

고분해능 FMCW LiDAR 센서 구성을 위한 광대역 주파수변조 레이저 개발

라종필* · 최지은*

Development of Wideband Frequency Modulated Laser
for High Resolution FMCW LiDAR Sensor

Jong-Pil La* · Ji-Eun Choi*

요 약

본 논문은 눈, 비, 안개 등 열악한 운용환경에도 강건한 표적검출 특성을 가지는 FMCW LiDAR에 대해서 기술하고 있다. 특히 FMCW LiDAR의 거리 해상도, 가간섭거리 및 최대측정거리 성능에 직접적으로 영향을 미치는 주파수변조레이저의 성능개선에 대해 기술하고 있다. 불평형 Mach-Zehnder 레이저간섭계를 활용하여, 레이저의 발진주파수의 변화율을 실시간 측정하고, 주파수변조 오차를 보정하는 광학식 위상동기루프 기술을 이용한 주파수변조 방법에 대해 기술하였다. 가간섭거리가 긴 레이저 광원을 발진하기 위해 확장공진기형 레이저다이오드를 적용하였으며, 레이저에서 발진되는 주파수 측정을 위해 광집적회로 구조의 레이저간섭계를 적용하였다. 개발된 FMCW LiDAR의 대역폭과 거리해상도는 각각 10.045GHz와 0.84mm로 측정되었다.

ABSTRACT

FMCW LiDAR system with robust target detection capabilities even under adverse operating conditions such as snow, rain, and fog is addressed in this paper. Our focus is primarily on enhancing the performance of FMCW LiDAR by improving the characteristics of the frequency-modulated laser, which directly influence range resolution, coherence length, and maximum measurement range etc. of LiDAR. We describe the utilization of an unbalanced Mach-Zehnder laser interferometer to measure real-time changes of the lasing frequency and to correct frequency modulation errors through an optical phase-locked loop technique. To extend the coherence length of laser, we employ an extended-cavity laser diode as the laser source and implement a laser interferometer with a photonic integrated circuit for miniaturization of optical system. The developed FMCW LiDAR system exhibits a bandwidth of 10.045GHz and a remarkable distance resolution of 0.84mm.

키워드

FMCW LiDAR, Optical Phase Locked Loop, Frequency Modulation, Frequency Stabilization, Coherent Detection, Photonic Integrated Circuit

주파수 변조 연속파 라이다, 광학식 위상 동기 루프, 주파수 변조, 주파수 안정화, 결맞음 검출, 광집적 회로

* 람다이노비전(주) (jongpil.la@lambda-innovision.com) • Received : Oct. 06, 2023, Revised : Nov. 08, 2023, Accepted : Dec. 27, 2023
* 교신저자 : 람다이노비전(주), 기술연구소 • Corresponding Author : Jong-Pil La
• 접수일 : 2023. 10. 06 CEO of Lambda innoVision Co., Ltd
• 수정완료일 : 2023. 11. 08 Email : jongpil.la@lambda-innovision.com
• 게재확정일 : 2023. 12. 27

1. 서 론

자율주행자동차 및 자율로봇 등의 핵심인지 센서로 LiDAR(라이다)가 광범위하게 적용되고 있으나, 기존 펄스형 LiDAR의 경우, 태양광이나 인공 조명에 의해 잡음이 쉽게 증가하고, 눈, 비, 안개 등 열악한 운용환경에서 그 검출 성능이 저하되는 단점이 있다[1][2]. 또한, 향후 도로에 많은 LiDAR가 동시에 운용될 때 발생이 예상되는 상호간섭 문제는 펄스형 LiDAR의 고질적인 문제로 지적되고 있다[3].

펄스형 LiDAR는 그 이름이 암시하듯이 나노초(ns) 수준의 짧은 레이저 펄스를 반사하고, 표적으로부터 반사되어 LiDAR에 재입사되는 시간을 측정하여 거리를 측정하는데, 표적에서 반사된 매우 미약한 신호를 검출하기 위해 고민감도의 검출기를 적용한다. 검출기 자체는 태양광, 인공조명 및 타 LiDAR에서 방사된 빛을 구분할 수 없으므로, 모두 잡음으로 작용한다[4].

FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave) LiDAR는 레이저의 광학적인 주파수를 변조하여 표적까지의 거리를 측정한다. FMCW LiDAR에 일반적으로 적용되는 눈안전 파장인 1550nm 레이저의 주파수가 약 193.5THz에 이르므로, 이를 직접 검출하는 것은 불가능하고, 레이저간섭계를 통해 레이저 주파수의 변화량을 측정하는데, 이 과정에서 결맞음(Coherent) 증폭 효과를 얻을 수 있다[5].

결맞음 증폭 과정을 통해서, 결맞지 않은 빛 예를 들어 태양광이나, 인공조명 및 타 LiDAR에 대해 전혀 반응하지 않으므로, 상호간섭 문제를 원천적으로 해결할 수 있다. 또한 높은 검출 민감도를 가지는 결맞음 검출 기술을 적용하므로, 단일 광자 이하의 민감도를 구현하면서도, 눈, 비, 안개 등 열악한 환경에서도 강건한 검출 특성을 유지할 수 있다[6].

본 논문은 FMCW LiDAR의 성능에 직접적인 영향을 미치는 주파수 변조 레이저의 개발에 대해 기술하고 있다. 소형화 구현이 가능하면서도 협대역(Narrow Spectral Linewidth) 레이저 발진이 가능한 확장 공진 기형 레이저다이오드를 적용하였다. 레이저다이오드의 고속 주파수 변조를 위해 이득칩(Gain Chip)의 구동 전류와 발진 주파수와의 관계를 측정하여, 의도적으로 왜곡된 구동 전류 파형을 인가하여, 선형적인 주파수 변조가 가능한 DPD(Digital Pre-Distortion) 알고리즘

을 적용하였다[7].

주파수 변조의 잔여 위상 오차를 보상하기 위해서 광학식 위상동기루프 구조를 적용하였으며, 레이저 발진 주파수의 측정 및 제어를 통해 고도로 선형적인 광주파수 변조를 구현하였다.

II. FMCW LiDAR 측정 원리

레이저의 발진 주파수가 선형적으로 변조되는 레이저를 표적에 조사하면, 표적으로부터 반사되어 다시 LiDAR로 입사될 때까지 레이저의 비행시간(Time Of Flight)이 소요되므로, 입사된 레이저와 발진된 레이저의 주파수는 거리에 비례하여 일정한 차이를 발생시킨다. 이 주파수 차이를 검출하면, 표적까지의 거리를 정밀하게 측정할 수 있다. 그림 1은 FMCW LiDAR의 일반적인 주파수 변조 파형과 이를 이용한 거리측정 원리를 도시하고 있다.

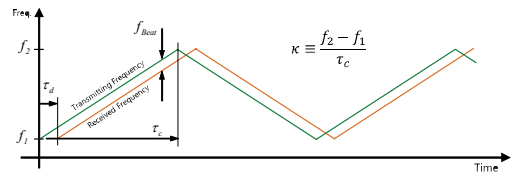


그림 1. FMCW LiDAR 센서의 거리측정 원리
Fig. 1 Range measurement principle of FMCW LiDAR sensor

일반적으로 f_2 와 f_1 의 차이를 대역폭(Bandwidth)으로 정의하며 식 (1)과 같이 쓸 수 있다.

$$B \equiv f_2 - f_1 \quad \dots (1)$$

시간에 따라 주파수가 f_1 에서 f_2 까지 선형적으로 변조되는 발진 레이저의 송신 주파수 $f_{Tx}(t)$ 를 식 (2)와 같이 쓸 수 있다.

$$f_{Tx}(t) = f_1 + \kappa t \quad \dots (2)$$

여기서, κ 는 단위 시간당 레이저 주파수의 변화량을 의미하며, 식 (3)과 같이 정의할 수 있다.

$$\kappa \equiv \frac{f_2 - f_1}{\tau_c} \quad \dots (3)$$

여기서, τ_c 는 주파수 변조의 반주기를 의미한다. 이 때, 표적으로부터 반사되어 수신된 레이저의 주파수 $f_{Rx}(t)$ 는 송신 주파수가 레이저의 비행시간 τ_d 만큼 지연된 신호이므로 식 (4)와 같이 쓸 수 있다.

$$f_{Rx}(t) = f_{Tx}(t - \tau_d) = f_1 + \kappa(t - \tau_d) \quad \dots (4)$$

따라서, 측정 주기 τ_c 동안에는 송신 주파수와 수신 주파수는 거리에 비례하여 일정한 차이값을 가지게 되며, 이 주파수 f_{Beat} 를 비트 주파수(Beat Frequency)라고 부르며, 식 (5)와 같이 쓸 수 있다.

$$f_{Beat} \equiv f_{Tx}(t) - f_{Rx}(t) = \kappa\tau_d \quad \dots (5)$$

여기서, 레이저의 비행시간 τ_d 는 빛의 속도 c 로 거리 R 을 왕복하는 시간이므로,

$$\tau_d = \frac{2R}{c} \quad \dots (6)$$

식(6)와 같이 쓸 수 있고, 표적까지의 거리 R 과 비트 주파수와와의 관계는 식 (7)과 같이 쓸 수 있다.

$$R = \left(\frac{c}{2\kappa} \right) f_{Beat} \quad \dots (7)$$

식 (7)으로부터 비트 주파수를 측정하여, 표적까지의 거리를 측정할 수 있음을 알 수 있다. 거리 해상도 ΔR 은 레이저의 변조폭 B 에 의해 결정되며, 식 (8)과 같다[8].

$$\Delta R = \frac{c}{2B} \quad \dots (8)$$

신호대잡음비를 SNR 이라 하면, 거리 정확도 σR 은 식 (9)와 같이 쓸 수 있다.

$$\sigma R = \frac{c}{2B\sqrt{SNR}} \quad \dots (9)$$

III. 주파수변조레이저의 개발

3.1 협대역 레이저 발전기

결맞음 검출기술을 활용하여 원거리 표적으로부터 반사된 미약한 신호를 검출하는 FMCW LiDAR의 측정거리는 발전 레이저의 가간섭거리에 비례한다. 긴 가간섭거리 확보를 위해 협대역 레이저 발전이 필요한데, 본 연구에서는 확장 공진기형 레이저다이오드 구조를 적용하였다.

레이저의 발전 주파수의 대역폭은 공진기의 길이가 길어질수록 협대역 구현이 가능한데, 공진기의 길이가 길어지면, 레이저가 다중 모드로 발전할 수 있으므로, 회절격자 등을 이용하여, 특정 파장 및 특정 모드만을 공진시켜 레이저를 발전하여, 협대역 레이저를 발전하도록 구성하였다.

레이저 다이오드는 Thermistor와 TEC(Thermo Electric Cooler)를 활용하여, 일정한 온도를 유지하도록 제어되며, 구동 전류를 제어하여, 레이저 발전 주파수를 제어하였다. 그림 2는 TEC 위에 구현된 확장 공진기형 레이저다이오드를 도시하고 있다.

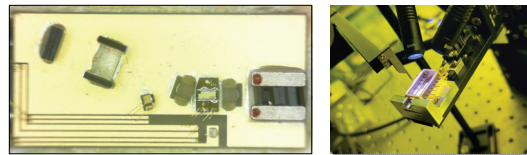


그림 2. 확장 공진기형 레이저다이오드(좌) 및 확장 공진기형 레이저다이오드의 고정밀 정렬(우)
Fig. 2 External cavity diode laser (left) and its precise optical alignment(right)

3.2 Digital Pre-Distortion 알고리즘

FMCW LiDAR에서 표적까지의 거리를 정밀하게 측정하기 위해서는 그림 1에서 도시된 주파수 파형이 선형적으로 변조되도록 제어하여야 한다.

레이저의 발전 주파수를 제어하기 위해서 레이저의 공진기 길이를 직접 제어할 수 있다. 그러나, FMCW LiDAR에서 필요한 주파수 변화 즉, 대역폭은 약 1~

10GHz 수준으로 낮은 반면, 약간의 공진기 길이에 의해서도 큰 주파수 변화가 일어날 수 있으므로, 기계적 길이를 직접 제어하는 방법으로는 정밀하고 선형적인 주파수 변조를 구현하기 어렵다.

본 논문에서는 레이저의 발진 주파수를 제어하기 위해 레이저 구동 전류를 이용하였다. 레이저의 구동 전류가 증가하면, 이득칩의 온도가 국부적으로 증가하는데, 온도 증가에 따라 이득칩의 굴절율이 증가하므로, 그에 따라 광학적 유효 길이가 증가하므로, 레이저의 발진 주파수는 감소한다. 마찬가지로 이유로 레이저의 구동 전류가 감소하면 레이저의 발진 주파수는 증가한다.

레이저의 구동 전류와 레이저의 발진 주파수의 관계는 근사적으로 반비례하지만, 비선형성이 존재하므로, 삼각파 형태의 FMCW 파형을 얻기 위해서 단순히 역삼각파 형태의 구동 전류를 인가하는 것으로 선형적인 레이저 주파수 변조 파형을 얻을 수 없다.

본 논문에서는 레이저다이오드의 비선형성을 극복하기 위해 DPD 알고리즘을 적용하였다[3]. 그림 3과 4는 DPD 알고리즘의 원리를 도시하고 있다.

$$\kappa_v \neq K \cdot \kappa_i \quad \rightarrow \quad \kappa_{v,m}(\tau) = K_m(\tau) \cdot \kappa_{i,m}(\tau)$$

$$\left\{ \begin{aligned} \hat{K}_{m+1}(\tau) &\equiv \frac{\kappa_{v,ideal}(\tau)}{\kappa_{v,m}(\tau)} K_m(\tau) \text{ , then} \\ \kappa_{i,m+1}(\tau) &= \hat{K}_{m+1}^{-1}(\tau) \cdot \kappa_{v,ideal}(\tau) \\ \kappa_{v,m+1}(\tau) &= K_{m+1}(\tau) \cdot \kappa_{i,m+1}(\tau) \end{aligned} \right.$$

$$(m \rightarrow \infty) \text{ , then } \quad \hat{K}_m(\tau) \rightarrow K_m(\tau)$$

$$\kappa_{v,m}(\tau) \rightarrow \kappa_{v,ideal}(\tau)$$

그림 3. DPD 알고리즘의 작동 개념도
Fig. 3 Operating Concept of DPD Algorithm

일반적으로 레이저의 구동전류의 변화율 κ_i 과 발진주파수의 변화율 κ_v 은 근사적으로 비례하지만, 식 (10)과 같이 완벽히 선형적이지는 않다.

$$\kappa_v \neq K \cdot \kappa_i \quad \dots (10)$$

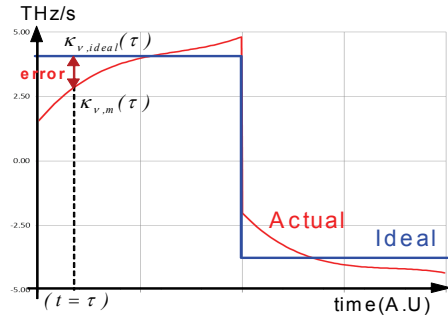


그림 4. DPD 알고리즘에 의한 주파수 파형
Fig. 4 Frequency waveform by DPD algorithm

값을 알고 있는 레이저 구동 전류의 변화율과 레이저 발진 주파수의 변화율을 Mach-Zehnder 레이저간섭계로 측정하여, 두 변수 간의 비례상수 $K_m(\tau)$ 의 추정값 $\hat{K}_m(\tau)$ 를 식 (11)을 이용하여 구할 수 있다.

$$\kappa_{v,m}(\tau) = K_m(\tau) \cdot \kappa_{i,m}(\tau) \quad \dots (11)$$

이상적인 레이저 발진 주파수 파형 $\kappa_{v,ideal}(\tau)$ 은 이상적인 FMCW 파형으로부터 이미 알고 있으므로, 추정된 $\hat{K}_m(\tau)$ 로부터 다음 반복 주기의 전류 구동파형 $\kappa_{i,m+1}(\tau)$ 을 식 (12)와 같이 구할 수 있다.

$$\kappa_{i,m+1}(\tau) = \hat{K}_{m+1}^{-1}(\tau) \kappa_{v,ideal}(\tau) \quad \dots (12)$$

DPD 알고리즘을 반복적으로 수행함에 따라, 비례상수의 추정값 $\hat{K}_m(\tau)$ 와 전류 구동파형 $\kappa_{i,m}(\tau)$ 은 이상적인 값에 가까워지게 되며, 그에 따라서 FMCW LiDAR의 이상적인 주파수 파형인 선형 레이저 주파수 변조 파형으로 수렴한다.

그림 5는 DPD 알고리즘 적용 전후의 주파수 변조 결과 파형을 도시하고 있다. 세로축은 주파수의 변화율 κ_v 으로 삼각파 형태를 가지는 주파수 변조 신호를 미분한 파형이다. 선형적인 주파수 변화 파형을 가지기 위해서 주파수 변화량은 그림 5에서 보이는 것처럼 사각파의 형태로 Up Chirp과 Down Chirp에서 각각 일정한 값을 가져야 한다.

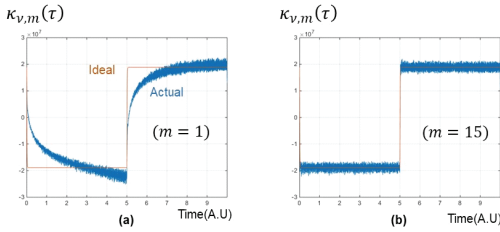


그림 5. DPD 알고리즘 적용 전(a)과 후(b)의 주파수 변화량 파형

Fig. 5 Frequency waveform (a) before and (b) after application of DPD algorithm

그림 5의 왼쪽(a)에서 DPD 알고리즘 적용 전에는 큰 비선형성을 보이는 반면, 그림 5의 오른쪽(b)과 같이 DPD 알고리즘 적용 결과 매우 선형적인 주파수 파형으로 변조되는 것을 확인할 수 있다.

DPD 알고리즘 수행을 통해 획득된 $\kappa_{i,m}(\tau)$ 는 구동 전류의 변화율이므로, 이로부터 레이저의 구동전류 파형 $i_m(t)$ 을 얻기 위해서 식 (13)과 같이 적분하여 구한다.

$$i_m(t) = \int_0^t \kappa_{i,m}(\tau) d\tau \quad \dots (13)$$

DPD 알고리즘 적용 전후의 구동전류 파형을 그림 6에서 도시하고 있다. 레이저 구동전류의 초기 파형($m = 1$)은 삼각파로 설정되었으며, DPD 알고리즘이 순차적으로 수행됨에 따라 ($m = 15$) 왜곡된 형태의 삼각파로 수렴하는 것을 알 수 있다.

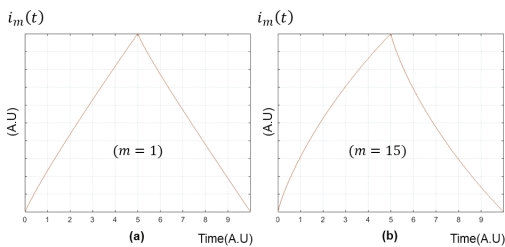


그림 6. DPD 알고리즘 적용 전(a)과 후(b)의 레이저 구동전류 파형

Fig. 6 Laser driving current waveform before (a) and after (b) application of DPD algorithm

3.3 광학식 위상동기루프(OPLL)

FMCW LiDAR의 핵심기술은 레이저의 주파수를 FMCW 파형으로 변조하는 것이며, 본 논문에서는 DPD 알고리즘과 광학식 위상동기루프(OPLL: Optical Phase Locked Loop) 기술을 적용하여, 선형적으로 레이저의 주파수를 변조하였다.

DPD 알고리즘은 레이저의 구조적인 주파수 변조 비선형성을 보상하기 위해 적용되었다. 레이저는 주변 온도변화, 진동/충격 등 다양한 환경요인에 의해 발진 주파수가 영향을 받는데, DPD 알고리즘만으로는 레이저의 모든 상태 변화를 보상할 수 없다.

레이저의 발진 주파수를 실시간으로 측정해 주파수 오차를 보상하고 선형적인 주파수 변조 파형을 얻기 위해 광학식 위상동기루프 기술을 적용하였다.

그림 7은 광학식 위상동기루프 기술을 적용한 주파수변조레이저의 블록도를 도시하고 있다.

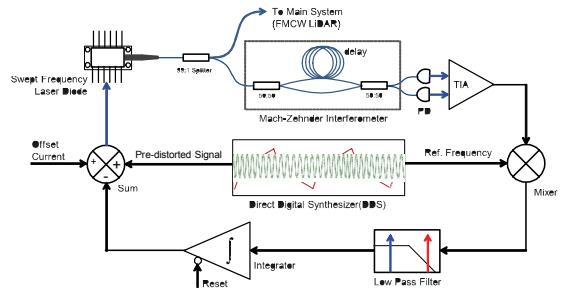


그림 7. 위상동기루프 구조의 주파수변조레이저
Fig. 7 FM laser with optical phase locked loop

광학식 위상동기루프 구조는 주파수 안정화 범위가 제한적이기 때문에, 반드시 DPD 알고리즘에 의해 선형적인 주파수 변조가 가능하도록 설계된 레이저 구동 전류 파형을 내장하여야 한다. DPD 알고리즘에 의해 생성된 레이저 구동 전류 파형을 저장하기 위해 DDS(Direct Digital Synthesizer)가 필요하며, DDS는 고속 FPGA와 고속 및 고분해능 DAC(Digital to Analog Converter)로 구성되며, 그림 8에서 도시하고 있는 형상을 가진다.

DPD 알고리즘을 통해 획득된 레이저 구동 전류 파형에 의해 발진된 레이저가 공급된 Mach-Zehnder 간섭계의 LO(Local Oscillator)의 위상 신호를 식 (14)와 같이 기술할 수 있다.

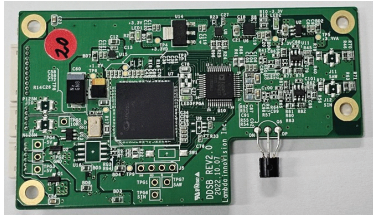


그림 8. 디지털 신호 합성기 모듈
Fig. 8 Picture of DDS module

$$E_m(t) = \exp[2\pi f_1 t + \frac{1}{2} \kappa t^2 + \phi(t)]j \quad \dots (14)$$

여기서, $\phi(t)$ 는 선형적인 주파수변조 파형에서 벗어난 레이저의 위상 오차를 의미한다. Mach-Zehnder 간섭계의 불평형 지연시간 τ_m 에 의한 신호를 식 (15)와 같이 기술할 수 있다.

$$\begin{aligned} E_m(t - \tau_m) & \quad \dots (15) \\ &= \exp[2\pi f_1(t - \tau_m) + \frac{1}{2} \kappa(t - \tau_m)^2 \\ & \quad + \phi(t - \tau_m)]j \end{aligned}$$

따라서, 광학식 위상동기루프 내에 위치한 불평형 Mach-Zehnder 간섭계의 출력 신호 $I_m(t)$ 는 LO 신호와 이의 지연된 신호의 간섭신호이므로, 식 (16)과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} I_m(t) &= |E_m(t) - E_m(t - \tau_m)|^2 \quad \dots (16) \\ &= \cos[\kappa \tau_m t + \phi(t - \tau_m) - \phi(t)] \end{aligned}$$

그림 9는 수식(16)의 신호를 획득하기 위한 Mach-Zehnder 레이저간섭계의 형상을 도시하고 있으며, SiO₂ 재질의 광집적회로 구조로 소형화하여 제작되었다[9][10].

Mach-Zehnder 레이저간섭계의 불평형 지연 시간 τ_m 와 주파수 변화율 κ 를 설계값으로 정확히 알고 있으므로, 레이저간섭계 출력 신호의 주파수는 $\kappa \tau_m$ 으로 추정할 수 있다.

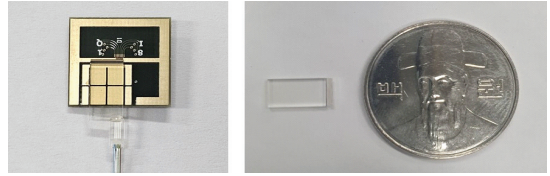


그림 9. 광집적회로 구조 Mach-Zehnder 간섭계
Fig. 9 Integrated Mach-Zehnder interferometer

간섭계 출력신호와 동일한 주파수를 가지면서도 위상오차가 없는 정확한 참조신호 $I_{dds}(t)$ 를 DDS에 저장하여, 주기적으로 발생시킴으로써 위상동기루프의 참조 신호로 사용되며, 발생하는 신호를 식 (17)과 같이 표현할 수 있다.

$$I_{dds}(t) = -2\sin(\kappa \tau_m t) \quad \dots (17)$$

DDS에서 출력되는 신호와 Mach-Zehnder 간섭계의 검출 신호는 비교를 위해 믹싱되며, 믹싱된 신호 $I_{mix}(t)$ 를 식 (18)과 식 (19)와 같이 표현할 수 있다.

$$I_{mix}(t) \equiv I_{dds}(t) \times I_m(t) \quad \dots (18)$$

$$\begin{aligned} I_{mix}(t) &= -2\sin(\kappa \tau_m t) \times \quad \dots (19) \\ & \quad \cos[\kappa \tau_m t + \phi(t - \tau_m) - \phi(t)] \end{aligned}$$

삼각함수 공식으로부터 믹싱된 신호를 식 (20)과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} I_{mix}(t) &= -\sin[2\kappa \tau_m t + \phi(t - \tau_m) - \phi(t)] \quad \dots (20) \\ & \quad + \sin[\phi(t - \tau_m) - \phi(t)] \end{aligned}$$

위 수식의 첫 번째 항은 두 번째 항에 비해 항상 $2\kappa \tau_m$ 의 주파수만큼의 차이를 가지고 있으므로, 저역통과필터로 제거할 수 있다. 저역통과필터를 거친 믹싱 신호는 식 (21)과 같은 형태로 얻을 수 있다.

$$I_{mix}(t) \approx \sin[\phi(t - \tau_m) - \phi(t)] \quad \dots (21)$$

일반적으로 위상동기루프에 의해서 위상 오차는 매우 작은 값으로 유지되어 $\phi(t - \tau_m) - \phi(t) \ll 1$ 이므로, 식 (22)와 같이 기술할 수 있다.

$$I_{mix}(t) \approx \phi(t - \tau_m) - \phi(t) \quad \dots (22)$$

따라서, 위상 오차의 차분(Difference)값이 부캐환 제어기로 입력되므로, 제어기는 위상 오차의 차분값이 항상 0으로 수렴하도록 제어한다. 따라서, 위상 오차는 식 (23)과 같이 항상 일정한 값을 유지하여, 협대역 주파수 선평을 유지하게 된다.

$$\phi(t - \tau_m) \approx \phi(t) \quad \dots (23)$$

IV. 성능 측정 결과

광학식 위상동기루프의 DDS에서 발진하는 고정 주파수를 1.5MHz로 설정하였다. 고정 주파수의 크기는 믹싱에 의해 발생하는 고조파(Harmonics, 3MHz)와 위상오차의 주파수가 충분히 이격되어, 저역통과필터로 분리가 용이하도록 값이 설정되었다.

높은 거리해상도를 얻기 위해 FMCW LiDAR의 대역폭을 10GHz로 설정하였다. 불평형 Mach-Zehnder 레이저간섭계가 1.5MHz의 주파수를 발생시키도록 불평형 시간 τ_m 은 아래 식 (24)와 같이 계산할 수 있다.

$$\kappa\tau_m = \left(\frac{B}{\tau_d}\right)\tau_m = 1.5MHz \quad \dots (24)$$

여기서, n 을 불평형 지연선의 굴절율이라 하면, 간섭계의 불평형 시간 $\tau_m = nd/c$ 이고, 주파수 변조의 반주기 τ_d 는 50us 이므로, Mach-Zehnder 간섭계에서 필요한 불평형 길이 $d = 1.532m$ 이다.

그림 10은 개발된 주파수변조레이저를 활용해서 9.93m(a)와 30.46m(b) 거리에 떨어진 표적으로부터 획득된 스펙트럼을 도시하고 있다.

Up Chirp과 Down Chirp에 의해 획득된 근거리 표적 주파수는 약 13.3MHz로 측정되었다.

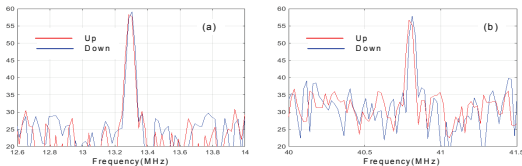


그림 10. 근거리(a) 및 원거리(b) 표적 스펙트럼
Fig. 10 Spectra of close (a) and stand-off (b) targets

Up Chirp에 의해 획득된 원거리 표적 주파수는 약 40.79MHz로 측정되었으며, Down Chirp에 의해 획득된 원거리 표적 주파수는 약 40.80MHz로 측정되었다.

따라서, 수식 7을 변형하여, 주파수변조레이저의 변조폭은 Up Chirp과 Down Chirp에 대해서 각각 10.045GHz와 10.047GHz로 추정할 수 있다.

획득된 스펙트럼의 신호대잡음비는 25dB 이상이므로, 해당 주파수변조레이저에 의한 거리 정확도는 수식 9를 이용하여 계산할 수 있으며, Up Chirp과 Down Chirp에 대해서 각각 0.84mm로 추정할 수 있다. 참고로, 최고 성능의 펄스 LiDAR에서 1ns의 매우 짧은 펄스를 사용하여 거리 측정을 하는 경우 대역폭 500MHz와 SNR=10에 의한 거리 해상도는 수식 (9)로부터 약 95mm 수준이다.

V. 결론 및 향후 개선 방향

자율주행자동차의 차세대 탐지 및 인지 센서로 주목받고 있는 FMCW LiDAR와 핵심기술인 주파수 변조 레이저의 개발에 대해 기술하였다. 결맞음 검출 기술을 적용하는 FMCW LiDAR의 광원으로 협대역 주파수 선평으로 발진이 가능한 확장 공진기형 레이저 다이오드를 개발하여 적용하였다. 레이저다이오드의 발진주파수를 주파수 변조하기 위하여, DPD 알고리즘과 광학식 위상동기루프 기술을 적용하였다.

적용된 DPD 알고리즘과 광학식 위상동기루프 기술을 활용하여 주파수 변조폭을 10GHz 이상으로 구동이 가능함을 확인하였으며, 수식 (9)로부터 FMCW LiDAR의 거리 해상도가 1mm 이하로 구현이 가능함을 확인하였다.

확장공진기형 레이저다이오드는 가간섭거리 200m 이상의 협대역 선평으로 발진이 가능하지만, 그 구조상 발진 모드가 인접하여, 변조 가능한 대역폭이 제한되는 단점이 있다. DFB(Distributed Feedback) 레이저다이오드의 경우, 공진기 길이가 제한되므로, 레이저 선평 성능은 제한되지만, 보다 높은 대역폭으로 변조가 가능하다.

따라서, 근거리 표적에 대한 높은 해상도의 거리 측정이 필요한 경우 적용이 가능하므로, 향후 DFB 레이저다이오드를 활용한 주파수변조레이저 개발도 필요하다 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2023년 정부(산업통상자원부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(P0021566, 2023년 빅데이터 기반 자동차 전장부품 신뢰성기술 고도화)

References

[1] Jinsan Kwon, Tongsun Kim, Taeho Hwang, and Hyunmoon Park, "A Development of effective object detection system using multi-device LiDAR sensor in vehicle driving Environment," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 13, no. 2, 2018, pp. 313-320.

[2] Jongsil Kim, Yeongtae Ju, and Eungkon Kim, "Object Recognition Technology using LiDAR Sensor for Obstacle Detection of Agricultural Autonomous Robot," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 16, no. 3, 2021, pp. 565-570.

[3] Il-Pyeong Hwang and Chang-Hee Lee, "Mutual Interferences of a True-Random LiDAR With Other LiDAR Signals," *IEEE Access*, vol. 8, 2020, pp. 124123-1241233.

[4] Heungmin Kim, Suho, Hongjun Yoon, and Seonwoong Jang, "Accuracy Evaluation of Open-air Compost Volume Calculation Using Unmanned Aerial Vehicle," *J. of the Korea Institute of Electronic Communication Sciences*, vol. 16, no. 3, 2021, pp. 541-550.

[5] Juha Lemmetti, Niklas Sorri, Ilkka Kallioniemi, Petri Melanen, and Pettery Uusimaa, "Long-range all-solid-state flash LiDAR sensor for autonomous driving," *Proceedings Volume 11668, High-Power Diode Laser Technology XIX; 116680P*, Online Only, California, United States, 2021.

[6] Stephen Crouch, "Advantages of 3D Imaging Coherent LiDAR for Autonomous Driving Applications," *19th Coherent Laser Radar Conference*, Okinawa, Japan, 2018.

[7] Xiaosheng Zhang, Jazz Pouls, and Ming C. Wu,

"Laser frequency sweep linearization by iterative learning pre-distortion for FMCW LiDAR," *Optics Express*, vol. 27, issue 7, 2019, pp. 9965-9974.

[8] Masayuki Okano and Changho Chong, "Swept Source Lidar: simultaneous FMCW ranging and nonmechanical beam steering with a wideband swept source," *Optics Express*, vol. 28, issue 16, Aug. 2020, pp. 23898-23915

[9] Aude Martin, Delphin Dodane, Luc Leviandier, Daniel Dolfi, Alan Naughton, Peter O'Brien, Thijs Spuessens, Roel Baets, Guy Lepage, Peter Verheyen, Peter De Heyn, Philippe Absil, Patrick Feneayrou, and Jerome Bourderionnet, "Photonic Integrated Circuit-Based FMCW Coherent LiDAR," *Journal of Lightwave Technology*, vol. 36, no. 19, 2018, pp. 4640-4645

[10] Xiaochen Sun, Lingxuan Zhang, Qihao Zhang and Wenfu Zhang, "Si Photonics for Practical LiDAR Solutions," *Applied Science*, vol. 9, Issue 20, 2019, pp. 4250.

저자 소개

라종필(Jong-Pil La)



2005년 광주과학기술원 기전공학과 졸업(공학박사)
 2000년 한양대학교 대학원 기계설계학과 졸업(공학석사)
 2005년 ~ 2019년 삼성전자/탈레스 수석연구원
 2019년 ~ 현재 람다이노비전(주) 대표이사
 ※ 관심분야 : FMCW LiDAR, Coherent 통신

최지은(Ji-Eun Choi)



2001년 조선대학교 기계설계학과 졸업(공학석사)
 1999년 조선대학교 기계설계학과 졸업(공학학사)
 2019년 ~ 현재 람다이노비전(주) 총괄이사
 ※ 관심분야 : FMCW LiDAR, Coherent 통신