

연구논문

# Linear FM 신호분석을 통한 Ladar Range 영상의 시뮬레이션 Simulation of Ladar Range Images based on Linear FM Signal Analysis

민성홍\* · 김성준\*\* · 이임평\*\*\*

Min, Seonghong · Kim, Seongjoon · Lee, Imyeong

## 要 旨

Ladar (LAsER Detection And Ranging, Lidar)는 레이저 신호를 이용하여 대상지역에 대하여 정밀한 3차원 거리를 취득하는 센서로 최근 들어 미사일, 항공기 등에 탑재되어 자동표적인식 등에 활용되고 있다. 기존의 영상기반센서와 달리 센서와 표적과의 거리를 밝기나 색상 값으로 표현한 range 영상을 제공하며, 이로부터 표적의 정밀한 3차원 모델의 생성이 가능하기 때문에 표적의 인식과 식별을 가능하게 한다. 이러한 Ladar 센서의 데이터를 모의 생성한다면, 센서의 개선 및 개발 또는 센서 데이터 처리 알고리즘의 개발을 더욱 효율적으로 수행할 수 있게 될 것이다. 이에 본 연구에서는 특히 Linear FM 기반의 Ladar 센서의 신호 생성 및 신호처리 과정을 시뮬레이션하여 Ladar 영상을 모의 생성하고자 한다. 이를 위해 본 연구에서는 우선 FM chirp modulator를 탑재한 시스템의 레이저 신호를 모의로 생성하고, FFT기반 신호처리를 통해 센서와 표적과의 거리를 획득하였으며, 최종적으로 Ladar range 영상을 성공적으로 모의 생성하였다.

**핵심용어** : 레이더, 라이다, 선형주파수변조, 시뮬레이션, 거리영상

## Abstract

Ladar (LAsER Detection And Ranging, Lidar) is a sensor to acquire precise distances to the surfaces of target region using laser signals, which can be suitably applied to ATD (Automatic Target Detection) for guided missiles or aerial vehicles recently. It provides a range image in which each measured distance is expressed as the brightness of the corresponding pixel. Since the precise 3D models can be generated from the Ladar range image, more robust identification and recognition of the targets can be possible. If we simulate the data of Ladar sensor, we can efficiently use this simulator to design and develop Ladar sensors and systems and to develop the data processing algorithm. The purposes of this study are thus to simulate the signals of a Ladar sensor based on linear frequency modulation and to create range images from the simulated Ladar signals. We first simulated the laser signals of a Ladar using FM chirp modulator and then computed the distances from the sensor to a target using the FFT process of the simulated signals. Finally, we created the range image using the distances set.

**Keywords** : Ladar, LIDAR, Linear FM, Simulation, Range image

## 1. 서 론

Ladar(LAsER Detection And Ranging, Laser radar)란 레이저 신호를 이용하여 대상의 정밀한 3차원 거리를 획득하는 센서로 레이저의 주요 응용기술 가운데 하나이며, 응용 분야에 따라 레이저스캐너(Laser scanner) 또는 라

이다(Lidar)로 불리기도 한다. 초기의 Ladar는 레이저의 기술적 문제와 시스템의 복잡성으로 인해 개발에 많은 비용이 요구되었다. 그럼에도 불구하고, 다른 센서들과 달리 넓은 지역을 짧은 시간동안 정확하고 세밀하게 관측할 수 있다는 장점으로 인해 주목받아 왔다. 최근에는 레이저 및 신호처리 기술의 발전에 힘입어 Ladar 기술이

2008년 5월 28일 접수, 2008년 6월 23일 채택

\* 정희원·서울시립대학교 일반대학원 공간정보공학과 석사과정 (minssy0306@uos.ac.kr)

\*\* 정희원·서울시립대학교 일반대학원 공간정보공학과 박사과정 (sinus7953@uos.ac.kr)

\*\*\* 교신저자·정희원·서울시립대학교 공간정보공학과 조교수 (iplee@uos.ac.kr)

발전으로 이어져 왔다. 특히 Ladar 영상화 기술에 힘입어 정보의 자동적인 습득, 생성 및 시각화의 가능성이 증대되고 있다(Cho, 2006).

Ladar는 기존의 센서보다 높은 정확도 및 해상도를 가지고 있기 때문에, 대상의 탐지 및 인식에 매우 유리하여, 국방 분야에서 장거리 유도 미사일이나 유무인 정찰기 등에 탑재되어 활용하기 위한 연구가 활발하게 진행되고 있다. 예를 들어 LOCAAS (Low Cost Autonomous Attack System: 저비용 자율 공격 시스템)는 Ladar seeker를 통한 ATD (Automatic Target Detection) 기술에 의해 지상의 이동 표적을 찾고, 적인지 아군인지를 판단해서, 그 물체를 파괴하도록 설계된 소형의 자율 동력 미사일이다(이경태 외, 2002). 뿐만 아니라 측량 및 원격탐사 분야에서도 신속 정밀한 3차원 공간모델의 구축이나 도시지역의 변화 탐지, 해안선 경계 측량 등을 위해 항공/지상 레이저스캐너 등이 사용되는 등 Ladar의 활용은 점점 늘어나는 추세이다.

Ladar는 이용되는 신호탐지기술이나 신호변조기술 등에 따라 다양하게 분류된다. 신호탐지기술로는 신호를 직접 탐지하는 방식인 Direct-detection과 Local oscillator 신호를 이용해서 위상이 동기화된 송수신 신호를 탐지하는 방식인 Coherent-detection이 있다. 또한, 신호 변조 기술로는 주파수변조(Frequency Modulation, FM) 또는 진폭 변조(Amplitude Modulation, AM) 등이 있다(Kammerman, 1993).

Coherent-detection은 Direct-detection 보다 송신파와의 효율적인 이용이 가능하고, 거리나 속도 측정의 정확도가 높으며, 재밍(jamming)에 대해 강한 장점을 가진다(Cook, 1967). Coherent-detection 방식에는 헤테로다인(heterodyne)과 호모다인(homodyne) 방식이 있다. 헤테로다인 방식은 수신된 레이저 신호의 검출을 위해서 송신된 레이저 신호와 별도의 Local oscillator의 신호를 혼합(mixing)하여 이용하나, 호모다인 방식에서는 수신된 레이저 신호에 현재 송신 중인 레이저 신호를 혼합하여 이용한다. 따라서 호모다인 방식은 헤테로다인 방식보다 구조가 단순하고, 신뢰성이 높으며, 주파수 안정의 필요성이 적다는 장점을 가진다(Kammerman, 1993).

FM 방식 가운데 신호의 주파수의 크기를 시간에 따라 선형적으로 변화시키는 변조방식을 Linear FM이라고 한다. 이 방식은 FM 신호를 반송 주파수에 실어서 송신하고, 대상체로 부터 반사되어 온 신호와 송신한 FM 신호 사이의 시간 지연으로 인한 주파수 차를 측정한다. 이렇게 측정된 차주파수(Beat Frequency)는 거리와 선형적인 관계를 갖기 때문에 쉽게 거리(range)로 변환될 수 있다. 그리고 수신기는 FM 신호의 대역만 포함하면 되기 때문

에 펄스 방식에 비하여 수신기의 대역폭을 줄일 수 있는 장점이 있다. 그리고 신호 처리를 위한 기저 대역의 대역폭은 차주파수의 범위에 의해 결정되기 때문에 수신기의 잡음 특성 향상에도 이점이 있다. FM 신호는 AM 신호보다 측정 거리의 결정에 대한 모호성(ambiguity)이 적다는 장점을 가진다. 따라서 본 연구에서는 여러 가지 장점을 가지는 Linear FM 호모다인 방식의 Ladar를 대상으로 연구 및 분석을 수행 하였다.

외국에서는 Ladar 시스템뿐만 아니라 시뮬레이터에 관한 연구도 활발히 이루어지고 있다. 예를 들면, 미국의 첫 번째 위성용 라이다 시스템인 GLAS(Geoscience Laser Altimeter System)의 개발에 이용된 NASA/BPRC 시뮬레이터(Filin 등, 2000)나 Utah 주립 대학의 USU LadarSIM (Pack 등, 2006) 등이 있으며, 주로 하드웨어의 설계와 성능 평가 및 분석을 위해 활용되고 있다. 이처럼 시뮬레이션을 이용한다면, 새로운 시스템의 설계나 기존 시스템의 개선 및 보완이 보다 효율적으로 이루어질 것이다(이입평, 2003 ; 김성준 등, 2007 ; 김성준 등 2008).

레이저 신호가 아닌 마이크로파 신호를 사용하는 Radar에 관련된 연구는 국내에서 활발히 이루어 졌고, 많은 기술이 이미 상용화되었지만, Ladar 관련 기술은 아직 상용화되지 않고 있으며, 현재 사용되고 있는 Ladar 센서 시스템들은 수입된 해외 기업의 제품을 쓰고 있는 실정이다. 최근에서야 Ladar에 관련된 연구가 이루어지고 있으며, 관련 시스템을 개발하는 도중에 있다. 이에 본 연구에서는 Ladar 시스템의 개발의 기초 연구 가운데 하나로, Ladar 데이터를 시뮬레이션하고자 한다. 개발된 시뮬레이터를 이용한다면 앞으로 Ladar 시스템의 설계나 개발된 시스템의 보완 및 개량뿐만 아니라 Ladar 데이터 처리 알고리즘의 개발 등이 보다 효율적으로 이루어질 것이다.

본 연구에서는 Linear FM 호모다인 방식의 Ladar 신호를 시뮬레이션함으로써, Linear FM 방식의 Ladar 센서의 기초 연구를 통해 Linear FM Ladar 센서 데이터인 range 영상을 모의 생성하고자 하였다.

## 2. Linear FM 신호 시뮬레이션

Ladar를 시뮬레이션하기 위해서는 먼저 Ladar를 구성하는 각각의 요소들에 대한 분석이 필요하다. 그 중에 핵심적인 요소로 레이저 신호가 있으며, 송수신된 레이저 신호에 대한 분석 능력은 Ladar의 성능을 좌우하는 주요한 요소 가운데 하나이다. 본 장에서는 Linear FM Ladar의 신호에 대한 분석을 통해 Ladar 신호를 시뮬레이션하였다.

### 2.1 Linear FM Ladar의 기본 원리

Linear FM Ladar 센서는 주파수 변조된 레이저 신호를 이용하여 센서와 표적과의 거리를 결정한다. Linear FM 신호는 주파수가 시간에 따라 선형으로 증가(혹은 감소)하는 형태를 가지며, 이를 단순화하여 수식으로 나타내면 다음과 같다.

$$Asin2\pi(f_c + \Delta f)t \quad (1)$$

$A$ 는 신호의 진폭을 나타내고,  $f_c$ 는 반송 주파수,  $\Delta f$ 는 시간에 따라 변하는 주파수의 크기를 나타내며 식 (2)처럼 표현된다. 여기서  $a$ 는 단위시간당 변하는 주파수의 크기를 의미한다.

$$\Delta f = at \quad (2)$$

만약 식 (1)과 같은 Linear FM 형태의 신호를 시각  $t_1$ 에서 송신한 후, 표적에 의해 반사되는 신호를 시각  $t_2$ 에서 수신하였다고 가정하면, 이 때 수신한 신호의 주파수  $f_1$ 과 시각  $t_2$ 에서 송신되고 있는 신호의 주파수  $f_2$ 는 다음 식과 같다.

$$f_1 = f_c + at_1 \quad (3)$$

$$f_2 = f_c + at_2 \quad (4)$$

$t_1$ 에서 송신하여  $t_2$ 에서 수신한 신호와  $t_2$ 에서 센서에 발생하고 있는 신호의 주파수의 차이로부터 송수신 시간의 차이 ( $\Delta t$ )를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{f_2 - f_1}{a} \quad (5)$$

송수신 시간의 차이에 신호가 이동하는 속도인 광속( $c = 3 \times 10^8$  m/s)를 곱하면 센서와 표적과의 왕복거리가 결정되고, 이로부터 센서와 표적과의 거리( $r$ )를 구할 수 있다.

$$r = \frac{(t_2 - t_1)}{2} c = \frac{f_2 - f_1}{2a} c \quad (6)$$

이와 같은 원리에 의해 Ladar 수신기는 주파수의 차이를 결정하고, 센서와 표적간의 거리를 결정한다. 여기서 주파수의 차이는 신호에 대한 푸리에 변환(Fourier Transform)을 통해 정확하게 결정된다. 또한, 거리(range)

가 주어진다면 이 성질을 이용하여 역으로 송수신 시간 차이를 계산할 수 있으므로 이를 통해 주파수의 차이를 계산하여 Ladar가 수신한 신호를 모의 생성할 수 있다.

### 2.2 Linear FM Ladar의 구성

Linear FM Ladar의 일반적인 시스템의 구성은 그림 1과 같다. 레이저 발진기에서 생성된 레이저 신호는 Linear FM Modulator에서 시간에 따라 선형적으로 주파수가 변조되어 송신된다. 송신된 신호는 대상 체에 반사되어 수신기를 통해 획득된다. 수신된 신호는 Optical Mixer에서 현재 송신되고 있는 레이저 신호와 혼합된다. 이 광학 신호는 Photosensitive Detector를 통해 전기 신호로 변환되며, 이 변환된 신호는 Low Pass Filter (LPF)를 통과하면서 잡음과 불필요한 고주파 영역의 신호가 제거된다. 이 신호를 A/D converter에 적용하여 아날로그 형태의 전기 신호를 디지털 신호로 변환시킨다. 변환된 신호를 고속 푸리에 변환(Fast Fourier Transform, FFT)에 적용하여 신호의 주파수를 구한다. 최종적으로 주파수로부터 센서와 대상 체와의 거리를 정밀하게 결정한다.

### 2.3 Linear FM 신호의 시물레이션

Linear FM Ladar의 신호 특성을 이용하여 실제로 송수신된 레이저 신호를 생성하였다. 본 연구에서 시물레이션하려는 신호는 Nd:YAG 레이저 신호로 아래 표 1과 같은 특성을 가진다.

송수신간의 주파수 차이를 계산하기 위해 시물레이션

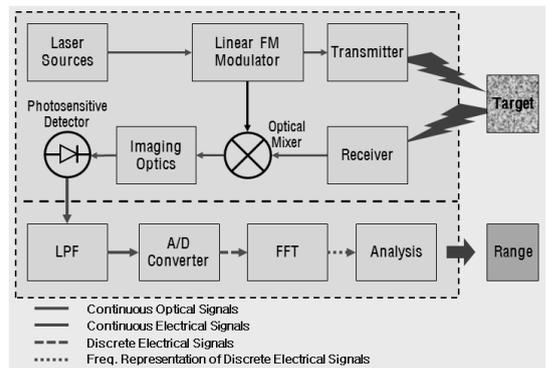


그림 1. Linear FM Ladar의 구성

표 1. Nd:YAG 레이저 신호 특성

| 종 류 | Nd:YAG         |
|-----|----------------|
| 파 장 | 1.06 $\mu$ m   |
| 주파수 | 283,018.87 GHz |

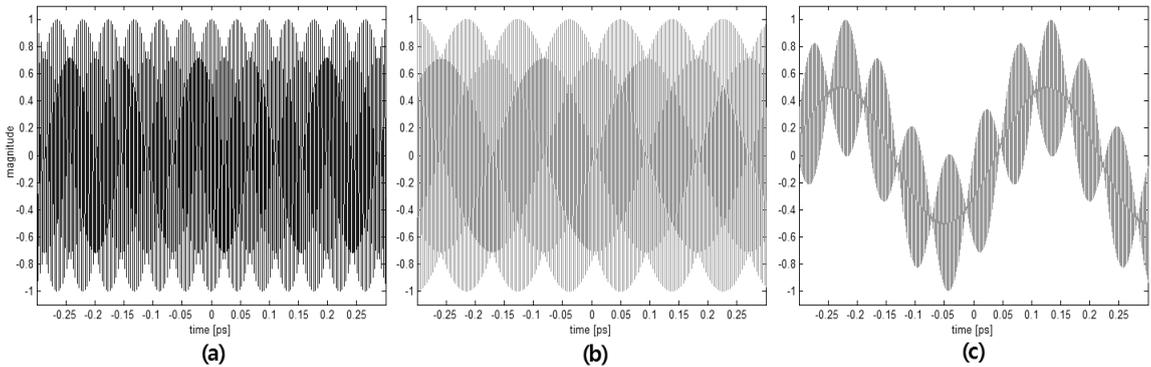


그림 2. 모의 생성된 레이저 신호: (a) 수신된 신호의 파형( $R_x$ ), (b) Local oscillator의 신호의 파형( $T_x$ ), (c) Mixer에서  $T_x$ 과  $R_x$ 이 혼합된 파형( $M_x$ )

상의 표적과 센서의 거리는 1,500m로 주파수 변조율( $a$ )은  $10\mu\text{s}$ 당 기본 주파수의 1%로 설정하였다.

국부 발진기(Local oscillator)의 신호( $T_x$ ), 수신 신호( $R_x$ ), 그리고 이 두 신호를 혼합한 신호(Mixed 신호,  $M_x$ )는 각각 다음 식 (7), (8), (9)와 같이 표현된다. 또 그림 2는 이 신호의 일부 구간을 시각화한 것이다. 여기서  $f_0$ 는 Nd:YAG 레이저 신호의 기본 주파수이다.

$$T_x = \sin\{2\pi(f_0 + at)t\} \tag{7}$$

$$R_x = \sin[2\pi\{f_0 + a(t - \Delta t)\}(t - \Delta t)] \tag{8}$$

$$M_x = T_x \times R_x \tag{9}$$

## 2.4 Linear FM 신호처리

### 2.4.1 창함수 적용

Linear FM신호에서 창함수의 주된 목적은 스펙트럼의 특성이 창함수의 구간에서 변화하지 않도록 변환될 수열의 크기를 제한하는 것이다. 가장 일반적인 창함수로는 직사각형 창함수와 카이저 창함수(Kaiser window Filter)가 있다. 특히, 카이저 창함수는 길이( $M+1$ )와 형상 파라미터( $\beta$ )를 변경시킴으로써 창의 주엽의 폭과 부엽의 면적을 적절히 조절할 수 있다. 이 때문에 직사각형 창함수에서 나타나는 주파수 누출(spectral leakage)로 인해 발생하는 깁스(Gibbs) 현상을 최소화하는 최적의 창함수를 카이저 창함수 설계법을 통해 구현할 수 있다(Oppenheim 등, 1999).

일반적인 이산 푸리에 변환(Discrete Fourier Transform, DFT)의 경우에 창함수의 길이가 길어질수록 정확한 주파수 값을 얻을 수 있다. 하지만 어느 정도 이상 창의 길이가 길어지면 정확도도 증가하지 않을 뿐만 아니라, 창

함수의 길이에 비례하여 계산해야 될 데이터 량이 증가하게 되어, 계산 시간 및 컴퓨터의 메모리에 부담이 된다. 특히, Linear FM 신호인 경우에는 긴 시간 동안의 신호를 포함하게 되므로 주변 주파수에 의한 영향도 커지게 된다.

본 실험에서는 레이저 신호 분석에 사용되는  $\beta$ 값인 5.653을 적용하였고, 창의 길이는 최대주파수의 4배로 오버 샘플링한 샘플링 주파수를 이용하여,  $-0.01 \sim 0.01\text{ms}$ 의 시간에 대해 0.000866ps의 시간 간격으로 524,288개의 샘플에 대해 창함수를 적용하였다. 또한 창의 길이가 정확도에 미치는 영향 및 계산 시간에 대하여도 시뮬레이션을 통해 분석을 수행하였다.

### 2.4.2 FFT 알고리즘을 이용한 거리계산

이산 푸리에 변환을 통해 송수신 신호의 주파수를 각각 구할 수 있으며, Linear FM 방식을 사용하였기 때문에 주파수의 차이 값과 주파수 변조율을 이용하여 송수신 시간차이 및 대상 체와 센서의 거리를 계산할 수 있다. 본 시뮬레이션에서는 신호의 주파수 영역에서의 값을 계산하기 위해 FFT 알고리즘을 사용되었다. FFT 알고리즘은 DFT를 효율적으로 실행하기 위한 알고리즘이다.

본 연구에서는 신호처리에 일반적으로 사용되는 방법인 Low Pass Filter와 A/D converter를 적용하여 얻어낸 Mixed 신호의 최고 크기를 가지는 주파수 값을 이용하여 센서와 대상체간의 거리를 계산하였다. 먼저 Mixed 신호에 Low Pass Filter를 적용하여 고주파 영역의 잡음이 제거된 유효 주파수를 획득하고, A/D converter를 통하여 샘플링을 하여 이산신호로 표현한 후, FFT 알고리즘으로 최대값을 가지는 주파수 값을 구하였다(그림 3 참조). 여기서 구해진 주파수 값을 통해 왕복지연시간을 구하여 거리를 측정하였다.

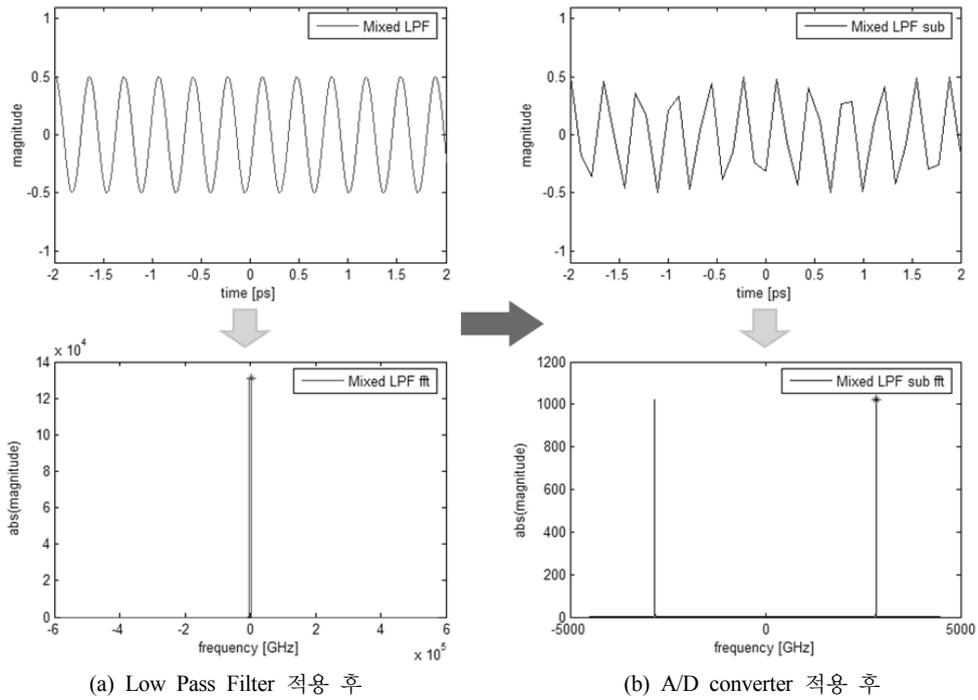


그림 3. Low Pass Filter와 A/D converter가 적용된 Mixed 신호

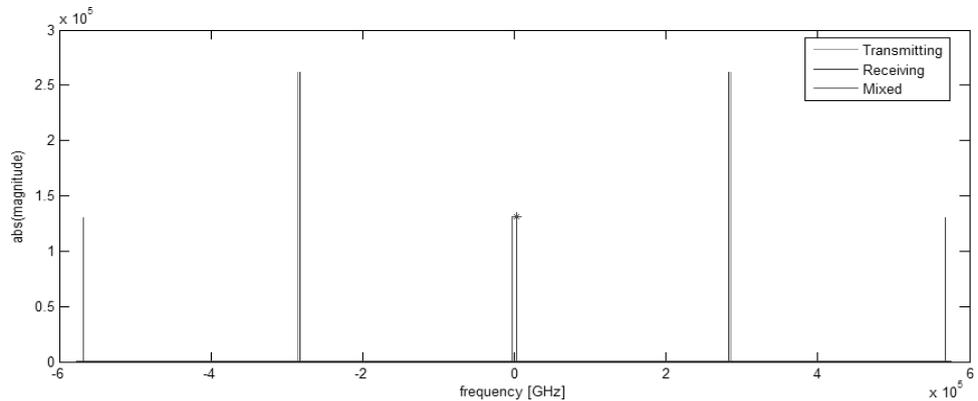


그림 4. 시뮬레이터에서 생성된 각 신호의 주파수

2.5 정확도 분석

계산된 시뮬레이션 결과에 대한 분석을 위해 다음의 두 가지 방법으로 센서와 표적과의 거리를 계산하여 그 결과를 비교하여 보았다. 시뮬레이션에 입력한 거리 값과 생성된 송수신 레이저 신호로부터 계산된 주파수 분석 결과 측정된 결과를 비교하였다.

결과 분석을 위해 센서와 표적과의 거리를 계산한 방법은 다음의 두 가지이다. 먼저 송수신 신호 사이의 최고 크기를 가지는 주파수 간의 주파수 차이를 이용하는 방

법과 레이저 도달 가능거리에 의한 주파수 변조 유효 구간에서 Mixed 신호의 최고 크기를 가지는 주파수 값을 이용하는 방법이다.

첫 번째 방법은 FFT 알고리즘을 이용하여 Local oscillator 신호 및 수신신호의 주파수 영역에서의 값을 구한 후, 두 주파수에서 최대 크기를 가지는 주파수 값을 각각 구하고 그 주파수의 차이를 구함으로써 송수신 주파수 간의 변화량을 측정(그림 4 참조)하여, 시준 시간당 주파수 변화율( $a$ )을 이용하여 왕복지연시간을 계산하여 거리를 측정

**표 2.** Ladar 시뮬레이터의 정확도 분석 결과

| 송수신차     | 기준값         | 시뮬레이션 결과    | 분석 실험1      | 분석 실험2      |
|----------|-------------|-------------|-------------|-------------|
| 주파수(GHz) | 2830.188679 | 2830.145494 | 2830.145494 | 2830.145494 |
| 편 차      |             | -0.043185   | -0.043185   | -0.043185   |
| 시간(us)   | 10.000000   | 9.999847    | 9.999847    | 9.999847    |
| 편 차      |             | -0.000153   | -0.000153   | -0.000153   |
| 거리(m)    | 1500.000000 | 1499.977112 | 1499.977112 | 1499.977112 |
| 편 차      |             | -0.022888   | -0.022888   | -0.022888   |
| 비율(%)    |             | -0.001526   | -0.001526   | -0.001526   |

**표 3.** Ladar 시뮬레이터의 창함수의 길이에 따른 정확도와 계산시간 실험 결과

| 창함수 길이 비율     | 1/4 배        | 1/2 배        | 1 배          | 2 배          | 4 배          |
|---------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| 창함수 길이(샘플수)   | 131,072      | 262,144      | 524,288      | 1,048,576    | 2,097,152    |
| 창함수 신호 시간(ns) | 0.113509     | 0.227019     | 0.454039     | 0.908079     | 1.843267     |
| 측정된 거리(m)     | 1,498.809814 | 1,501.144409 | 1,499.977112 | 1,499.977112 | 1,499.771118 |
| 실제거리와의 편차     | -1.190186    | 1.144409     | -0.022888    | -0.022888    | -0.022888    |
| 비 율(%)        | -0.079346    | 0.076294     | -0.001526    | -0.001526    | -0.001526    |
| 계산 시간(sec)    | 0.922        | 1.859        | 3.687        | 7.078        | 14.594       |

하였다.

두 번째 방법은 먼저 Local oscillator 신호와 수신된 신호를 곱하여 생성된 Mixed 신호를 생성한 후, 설정된 레이저 주파수 변조율과 신호의 최대 가능 거리(실제 변조되는 레이저 주파수의 최대값)를 고려한 유효 범위 내에서 구하여진 Mixed 신호의 최고 크기를 가지는 주파수 값(그림 4 참조)이 송수신 주파수의 변화량이므로 이를 이용하여 거리를 계산하였다.

시뮬레이션된 결과에 대해서 주파수, 시간, 거리의 세 항목에 관하여 비교하여 본 결과 표 2와 같은 결과를 얻었으며, 1,500m의 거리에 대하여 측정된 정확도가 -2.29 cm로 약 0.0015% 정도의 오차 범위의 정밀한 측정 결과를 얻을 수 있었다. 시뮬레이션 결과 및 그 결과를 검증하기 위한 분석 실험에 의한 측정 결과가 모두 동일하게 나왔다.

창의 길이와 거리 정확도 및 계산시간과의 관계에 대한 실험도 수행하였다. 2.4.2절에서 기술한 거리측정 방법을 사용하여 계산하였으며, 다른 조건은 이전 실험과 동일하게 설정하였으며, 창의 길이에 대해서만 이전 실험에 사용한 창의 길이를 다양하게 변화시켜 그 결과를 비교하여 보았다.

실험 결과는 표 3과 같으며, 다른 조건이 같은 경우에 창의 길이가 길어지면, 어느 정도까지는 정확도가 증가

하다가 더 이상 증가하지 않음을 볼 수 있다. 뿐만 아니라 계산시간은 창의 길이에 비례하여 길어짐을 볼 수 있는데, 이것은 창의 길이가 길어질수록 샘플수가 증가하게 되어 FFT 알고리즘으로 계산되어야 하는 데이터의 양이 많아지기 때문이다. 본 시뮬레이션의 결과에서 보듯이, 앞에서 설명한 시뮬레이션에 사용된 조건을 가지는 Ladar 시스템에 최적인 창함수의 길이는 약 520,000개 정도의 샘플을 가지는 경우에 가장 정밀한 정확도를 가지면서 계산시간이 가장 짧은 결과를 얻을 수 있음을 알 수 있다.

이처럼 시뮬레이터를 사용한다면, Ladar의 시스템변수를 변경시키면서 모의실험을 수행하여 최적의 변수를 설정할 수 있다. 그러므로 실제 시스템의 개발이나 보안을 할 경우 이러한 시뮬레이터를 이용한다면 시간과 비용을 크게 절감할 수 있다.

### 3. Ladar Range 영상 생성

#### 3.1 Ladar range 영상생성 원리

시뮬레이션에 의해 Ladar range 영상을 생성하려면, 센서의 위치 및 자세에 대한 정보, 레이저 신호의 정보, DEM 등 지표의 3차원 모델 등 여러 종류의 정보가 필요하다. 본 연구에서는 지상에서 약 1,500m의 고도에서 지상으로 수직으로 스캔하는 Ladar 센서를 상정하여, 그림

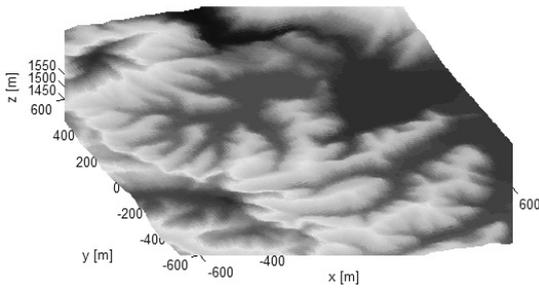


그림 5. 기준 DEM의 3차원 시각화

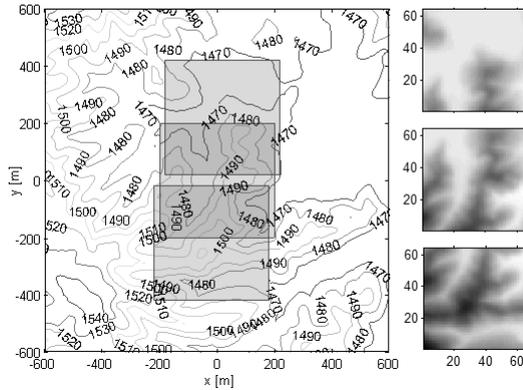


그림 6. DEM상의 Ladar 스캔 범위(좌)와 생성된 Ladar range 영상(우)

5의 DEM 상에서 일정 범위를 Ladar로 스캔하였을 경우에 생성되는 Ladar의 거리 측정 데이터를 이용하여 range 영상을 생성하였다.

먼저, 입력된 DEM 상에서 일정 간격으로 위치를 샘플링하여 센서와의 실제 거리를 획득하였다. 그리고 이전장에서 실험된 Linear FM Ladar의 신호처리 시뮬레이션

을 이용하여 거리를 측정하고, 측정된 거리 값을 영상의 밝기나 색상 값으로 환산하여 range 영상을 생성하고, 생성된 영상(측정된 거리)의 정확도를 분석하였다.

### 3.2 Linear FM 신호처리를 이용한 Ladar range 영상 생성 시험 결과

이전 절의 Ladar range 영상생성 원리에 소개한 방법을 프로그램으로 구현하여 64 × 64 픽셀 해상도의 Ladar range 영상을 생성하였다. 입력으로 사용된 기준 DEM (그림 5)은 항공라이다측량으로 취득된 데이터에서 생성하였으며, 격자간격은 10m, 면적은 1.2km x 1.2km 영역이고, 고도는 1,450~1,550m의 범위이다. 항공기나 미사일의 이동에 따라 Ladar에서 취득되는 결과를 보여주기 위해, Ladar 센서 플랫폼의 높이는 3,000m로, DEM 범위 내에서 센서의 이동을 고려하여 3개의 스캔 영역을 설정하였다. 다음 그림 6에서 우측의 3개의 서브 영상은 기준 DEM에 대하여 3개의 스캔 영역(그림6에서 지도의 붉은 사각형 부분)에 대하여 앞에서 소개된 Ladar 신호 시뮬레이션을 통해 계산된 거리 값을 256단계의 그레이 스케일(Gray scale)로 샘플링하여 Ladar range 영상을 생성한 결과이다. 밝은 색으로 표현된 부분은 센서와 지상과의 거리의 차가 큰 지점(낮은 지역)이고, 영상의 명도가 낮아 질수록 센서와 지상과의 거리의 차가 작은 지점(높은 지역)을 나타낸다. 그림 7은 그림 6의 스캔 범위에서 동일하게 측정된(모의 생성된) 거리 값에 대한 Ladar range를 컬러 영상으로 생성한 결과이다. 그림 7의 영상에서 보듯이 컬러 영상을 이용한다면 거리에 대한 보다 정밀한 표현이 가능함을 보여준다.

### 3.3 Ladar range 영상의 정확도 분석

생성된 Ladar range 영상에 대한 정확도를 분석하였다.

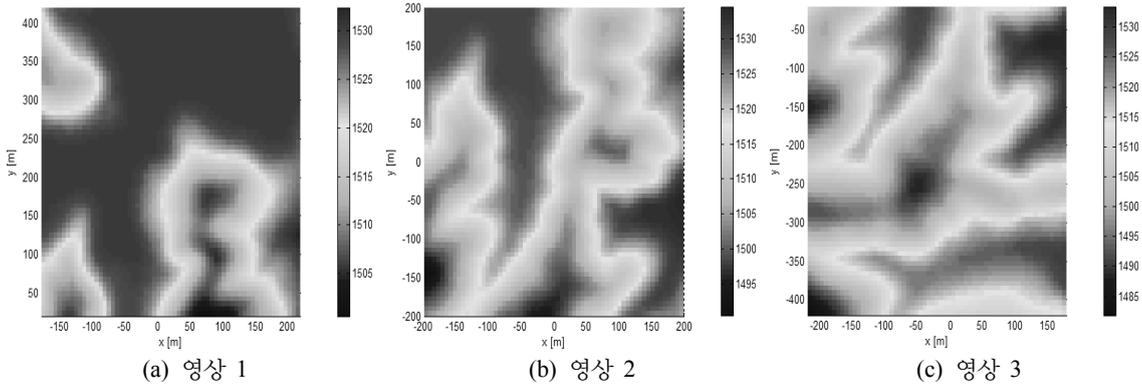


그림 7. 컬러 값으로 표현된 Ladar range 영상 (그림6의 사각형 영역)

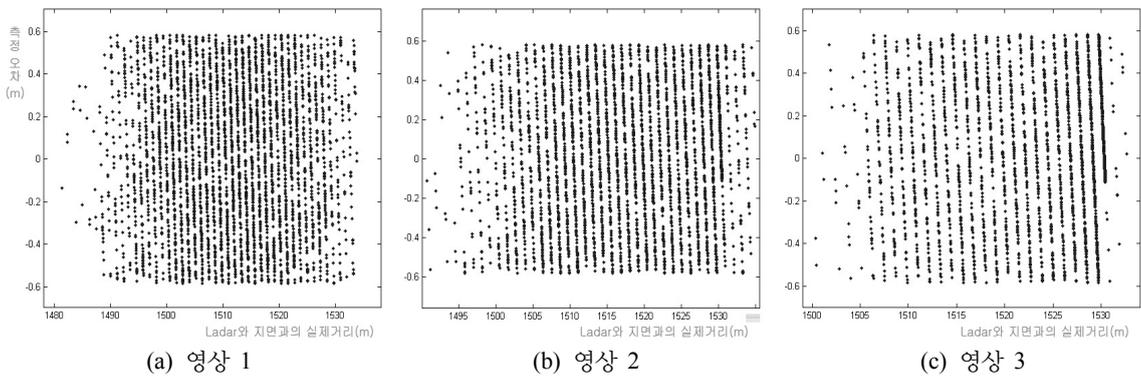


그림 8. 실제 거리에 대한 생성된 Ladar range 영상의 오차의 분포

표 4. 생성된 Ladar range 영상의 정확도 분석 결과

|       | 영상1       | 영상2      | 영상3       |
|-------|-----------|----------|-----------|
| 평균(m) | -0.002060 | 0.003890 | -0.020373 |
| 표준편차  | 0.331985  | 0.333956 | 0.276658  |

기준 DEM 상에서 샘플링된 좌표로부터 계산되는 센서와의 실제 거리 데이터와 이 값을 이용하여 Ladar 시뮬레이터에서 range 영상을 생성하기 위해 계산되어진 Ladar 신호 분석에 의한 결과 값(Ladar range 측정결과 값)과의 비교를 통해서 Linear FM Ladar에서 생성된 range 영상의 정확도를 평가하였다. 실제 거리의 참값과 Ladar range 영상으로 측정된 거리의 차이가 Ladar range 영상의 오차를 의미한다. 이러한 오차는 Ladar range 영상을 구성하는 개별 픽셀(또는 개별 거리값)에 따라 달라진다. 그림 8은 개별거리값에 따른 오차의 분포를 보여준다. 그림에서 보듯이 오차는  $\pm 60$  cm의 범위안에 나타난다. 대부분의 오차는 FFT 신호처리를 통해 계산되는 주파수의 해상도에 기인한다. 보다 높은 해상도의 주파수를 얻으려면 창함수를 길게하면 되지만 이런 경우는 2.5절에서 언급한 것처럼 연산시간이 길어지고, 또한 주변 주파수의 영향을 크게되어 해상도는 높지만 정확도가 오히려 떨어지는 현상이 발생한다. 표 4는 이러한 개별 오차에 대한 통계값을 보여준다. 3개의 영상에서 오차의 평균이  $\pm 2$ cm 정도인 정확도로 거리가 측정되었으며, 거리 오차의 표준편차도 33cm 이내로 나타났다.

### 4. 결 론

본 연구에서는 Nd:YAG 레이저 신호의 기본주파수와 Linear FM chirp modulator의 기본 특성을 이용하여, Linear FM Ladar의 송수신 신호를 모의로 생성하였고,

이를 이용하여 range 영상을 생성하는 시뮬레이션을 수행하였다. 그 결과 기준 DEM의 일정 범위에 대해 Ladar 시뮬레이터로 생성된 Ladar range 영상에서 측정된 거리의 평균 정확도는  $-2.0\text{cm} \sim 0.4\text{cm}$ 로 분석되었고, 상당히 정확한 Ladar range 영상이 성공적으로 모의 생성되었음을 확인할 수 있었다. 이에 비해 거리오차에 대한 표준편차로 분석되는 측정된 거리의 해상도는 약 33cm 정도로 평균정확도에 비해 크게 떨어짐을 알 수 있었다.

본 논문의 연구를 통해 개발된 시뮬레이터를 이용한다면 Linear FM 방식의 Ladar의 설계나 분석을 할 때 다양한 시스템 변수를 적용한 모의실험을 통해 보다 저렴한 시간과 비용으로 최적화된 시스템의 변수를 결정할 수 있다. 또한, 시뮬레이터를 통해 모의생성된 Range 영상은 자동표적인식 등 다양한 데이터 처리 알고리즘을 개발하기 위해 효율적으로 적용될 수 있다.

본 연구에서는 Ladar 신호 분석에 의한 range 측정에 초점을 두고 진행되었으며, Ladar 신호의 intensity 부분에 대해서는 고려하지 않았다. 앞으로의 연구는 Ladar 신호의 intensity에 대한 부분을 추가로 고려하여, Ladar 시스템에서 생성되는 range 영상뿐만 아니라 intensity 영상도 모의 생성이 가능하도록 Ladar 시뮬레이터를 보완 할 예정이다.

### 감사의 글

본 연구는 한국과학기술원 영상정보특화연구센터의 II-21 “레이저 영상 신호특성모델링 기법 연구” 과제를 통한 방위사업청과 국방과학연구소의 연구비 지원으로 수행되었습니다.(계약번호 UD070007AD)

## 참고문헌

1. 이경태, 김정엽, 이기학, 2002, "UCAV 시스템의 현재와 전망 (2)", *한국항공우주학회지*, 제30권, 제4호, pp.1 45-159.
2. 이임평, 2003, "고해상도 DEM을 이용한 시뮬레이션에 기반하는 라이다 데이터의 검증 및 보정에 관한 연구", *2003년도 정기 학술대회 논문집*, 대한토목학회, pp. 4436~4440.
3. 김성준, 민성홍, 이임평, 2007, "Ladar 센서의 기하모델링 및 데이터 시뮬레이션", *2007년도 한국군사과학기술학회 종합학술대회 논문집*, 한국군사과학기술학회, pp. 409~412.
4. 김성준, 민성홍, 이임평, 최경아, 2008, "항공라이다시스템의 기하모델링 및 데이터 시뮬레이션", *한국측량학회지*, 제26권, 제2호.
5. Cho, P., Anderson, H., Hatch R. and Ramaswami, P., 2006, "Real-Time 3D Ladar Imaging", *HPCMP Users Group Conference*, June 2006, pp. 321-326.
7. Cook, C. E. and Bernfeld, M., 1967, *Radar Signals an Introduction to Theory and Applications*, Academic, New York.
8. Filiin, S. and Csatho, B., 2000, *An Efficient Algorithm for the Synthesis of Laser Altimetry Waveforms*, BPRC Technical Report No. 2000-02, The Ohio State University, Columbus, OH, p. 27.
9. Kamerman, G. W., 1993, "Laser Radar", *The Infrared and Electro-Optical Systems Handbook*, Vol. 6, Ch. 1, ERIM & SPIE Optical Engineering Press, pp. 3-5, 35-44.
10. Oppenheim, A. V., Schafer, R. W. and Buck, J. R., 1999, *Discrete-time Signal Processing*, Prentice Hall, pp. 474-485, 693-722.
11. Pack, R. T., Saunders, D., Fullmer, R., Budge, S., 2006, "The simulation of automatic ladar sensor control during flight operations using USU LadarSIM Software", *Proceedings of SPIE Vol. 6214*, 62140L.