THE JOURNAL OF KOREAN INSTITUTE OF ELECTROMAGNETIC ENGINEERING AND SCIENCE. 2017 Mar.; 28(3), 208～216.

http://dx.doi.org/10.5515/KJKIEES.2017.28.3.208
ISSN 1226-3133 (Print) · ISSN 2288-226X (Online)

광 지연선을 이용한 FMCW 전파고도계 시뮬레이터 개발

Development of an FMCW Radar Altimeter Simulator Using Optical Delay Lines

이 재 환

Jae-Hwan Lee

요 약

본 논문은 주파수 변조 연속파(FMCW) 전파고도계의 성능평가를 위한 전파고도계 시뮬레이터 설계 및 개발 내용에 관한 것이다. 전파고도계 시뮬레이터는 전파고도계의 송신 신호를 인가받아 표적과의 거리에 해당하는 만큼 시간 지연된 가상의 수신 신호를 만들어 주는 역할을 하는데, 본 논문에서는 종래의 전파지연 방식인 RF 지연방식의 기술적 한계를 극복하여 광섬유를 지연소자로 활용함으로써 실제 비행고도에 맞는 다양한 고도의 모의를 가능하게 하였다. 또한, 실제 비행 환경에서 발생할 수 있는 도플러 천이(Doppler shift) 및 재밍(jamming)을 모의할 수 있도록 시뮬레이터를 설계하였다. 개발한 시뮬레이터의 성능은 자체 성능평가 및 전파고도계 연동시험을 통해 성공적으로 검증하였다.

Abstract

This paper presents the design method of an FMCW(frequency-modulated continuous-wave) altitude simulator which generates propagation delay signals according to target distances to test the radar altimeter. To improve the conventional RF method for creating delay signals, the simulator is designed by the RF-optics-RF method using optical delay lines. In addition, it is designed to simulate the Doppler shift and jamming that may occur in actual flight environment. In order to evaluate the performance of the developed simulator, the integration tests have been conducted with the radar altimeter. Through the test, we successfully verified the performance of the simulator.

Key words: FMCW, Radar Altimeter, Simulator, Optical Delay Line

Ⅰ. 서 론

초고주파(RF: Radio Frequency)를 이용하는 전파고도계(RA: Radar Altimeter)는 플랫폼과 표적사이의 상대고도를 측정하기 위해 전파를 송신하고, 되돌아오는 반사파를 수신하여 두 전파사이의 상호관계를 이용하여 고도를 측정하는 시스템이다[1]. 일반적으로 전파고도계에 널리 사용되는 방식인 FMCW(Frequency-Modulated Continuous-Wave) 방식은 시간에 따라 주파수가 선형적으로 변하는 주파수 변조(FM) 신호를 연속적으로 송신하고, 표적에 반사되어 시간 지연된 신호를 수신하여, 송신 신호와 수신 신호와의 주파수 차(beat frequency)를 측정함으로써 표적과의 거리를 계산한다[2]~[5].

전파고도계는 항공기의 이/착륙, 자동비행 항법, 지형

국방과학연구소(Agency for Defense Development)
· Manuscript received December 26, 2016 ; Revised February 8, 2017 ; Accepted March 6, 2017. (ID No. 20161226-130)
· Corresponding Author: Jae-Hwan Lee (e-mail: jaehwanlee@add.re.kr)

ⓒ Copyright The Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science. All Rights Reserved.

대조 항법(TRN: Terrain Referenced Navigation)[6]등을 위한 중요한 항법 센서로, 비행체의 안전성을 보장하기 위해 정밀한 고도측정 능력이 요구된다. 이러한 전파고도계의 측정 고도에 대한 정확도를 평가하는 것은 매우 중요한 사항으로 다양한 요소들을 고려하여 결정하여야 한다. 전파고도계의 측정고도 정확도를 평가하는 방법으로 항공기/헬기 탑재시험[7], 야외 크레인 시험[8] 등의 실고도 계측시험을 들 수 있는데, 이 경우 전파고도계 안테나 빔폭, 비행체의 높이 및 지형의 굴곡에 따라 고도 오차가 발생할 수 있고[9], 또한 별도의 야외시험시설과 계측 장비들을 필요로 하며, 시험을 수행하는데 많은 비용과 시간이 소요된다. 반면, 본 논문에서 언급하고자 하는 것처럼, 전파고도계 전용 시뮬레이터를 이용한 시험은 실험실에서 비교적 쉽고 정확하게, 다양한 고도에 대한 성능평가가 가능하다.

전파고도계 시뮬레이터의 핵심은 전파고도계의 송신 신호를 인가받아 지면과의 고도에 해당하는 만큼 시간 지연된 가상의 수신 신호를 만들어 전파고도계 수신기로 인가하는 것이다. 이를 위한 종래의 방법은 크게 2가지로 나눌 수 있는데, 그 중 한 가지는 동축케이블을 사용하여 케이블 길이만큼 전파지연을 시키는 것이고, 다른 한 가지는 벌크 탄성파(BAW: Bulk Acoustic Wave) 지연 소자를 사용하여 전파지연을 시키는 것이다[10]. 동축케이블의 경우, 케이블 길이가 길어질수록, 사용 주파수가 높아질수록 신호 손실이 매우 크게 증가하는 단점이 있다[11]. 따라서 상대적으로 원거리 목표물에 대한 시간 지연을 만들 때 매우 비효율적이다. BAW 지연 소자의 경우, RF 입력 신호에 대해 특정 고도에 해당하는 전파지연을 구현할 수 있지만, 사용주파수 대역이 제한적일 뿐만 아니라, 손실이 크고 원하는 다양한 고도를 모사하기 어려운 단점이 있다. 이와 같이 종래에는 전파지연을 만드는데 일정한 제한이 있어 전파고도계 시험을 위한 다양하고 정밀한 고도 모사가 어려웠던 것이 현실이었다.

본 논문에서는 종래기술의 한계를 극복하여 실제 비행고도에 맞는 다양한 고도를 모의하기 위해 광섬유(optical fiber)를 지연소자로 활용한 FMCW 전파고도계 시뮬레이터 개발 내용을 다루었다. 즉, 전파고도계의 RF 송신신호를 전광(E/O: Electrical to Optical) 변환기를 통해 광신호로 변환한 다음 광섬유 네트워크를 이용하여 신호를 지연시키고, 다시 광전(O/E: Optical to Electrical) 변환기를 통해 광 신호를 RF 신호로 변환함으로써 모의 고도에 해당하는 지연신호를 발생시키는 방법이다[2]. 이 방법은 광섬유의 저 손실특성과 다양한 광섬유 지연 네트워크를 구성할 수 있는 장점으로 인하여 초고주파를 이용하는 전파고도계에 대한 정밀하고 신뢰성 있는 성능평가가 가능하게 된다. 본 논문에서 대상으로 하는 전파고도계는 Ku 대역의 전파고도계로, 전통적으로 사용되던 C 대역 전파고도계에 비해 온도 변화 등의 환경에 강건하고, 측정 오차율도 향상되었다[10]. 한편, 전파고도계 시뮬레이터는 비행체의 이동속도에 따라 발생하는 도플러 천이(Doppler shift)[12] 및 주변 환경에서의 의도적인 전파 방해(jamming)[13]를 모의하도록 구현하여 실제 전파고도계 운용 조건에서 발생할 수 있는 환경적 영향을 모사하도록 하였다.

본 논문의 2장에서는 FMCW 전파고도계의 동작이론에 대해 언급하고 동작이론에 따른 시뮬레이터 설계내용을 설명한다. 3장에서는 전파고도계 시뮬레이터의 제작 및 성능측정결과에 대한 상세 설명을 하고, 마지막으로 4장에서는 전체 내용을 종합하여 결론을 맺는다.

Ⅱ. 전파고도계 시뮬레이터 설계

2-1 FMCW 전파고도계 시뮬레이터 동작이론

그림 1은 FMCW 전파고도계의 송수신 파형을 나타낸 것으로 그림 1에서와 같이 삼각파 변조를 하는 경우, 거리에 의한 비트 주파수 f_r은 식 (1)로 나타낼 수 있다[2],[3],[17],[19].

$$f_r = \frac{f_{b_up} + f_{b_down}}{2} = \frac{4\triangle F f_m R}{c} \quad (1)$$

여기서 $\triangle F$ (Hz)는 변조대역폭, f_m(Hz)은 변조주파수, c (m/s)는 광속, R(m)는 고도이다. 식 (1)에서 f_{b_up}(Hz)은 up-sweep 시의 비트 주파수를 나타낸 것이고, f_{b_down}(Hz)은 down-sweep 시의 비트 주파수를 나타낸 것으로, 지형과의 상대속도 V_r(m/s) 에 따른 도플러 천이 f_d(Hz)에 의해 f_{b_up}과 f_{b_down}이 다르게 나타난다. 그림 1에서 비

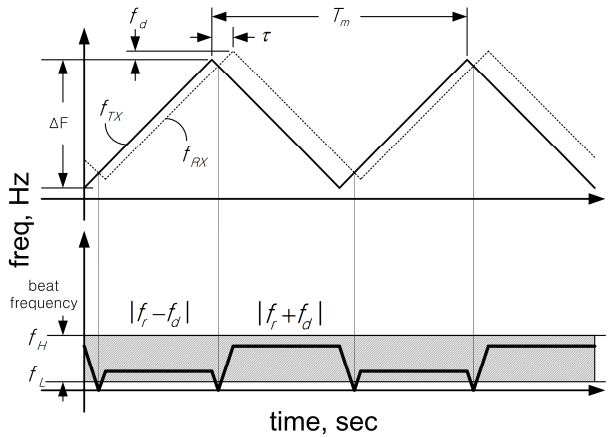

그림 1. FMCW 변조 파형
Fig. 1. FMCW modulation waveform.

트 주파수는 $f_{b_up}=f_r-f_d$, $f_{b_down}=f_r+f_d$로 나타낼 수 있으며, f_{b_up}과 f_{b_down}을 측정하여 평균을 취함으로써 식 (1)과 같은 거리주파수 f_r로 나타낼 수 있다[19]. 식 (1)에서 f_r은 측정값, $\triangle F$ 및 f_m은 설정 값이고, c는 상수이므로 고도 R을 산출할 수 있다.

한편, 그림 1에서 전파고도계 송신 신호와 수신 신호간의 시간차인 τ는 식 (2)와 같이 고도 R에 대한 식으로 나타낼 수 있다. 즉, 전파고도계 시뮬레이터를 구현하기 위해서는 고도에 따른 전파 지연시간 τ(sec)를 가변시킬 수 있어야 한다.

$$\tau = \frac{2R}{c} \tag{2}$$

본 논문에서는 전파 지연을 통한 고도 모의 기능을 갖는 전파고도계 시뮬레이터를 그림 2와 같이 구성하였다.

구성한 시뮬레이터는 크게 제어 및 전원부, RF부, 신호지연부로 나타낼 수 있다. 제어 및 전원부는 외부의 제어기(PC)로부터 제어명령을 받아 전파고도계 및 시뮬레이터를 제어하고, 시뮬레이션 수행 결과를 제어기를 통해 출력한다. 또한, 내부 스위칭 회로를 통해 전파고도계 및 시뮬레이터 각각의 모듈에 필요한 전원을 공급한다. RF부는 전파고도계와 인터페이스 되어 전파고도계로부터 받은 송신신호를 신호지연이 가능한 주파수 대역으로 하향변환하고, 신호 지연된 신호를 원래의 주파수 대역으로

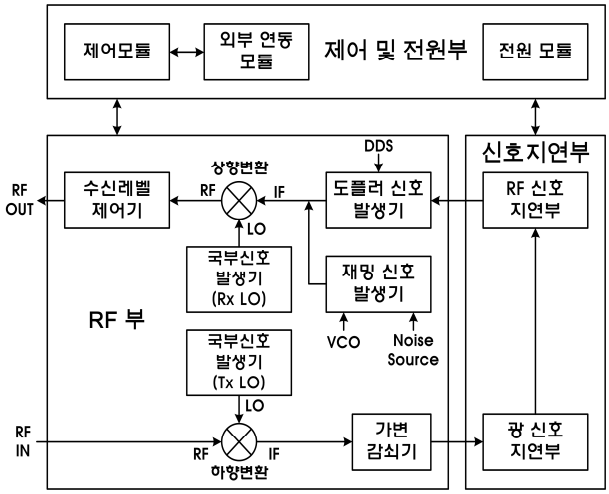

그림 2. 전파고도계 시뮬레이터 구성도
Fig. 2. Block diagram of simulator.

상향 변환하여 전파고도계 수신기로 입력하는 역할을 수행한다. 또한, 실제 비행 환경에서 발생할 수 있는 도플러 천이 및 재밍 신호를 모의하여 전파고도계에 인가한다. 마지막으로 신호지연부는 전파고도계 시뮬레이터의 핵심부로, RF 신호지연부와 광 신호지연부로 구성되어 모의 고도에 따라 수신 신호를 지연시키는 역할을 한다.

2-2 제어 및 전원부 설계

제어 및 전원부는 USB를 통해 외부의 제어기와 인터페이스 되는 외부 연동 모듈과 외부로부터 받은 제어 명령에 따라 전파고도계 시뮬레이터를 제어하는 제어모듈, 그리고 전파고도계 및 시뮬레이터 내부에 필요한 전원을 공급하는 전원모듈로 나누어진다. 제어 및 전원부는 전파고도계 및 시뮬레이터 각 모듈의 전원 공급 역할과 더불어 외부 제어기로부터 전파고도계 및 시뮬레이터 작동에 필요한 제어명령을 수신하여 각각의 구성품들을 제어한다.

외부 제어기로부터 입력받는 제어명령은 모의 고도, 신호 감쇠 값, 도플러 주파수, 재밍 인가명령 등이 있으며, 제어모듈에서는 모의 고도에 따라 신호지연부의 광/RF 스위치를 제어하여 전파의 지연시간을 조절하고, RF부의 가변감쇠 값 및 수신 레벨 제어기의 전력 증폭/감쇠 값을 조절하여 내부 수신 전력이 포화(saturation)되지 않도록 한다. 또한, 도플러 신호 발생을 위한 직접 디지털

합성기(DDS: Direct Digital Synthesizer) 제어와 재밍 모드 선택, 재밍 신호인가 등을 수행하며, 시뮬레이터 작동에 따른 시뮬레이션 결과와 장비상태를 외부의 제어기를 통해 출력한다.

2-3 RF부 설계

RF부에서는 전파고도계로부터 입력되는 Ku 대역의 초고주파 신호를 내부 국부신호 발생기를 통해 낮은 주파수 대역(IF)으로 하향 변환한다. 입력된 신호에 대해 주파수 변환을 수행하는 이유는 신호지연을 위해 사용되는 전광(E/O) / 광전(O/E) 변환기의 작동 주파수 범위가 상대적으로 낮기(up to 4 GHz) 때문이다. 주파수 하향 변환된 신호는 내부 감쇠기(attenuator)를 통해 신호지연부를 구동할 수 있는 신호세기로 제어되고, 이후 신호지연부를 거쳐 신호 지연된 IF 신호를 원래의 신호대역으로 상향 변환한다. 상향 변환된 신호는 다단의 가변 감쇠기 및 전력 증폭기로 구성된 수신 레벨 제어기를 통과하면서 모의 고도에 따라 크기가 제어된 신호로 출력된다. 이때, 고도에 따른 수신 전력 P_r(W)은 식 (3)과 같이 계산된다.

$$P_r = \frac{P_t G \lambda^2 \sigma_0 \sin\psi}{64\pi R^2} \tag{3}$$

여기서 P_t(W)는 전파고도계 송신 전력, G는 안테나 이득, σ_0는 지면 반사계수, ψ(degree)는 전파의 입사각이다. 식 (3)의 수신 전력은 식 (4)의 레이다 방정식으로부터 계산된 식으로, 지면의 레이다 단면적(RCS) $\sigma(m^2)$ 및 안테나 이득 G를 근사화 하여 나타낸 식이다. 안테나 빔폭이 충분히 작다고 가정할 때 beamwidth-limited illumination에 따른 레이다 방정식은 표적의 RCS를 식 (5)와 같이 정의한다[18].

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \tag{4}$$

$$\sigma = \sigma_0 \times S = \sigma_0 \times \frac{\pi}{4} R^2 \theta_{az} \theta_{el} \csc\psi \tag{5}$$

여기서 $S(m^2)$는 footprint 크기, θ_{az}, θ_{el}(degree)는 안테나의 3 dB 빔폭이다. 안테나 이득 G는 식 (6)과 같이 안테나 빔폭에 대한 식으로 나타낼 수 있다.

$$G = \frac{4\pi}{\theta_{az}\theta_{el}} \tag{6}$$

식 (5)와 식 (6)을 식 (4)에 대입하면, 식 (3)과 같이 지면 클러터에 대한 안테나 수신 전력으로 근사화 할 수 있다.

RF부 설계에 있어서 주파수 상/하향 변환을 위한 혼합기(mixer)와 수신 레벨 제어기를 구성하는 가변감쇠기는 주파수 범위가 Ku 대역 전체를 포함하는 광대역 소자로 선정하였다. 또한, 신호지연부 입력단에 위치한 가변감쇠기의 경우 전광/광전 변환기의 주파수 범위를 포함하는 소자로 선정하여 입력 신호에 대한 왜곡 없이 안정적인 성능을 유지하도록 하였다.

전파고도계가 탑재된 비행체가 고속으로 이동할 때 지형과의 상대속도에 따른 도플러 효과에 의한 주파수 천이가 발생한다. 도플러 천이는 f_d=2 V_r/λ로 나타낼 수 있는데, 본 시뮬레이터에서는 실제 비행 상황에서 발생할 수 있는 도플러 신호를 모사하기 위한 도플러 신호 발생기를 추가하였다. 도플러 신호는 DDS를 통해 생성되며, 단측파대(SSB: Single Side-Band) 변조기를 이용하여 주신호에 인가된다. 그림 3은 도플러 주파수가 0 Hz와 30 kHz일 때 측정한 주파수 스펙트럼을 나타낸 것으로 30 kHz의 도플러 신호 합성 시 반송 주파수(carrier frequency) f_c(Hz) 양옆으로 측파대(side-band) 신호 $\pm f_d$가 나타나는 것을 알 수 있다. 반송 주파수 f_c는 수 GHz 대역의 신호로 도플러 신호에 비해 매우 크기 때문에 $f_c + f_d$와 $f_c - f_d$의 출력 주파수 성분의 차이는 매우 작다. 그렇기 때문에 현존하는 필터를 통해 두 주파수 성분 중 원하는 성분만을 통과시키고, 원치 않는 이미지 성분을 제거하는 것은 매우 어려운 일이다. 따라서 본 논문에서는 SSB 변조기를 이용한 도플러 신호 발생기를 설계함으로써 별도의 필터 설계 없이 불요파를 제거하도록 하였다[14]. 그림 3에서 도플러 주파수가 30 kHz일 때 주파수 스펙트럼은 SSB 변조기를 통해 측파대 억압(side-band suppression)된 파형으로 상측파대(upper side-band) 신호에 비해 하측파대(lower side-band) 신호의 세기가 약 35 dB 제한된 것을

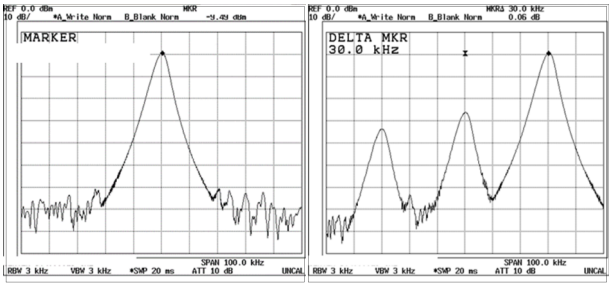

그림 3. 도플러 주파수별 스펙트럼(0 Hz(좌), 30 kHz(우))
Fig. 3. Doppler frequency(0 Hz(left), 30 kHz(right)).

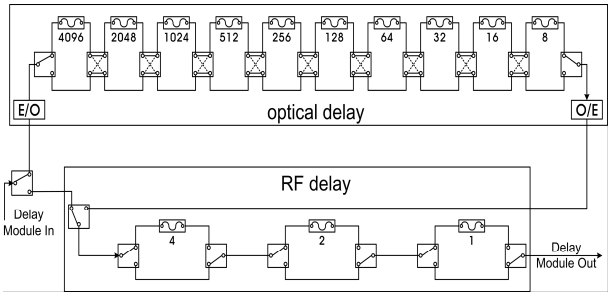

그림 4. 신호지연부 구성도
Fig. 4. Block diagram of signal delay module.

알 수 있다.

한편, 전파고도계와 같이 무선주파수를 사용하는 장비는 고의적 혹은 비 고의적으로 발생되는 주위 RF 신호들에 영향을 받을 수 있다. 이러한 재밍 신호들에 대해 전파고도계의 재밍 회피 동작 등 재밍 강건성을 확인하기 위해 재밍 신호 발생기를 추가하였다. 재밍 신호 발생기에서는 RF 노이즈 소스(noise source) 및 전압제어발진기(VCO: Voltage Controlled Oscillator)를 통해 잡음 재밍(noise jamming) 또는 연속파(CW: Continuous Wave) 재밍 신호를 모의한다. 생성된 재밍 신호는 시뮬레이터 내부의 전력 결합기(power combiner)를 통해 주 신호와 더해져서 전파고도계로 인가된다[13].

2-4 신호지연부 설계

전파고도계 시뮬레이터의 핵심부인 신호지연부는 RF 신호지연부와 광 신호지연부로 나누어진다. 그림 4는 신호지연부의 세부 구성도를 나타낸 것으로, 3종의 동축케이블로 구성된 RF 신호지연부와 10종의 광섬유로 구성된 광 시간지연부로 구성하였다. 입력되는 RF 신호는 내부 스위치 제어에 의해 RF 신호지연부 또는 광 신호지연부를 거치게 되고, 주로 근거리의 모의 시 스위칭시간이 짧아 빠른 거리변화에 유리한 RF 시간지연을 수행하고, 원거리의 모의 시 거리에 따른 전파손실이 적은 광 신호지연을 수행한다.

RF 신호지연부는 동축케이블을 통해 전파를 지연시키는 방법으로 1 m, 2 m, 4 m의 신호지연 단위모듈로 구성되어 0~7 m 사이의 짧은 거리에 대한 신호지연을 구성한다. 동축케이블의 경우, 길이가 길어질수록 신호 손실이 크게 늘어나는 단점이 있기 때문에 8 m 이상의 거리에 대해서는 광지연선을 이용하여 신호지연을 구현하였다. 동축케이블을 연결하는 RF 스위치의 경우 총 6개가 사용되었으며, 150 nsec의 빠른 스위칭을 통해 근거리에 대한 고도 모의를 수행한다. 광 신호지연부는 RF부로부터 입력된 전기적 신호를 전광 변환기를 이용하여 광 신호로 변환하고, 변환된 광 신호를 광 시간지연 단위모듈을 통과시켜 모의 고도만큼 시간 지연시킨다. 광 시간지연 단위모듈을 구성하는 광섬유의 길이는 2^n m($3 \leq n \leq 12$)로 총 10개의 단위모듈로 구성되어 11개의 광 스위치를 통해 최대 약 8,184 m까지 1 m 단위로 거리를 모의할 수 있도록 설계하였다. 사용된 광 스위치는 미세전자기계시스템(MEMS: Micro Electro Mechanical System) 기반 2×2 광 스위치로 구성하였다. 광 신호지연부를 구성하는 광케이블 및 광스위치는 RF 소자에 비해 상대적으로 고가의 부품이다. 따라서 신호지연부의 설계에 있어서 근거리를 동축케이블 및 RF 스위치로 구성함으로써 시뮬레이터의 제작・유지보수 비용을 절감하도록 하였다. 광 신호지연부에서 시간 지연된 신호는 광전 변환기를 이용하여 원래의 RF 신호로 변환된다.

Ⅲ. 시뮬레이터 제작 및 성능평가

3-1 시뮬레이터 제작

전파고도계 시뮬레이터는 19 인치 표준 랙(rack)에 장착 가능하도록 설계하여 3개의 독립모듈로 분리하여 제작하였다. 그림 5는 제작된 시뮬레이터의 전체형상 및 구성을 나타낸 것으로 제작된 모듈의 높이는 총 6U(10.5

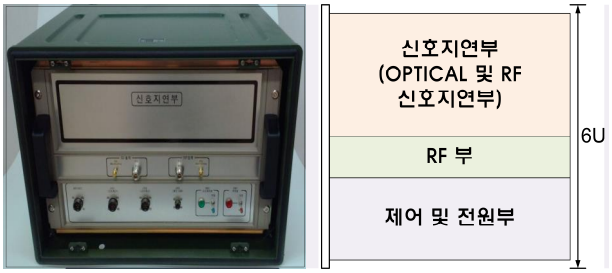

그림 5. 제작된 전파고도계 시뮬레이터 및 구성
Fig. 5. Implementation of the simulator

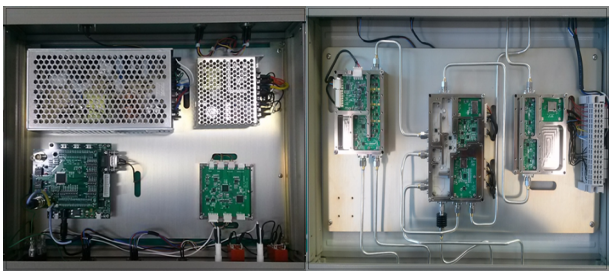

그림 6. 제작된 제어 및 전원부(좌) 및 RF부(우) 형상
Fig. 6. Control/power unit(left) & RF unit(right).

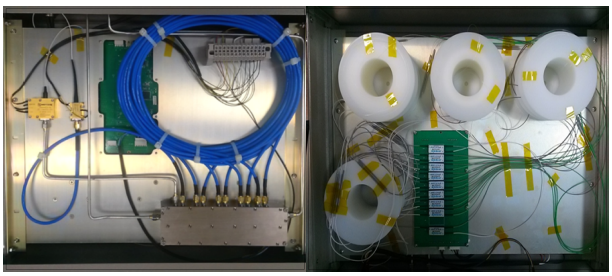

그림 7. 제작된 신호지연부(좌: RF 신호 지연부, 우: 광신호지연부) 형상
Fig. 7. RF signal delay unit(left) & optical signal delay unit (right).

inch)로 구성하였다. 그림 6은 제작된 제어 및 전원부(좌)와 RF 부(우)의 형상을 나타낸 것으로 RF부 및 신호지연부를 운용하는 제어모듈, 전파고도계 및 시뮬레이터에 전원을 공급하는 전원모듈, 주파수 상·하향 변환기, 수신레벨 제어기 그리고 도플러 생성기 등으로 구성하였다.

그림 7은 제작된 신호지연부의 형상을 나타낸 것으로, 그림의 좌측에는 전광/광전 변환기와 동축케이블 그리고 RF 스위치로 구성된 RF 신호지연부를 나타내었고, 그림의 우측에는 시간지연 단위에 따른 광케이블 단위모듈과 광 스위치로 구성된 광 신호지연부를 나타내었다. 광케이블 단위 길이는 필요한 지연시간에 따라 식 (7)을 통해 광속과 케이블의 굴절률로 계산할 수 있다[15],[16].

$$T_d = \frac{l}{v}, \quad where\ v = \frac{c}{n} \tag{7}$$

여기서 T_d(sec)는 지연시간, l(m)은 광케이블 길이, v는 매질 속도(m/s), n은 매질의 굴절률이다. 사용한 광케이블의 굴절률은 1.5이다. 전파고도계 시뮬레이터는 내부 소자들이 가지는 지연 및 회로 기판간 경로 등에 의한 오프셋(offset)을 가진다. 이를 보상하기 위해 시뮬레이터 자체 지연 값을 회로망 분석기(network analyzer)로 측정하였으며, 측정결과, 약 5 m의 오프셋이 발생함을 확인하였다. 따라서 전파고도계 시뮬레이터가 모의할 수 있는 최저 고도는 5 m가 되고, 연결 케이블의 길이변화 등에 따른 오프셋 값에 따라 모의할 수 있는 최저 고도가 변화한다.

한편, 시뮬레이터의 제작에 있어 광/RF 스위치의 스위칭 시간 오차, 케이블 길이/제작 오차 등에 의한 지연시간 오차가 발생할 수 있다. 이러한 시뮬레이터 제작 오차를 줄이기 위하여 광/RF 스위치 조합에 따른 모든 전파 경로의 지연시간을 사전에 측정하여 내부 메모리에 저장하고, 입력된 모의고도와 가장 근사한 경로를 선택하도록 보정하였다.

3-2 시뮬레이터 성능평가

제작한 전파고도계 시뮬레이터가 제어명령에 따라 실제 고도에 해당하는 전파의 지연기능을 수행하는지 확인하기 위하여 상용 회로망 분석기를 이용하여 시간지연을 측정하였다. 측정의 정확도를 높이기 위하여 고도별 지연시간을 동일방법으로 5회씩 반복 측정하고, 평균값을 구하여 오차율을 계산하였다. 그림 8은 20 m, 100 m의 모의고도에 대해 측정한 주파수 스펙트럼을 나타낸 것으로 고도에 따른 지연시간을 시간영역에서 나타낸 결과이다. 전파고도계 시뮬레이터의 실제 지연은 100 m 기준으로 100.08 m(667.65 ns)로 측정되어 약 0.08 %의 고도 측정 오차를 가지는 것을 확인하였다. 이 외의 다양한 고도에 대한 측정 결과, 모의고도의 최대 0.13 % 이하의 정밀한

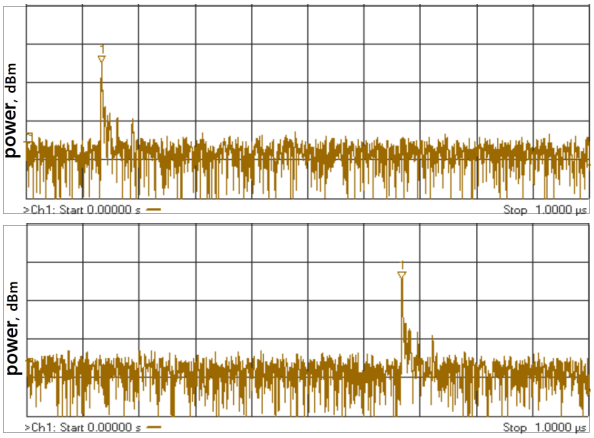

그림 8. 모의고도에 따른 주파수 스펙트럼(20 m, 100 m)
Fig. 8. Frequency spectrum according to altitude simulation (20 m, 100 m).

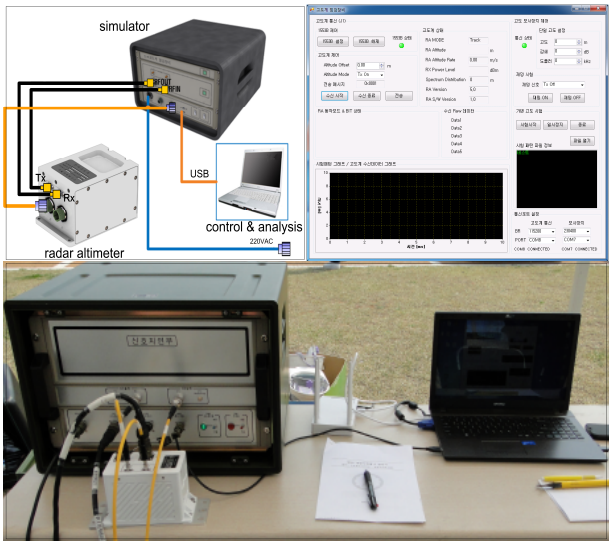

그림 9. 전파고도계 및 시뮬레이터 연동시험 구성
Fig. 9. Radar altimeter and simulator test set up.

표 1. 전파고도계 연동시험 결과
Table 1. The results of the test.

순번	설정고도(m)	시뮬레이터 모의고도(m)	전파고도계 측정고도(m)
1	20	20.40	20.85
2	50	49.50	49.95
3	100	99.60	99.70
4	200	198.40	198.40

고도 오차를 가지는 것을 확인하였고, 고도 모의 시 수신 신호의 크기가 안정적인 마진을 가지고 동작하는 것을 확인하였다.

최종적으로 전파고도계와 제작한 시뮬레이터를 연계한 연동시험을 수행하였다. 그림 9는 전파고도계 연동시험의 구성도, 장비 운용을 위한 소프트웨어화면 그리고 실제 시험 장면을 나타낸 것이다. 전파고도계 시뮬레이터는 제어 및 운용케이블과 전파의 송수신을 위한 동축 케이블을 통해 전파고도계와 연결되며, 또한, 외부의 제어기가 USB를 통해 연결되어 제어 명령에 따른 시뮬레이션을 수행한다. 제어용 소프트웨어는 모의하고자 하는 고도 및 도플러 주파수 설정, 연결 케이블 길이에 따른 고도 오프셋 설정 그리고 측정고도의 출력 등을 수행하며, 전파고도계의 상태 및 동작 모드를 LED로 가시성 있게 출력한다. 표 1은 설정 고도에 따른 실제 시뮬레이터의 모의고도 및 전파고도계의 측정 고도를 나타낸 결과이다. 이때 설정한 도플러 주파수는 30 kHz이다.

측정한 전파고도계의 고도는 시뮬레이터에서 발생하는 오차 이외에 전파고도계 자체의 고도 오차가 더해진 수치로, 전파고도계의 절대오차는 전파고도계 측정고도에서 시뮬레이터 모의고도를 뺀 값으로 나타낼 수 있다.

표 1에서 이와 같은 방법으로 측정된 전파고도계의 절대오차는 최대 0.45 m 이내로 개발된 시뮬레이터가 전파지연을 잘 모의하고 있음을 알 수 있다.

한편, 제작한 시뮬레이터의 재밍 인가 기능을 확인하기 위한 시험이 참고문헌 [13]에서 수행되었다. 외부 신호발생기를 통해 생성된 CW 재밍 신호는 시뮬레이터 내부의 전력 결합기를 통해 더해져서 전파고도계로 인가된다. 인가된 재밍 신호는 스펙트럼 분석기(spectrum analyser) 및 제어기를 통해 확인하였으며 시뮬레이터의 재밍 모의기능 및 전파고도계의 재밍 회피기능이 정상 동작함을 확인하였다.

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 FMCW 전파고도계 성능평가를 위한 시뮬레이터를 광지연선을 이용하여 개발하였다. 종래에 전파지연을 위해 사용되었던 동축케이블이나 BAW 지연

소자에 비해 광섬유가 가지는 저 손실특성 및 다양한 광섬유 지연 네트워크를 구현할 수 있는 장점 등으로 인하여 초고주파를 이용하는 전파고도계에 대한 정밀하고 신뢰성 있는 성능평가를 가능하게 하였다. 또한, 비행체의 이동에 따른 도플러 천이 및 주위 환경의 재밍을 모의하도록 구현하여 실제 전파고도계 운용 조건에서 발생할 수 있는 환경적 영향을 모사하였다.

개발한 전파고도계 시뮬레이터의 성능 측정을 위해 상용 회로망 분석기를 이용하여 모의 고도별 지연시간을 측정한 결과, 모의고도의 최대 0.13 % 이하 오차를 보이며 매우 정밀한 고도 모의를 수행하는 것을 확인하였다. 최종적으로 전파고도계와 제작한 시뮬레이터간 연동시험을 통해 30 kHz의 도플러 모의 및 CW 재밍 모의가 정상적으로 수행되는 것을 확인하였고, 결과적으로 전파고도계 측정고도와 시뮬레이터 모의 고도간 고도 편차가 오차범위 이내로 나타남을 확인하였다.

본 논문에서 개발한 시뮬레이터를 통해 시험 대상인 전파고도계의 점검에 효과적으로 활용될 것으로 판단된다. 또한, 향후 유사한 센서의 성능평가 시 본 논문에서 제시한 개념을 적용하면 많은 도움이 될 것으로 판단된다.

References

[1] Kayton, *Avionics Navigation Systems*, John Wiley & Sons Inc, pp. 491-498, 1997.

[2] 최재현, 장종훈, 노진입, "광 지연선 기반의 넓은 고도 범위를 갖는 고정밀 FMCW 전파고도계 송수신기 설계", 한국전자파학회논문지, 25(11), pp. 1190-1196, 2014년 11월.

[3] A. G. Stove, "Linear FMCW radar techniques", *Proc. IEE Radar and Signal Processing*. vol. 139, no. 5, pp. 343-350, Oct. 1992.

[4] D. Jahagirdar, "A high dynamic range miniature DDS-based FMCW radar", *Radar Conf.(RADAR) IEEE*, pp. 870-873, 2012.

[5] F. Orlandi, "Method for the calibration of an FM/CW type radio altimeter, and radio altimeter designed for the implementation of this method", US Patent 6,476,759, Nov. 2002.

[6] H. E. Bingol, B. Akin, and O. KOC, "Radar altimeter as a navigation aid using hierarchical elevation map clustering", in *Proc. IEEE Position Location and Navigation Symp*., pp. 377-381, 2012.

[7] 윤정숙, 곽희준, 김윤형, 신영종, 유기정, 유명종, "비행 시험을 통한 레이더 전파고도계 특성 분석", *Korea Journal of Remote Sensing*, 29(1), pp. 81-94, 2013년 1월.

[8] 최재현, 장종훈, 이재환, 노진입, "FMCW 전파고도계의 신호처리 알고리즘 구현", 한국전자파학회논문지, 26(6), pp. 555-563, 2015년 6월.

[9] J. L. Campbell, M. U. de. Haag, "Assessment of radar altimeter performance when used for integrity monitoring in a synthetic vision system", in *Proc. 20th Digital Avionics Systems*, vol. 1, Oct. 2001.

[10] 김태훈, 정진섭, "Ku 대역 전파고도계 체계점검장비 개발", 한국군사과학기술학회지, 18(6), pp. 808-815, 2015년 12월.

[11] E. Granot, R. Weber, and S. Tzadok, "Fibers vs coax for RF delay line applications", *IEEE Int. Conf. Microwave Communications Antennas and Electronics Systems*, 2009.

[12] H. D. Griffiths, "New ideas in FM radar", *Electron. Commun. Eng. J.*, vol. 2, no. 5, pp. 185-194, Oct. 1990.

[13] 이재환, 장종훈, 노진입, 유경주, 최재현, "FMCW 전파고도계의 재밍 탐지 및 회피 알고리즘", 한국전자파학회논문지, 27(2), pp. 147-155, 2016년 2월.

[14] J. Harvey, R. Harjani, "Analysis and design of an integrated quadrature mixer with improved noise, gain, and image rejection", *IEEE Int. Symp. Circuits and Symp.*, vol. 4, pp.786-789, May, 2001.

[15] R. Soref, "Optical dispersion technique for time-dealy beam steering", *Appl. Opt.*, vol. 31, pp. 7395-7397, Dec. 1992.

[16] J. Lembo, T. Holcomb, M. Wickham, P. Wisseman, and J. C. Brock, "Low-loss fiber optic time-delay element

for phased-array antennas", *Proc. SPIE INT. SOC. Opt. Eng.*, vol. 2155, pp. 13-23, 1994.

[17] L. Reynolds, Y. Ayasli, "Single chip FMCW radar for target velocity and range sensing applications", *IEEE GaAs IC Symposium Digest*, pp. 243-246, 1989.

[18] D. K. Barton, *Radar Equations for Modern Radar*, Artech House, 2013.

[19] Merrill I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, Mc Grow-Hill, 2001.

이 재 환

2011년 2월: 금오공과대학교 전자공학과 (공학사)
2013년 2월: 금오공과대학교 전자공학과 (공학석사)
2013년 9월~현재: 국방과학연구소
[주 관심분야] FMCW 레이다 설계, 신호처리 알고리즘 등