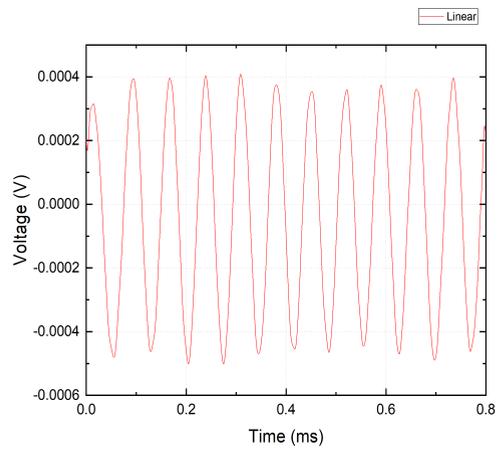


그림 10. 비트 신호 파형(상), 비트 신호 FFT주파수(하)
Fig. 10. Beat signal waveform(up), beat signal FFT frequency(down)

3.2 2x2 Array BPD 구동회로 제작 및 작동 테스트

2x2 Array BPD 구동회로는 입력단이 두 개로 구성되어 있다. 입력된 두 신호 중 하나는 위상을 반전시키기 위해 반전 증폭기가 회로에 포함되어 있으며, 위상 반전된 신호와 원래의 위상을 유지하는 신호가 증폭되기 위해 차동 증폭기가 포함되어 있다. 먼저 비트 신호를 2x2 Array BPD 구동회로에 입력하기 전 작동 테스트를 진행했다. 파형 발생기를 통해 1 kHz, 10 kHz, 100 kHz의 주기를 갖으며, 각 주기 별로 1 mVpp, 10 mVpp, 100 mVpp, 1 Vpp 진폭을 갖는 정현파를 입력하여 테스트를 진행했다. 그림 11은 2x2 Array BPD 구동 회로 작동 테스트 순서도를 나타낸다. 그림 12 파형 발생기를 통해 주기 10 kHz, 진폭 10

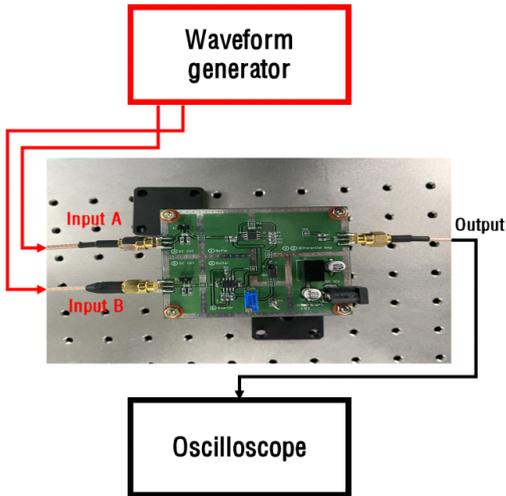


그림 11. 2x2 Array BPD 구동 회로 작동 테스트 모식도
Fig. 11. 2x2 Array BPD operating circuit test schematic

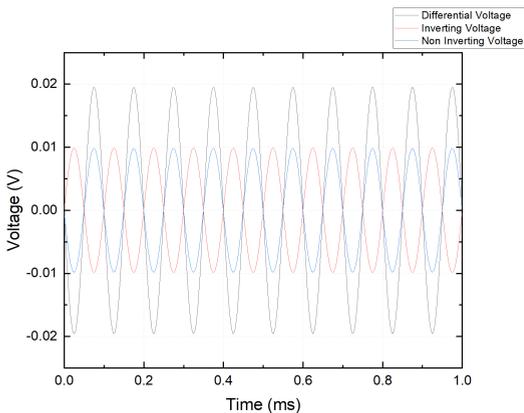


그림 12. 2x2 Array BPD 구동 회로 작동 테스트 결과
Fig. 12. 2x2 Array BPD operating circuit test result

mVpp를 갖는 정현파를 두 입력단에 입력했을 때 결과를 나타낸다.

그림 12에서 빨간색 그래프는 위상 반전된 신호를 나타내며, 파란색 그래프는 원래의 위상을 유지하는 신호를 나타낸다. 검정색 그래프는 두 신호가 차동 증폭을 통해 신호의 세기가 2배 증폭된 출력 신호를 나타낸다.

3.3 2x2 Array BPD를 통한 비트 신호 수신

기존의 FMCW 라이더 시스템 셋업에서 2x2 Array BPD로 수신부를 구성하기 레이저의 빔 사이즈를 빔 익스팬더를 통해 확장했다. 확장된 빔은 기존 셋업과 동일하게 빔 스플리터로 진행되고 참조파와 신호파로 나뉘진다. 나뉜 참조파와 신호파는 각각 참조 거울과 타겟 거울에 의해 반사되어 다시 빔 스플리터로 향한다. 빔 스플리터에서 혼합을 일으켜 발생한 비트 신호는 수신부로 향하게 된다. 확장된 빔 사이즈를 갖는 비트 신호를 수신하기 위해 InGaAs PD를 2x2로 배열했다. 배열된 PD중 상단에 배치된 PD와 하단에 배치된 PD가 쌍을 이루어 BPD 회로에 적용된다. 두 개의 BPD에서 출력된 비트 신호는 제작된 2x2 Array BPD 구동 회로의 입력 신호가 된다. 2x2 Array BPD 구동회로에 입력된 비트 신호중 하나의 비트 신호는 반전 증폭기를 통해 위상 반전되며, 위상 반전된 비트 신호와 원래의 위상을 유지하는 비트 신호는 차동 증폭기를 통해 증폭된다.

그림 13은 2x2 Array BPD가 적용된 FMCW 라이더 시스템을 나타낸다. 레이저의 주파수 변조 주기와 범위는 앞의 실험과 동일하게 1 ms, 10.5 GHz로 주

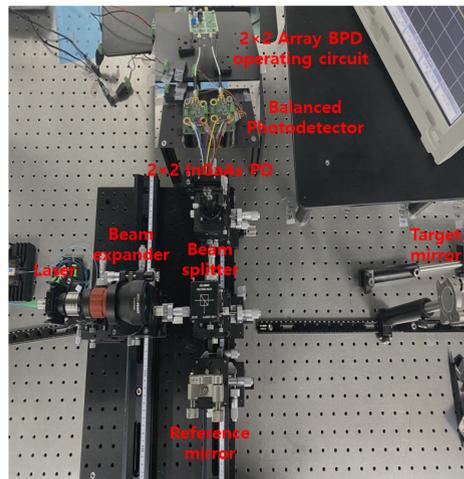


그림 13. 2x2 Array BPD 적용된 FMCW 라이더 시스템
Fig. 13. FMCW LiDAR system with 2x2 Array BPD

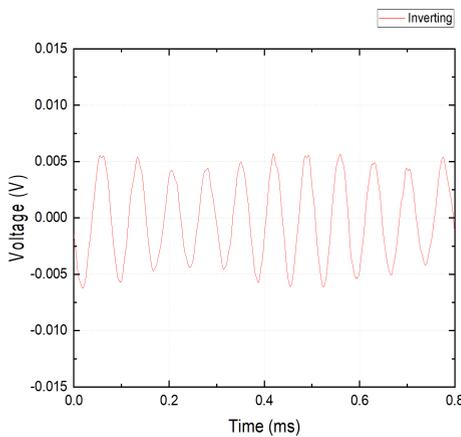
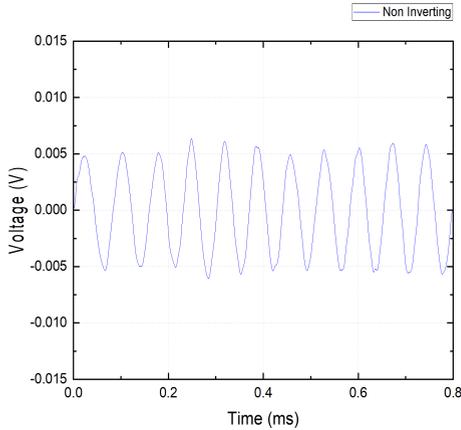


그림 14. 비 반전 비트 신호 파형(상), 위상 반전 비트 신호 파형(하)
 Fig. 14. Non-inverting beat signal waveform(up), inverting beat signal waveform(down)

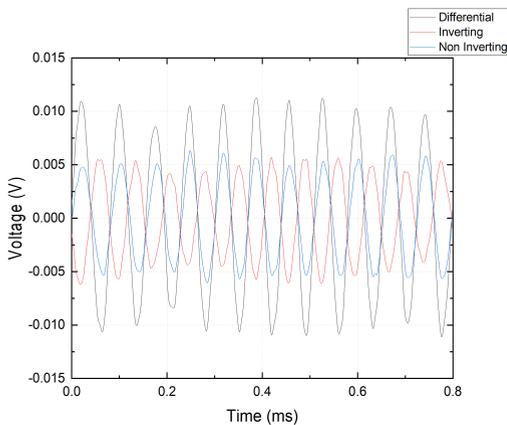


그림 15. 비 반전 비트 신호 파형(파란색), 위상 반전 비트 신호 파형(빨간색), 차동 증폭된 비트 신호 파형(검정색)
 Fig. 15. Non-inverting beat signal waveform(blue), inverting beat signal waveform(red), differential amplified beat signal waveform(black)

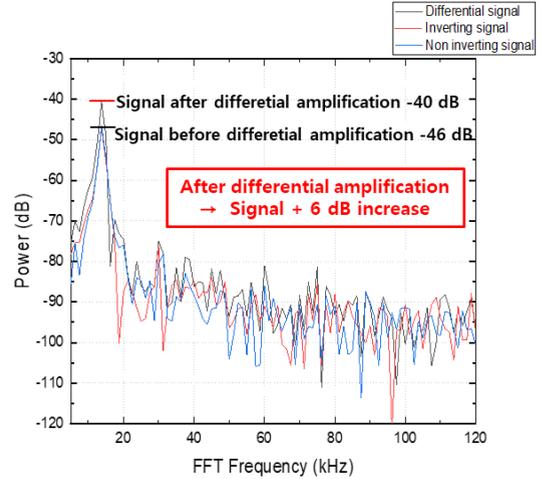


그림 16. 비 반전 비트 신호 FFT 주파수(파란색), 위상 반전 비트 신호 FFT 주파수(빨간색), 차동 증폭된 비트 신호 FFT 주파수(검정색)
 Fig. 16. Non-inverting beat signal FFT frequency(blue), inverting beat signal FFT frequency (red), differential amplified beat signal FFT frequency (black)

파수 변조시켰다. 그림 14는 오실로스코프를 통해 측정된 비트 신호의 파형을 나타낸다.

그림 14에서 파란색 그래프(상)는 원래의 위상을 유지하는 비트 신호 파형을 나타내고, 빨간색 그래프(하)는 위상이 반전된 비트 신호 파형을 나타낸다. 위와 같은 두 비트 신호를 차동 증폭한 그래프는 그림 15의 검정색 그래프를 통해 확인할 수 있다.

그림 16은 차동 증폭되기 전의 비트 신호와 차동 증폭된 비트 신호를 FFT하여 신호의 세기를 비교한다.

IV. 결론

본 논문에서는 송신부, 믹싱부, 수신부를 통해 FMCW 라이다 시스템을 구현했으며, 해당 시스템을 통해 거리 측정을 진행했다. 20cm에 해당하는 비트주파수 14.2 kHz를 실험을 통해 확인하였고, 이는 이론값과 일치하였다. 2x2 Array BPD를 제작하여 작동 테스트를 진행했으며, 실제 비트 신호를 수집하여 거리를 측정했다. 원래의 비트 신호보다 신호 세기가 6 dB 증가하는 것을 확인할 수 있었다. 이러한 결과는 FMCW 라이다 시스템을 통해 장거리를 측정할 경우 약해진 신호를 증폭하여 정확한 비트 신호 수집을 통해 시스템 성능을 향상시킬 수 있다. 그리고 Flash 방식의 FMCW 라이다의 수신부를 Array 형태 수신소자로 사용할 경우 하나의 픽셀을 2x2로 설계하여

ROIC로 적용 가능하다. 추후에는 서로 다른 거리를 갖는 타겟을 통해 동시 측정을 진행할 예정이다. 뿐만 아니라 여러 픽셀을 통해 비트 신호를 수집하여 Flash 방식 FMCW 라이더의 적합성을 확정할 계획이다.

References

- [1] J. Kim, K. K. Kwon, and S. I. Lee, "Trends and applications on lidar sensor technology," *Electronics and Telecommunications Trends*, vol. 27, no. 6, Dec. 2012.
- [2] F. Johansson, "Heterodyne detection using frequency-modulated continuous-wave LiDAR," M.S. Thesis, LUND University, 2020.
- [3] C. Park and Y. Kim, "Study on safety control the laser equipment," *J. KIICE*, pp. 419-422, Busan, Korea, Oct. 2016.
- [4] M. Khader and S. Cherian, "*An introduction to automotive LIDAR*," Texas Instruments, 2018.
- [5] G. Atanacio-Jiménez, et al., "Lidar velodyne hdl-64e calibration using pattern planes," *Int. J. Advanced Robotic Syst.*, vol. 8, no. 5, 2011. (<https://doi.org/10.5772/50900>)
- [6] D. Wang, C. Watkins, and H. Xie, "MEMS mirrors for LiDAR: A review," *Micromachines*, vol. 11, no. 5, 2020. (<https://doi.org/10.3390/mi11050456>)
- [7] Y. Painchaud, et al., "Performance of balanced detection in a coherent receiver," *Optics express*, vol. 17, no. 5, 2009. (<https://doi.org/10.1364/OE.17.003659>)
- [8] R. Mancini, *Op amps for everyone: Design reference*, Newnes, 2003.

권 순 옥 (Kwon Soonwook)



2019년 2월 : 경기대학교 전자물리학과 학사
2019년 9월~현재 : 고려대학교 전기전자공학과 석사과정
<관심분야> 전자공학, 광학, 레이저 광학, 라이더 센서
[ORCID:0000-0002-4834-5951]

최 선 작 (Choi Sunjak)



2018년 2월 : 가천대학교 나노물리학과 학사
2022년 2월 : 고려대학교 전기전자공학과 석사
<관심분야> 전자공학, 광학, 레이저 광학, 라이더 센서
[ORCID:0000-0002-1296-1883]

백 지 은 (Baek Jieun)



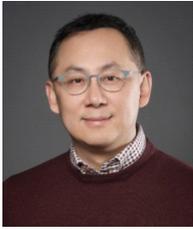
2019년 2월 : 가천대학교 나노물리학과 학사
2019년 9월~현재 : 연세대학교 전기전자공학부 석사과정
<관심분야> 전자공학, 광학, 레이저 광학, 광 바이오 센서
[ORCID:0000-0003-2058-8481]

노 정 현 (Roh Cheong Hyun)



1998년 2월 : 전북대학교 재료공학과 학사
2000년 2월 : 한양대학교 세라믹공학과 석사
2004년 2월 : 한양대학교 세라믹공학과 박사
2002년 8월~현재 : 한국전자기술연구원 IT소재부품연구본부 책임연구원
<관심분야> 화합물 반도체 에피택시, 단결정 및 분석
[ORCID:0000-0001-7220-7703]

김 태 근 (Kim Tae Geun)



1990년 2월 : 고려대학교 전자공
학과 학사

1993년 2월 : 고려대학교 전자공
학과 석사

1997년 2월 : 고려대학교 전자공
학과 박사

2004년 9월~현재 : 고려대학교

전기전자공학과 교수

2016년 6월~현재 : 한국연구재단 리더연구단장

<관심분야> 전기/광학 반도체 소자 및 장치, 반도체 양
자 구조, 비휘발성 메모리

[ORCID:0000-0001-6211-1134]

이 준 호 (Lee Junho)



1997년 2월 : 인천대학교 물리학
과 학사

2001년 4월 : 미국 플로리다 대
학교 전자공학과 석사

2004년 5월 : 미국 플로리다 대
학교 전자공학과 박사

2007년 4월~현재 : 한국전자기

술연구원 IT소재부품연구본부 수석연구원

<관심분야> 반도체 레이저, 고출력 레이저, 광 바이오
센서, 라이다 센서