

광학추적장비의 거리측정 도플러 레이더에 관한 연구

박두진* · 노영환*

*한국항공우주연구원 나로우주센터

A Study On The Doppler Radar Of Range Measurement On Electro-Optical Tracking System

Doo-Jin Park* · Young-Hwan Noh*

*Korea Aerospace Research Institute Naro Space Center

E-mail : djpark@kari.re.kr

요 약

나로우주센터에서는 우주발사체의 비행임무 초기구간 동안에 발사체의 거리 및 속도정보를 획득하기 위해서 광학추적장비에 거리측정 도플러 레이더를 탑재하여 운용하고 있다. 본 논문은 광학추적장비의 MFCW(Multi Frequency Continuous Wave)방식과 FMCW(Frequency Modulation Continuous Wave)방식 도플러 레이더 구성과 거리측정 방법을 기술하였다.

ABSTRACT

The Doppler Radar that mounted on Electro Optical Tracking System has been operated to measure range and velocity during the initial mission of space launch vehicle at Naro space center. In this paper, we mentioned configuration of MFCW(Multi frequency Continuous Wave) and FMCW(Frequency Modulation Continuous Wave) Doppler Radar on Electro Optical Tracking System and described method of range measurement.

키워드

MFCW Doppler Radar, FMCW Doppler Radar, Electro Optical Tracking System, Range measurement

1. 서 론

도플러 레이더는 송신기와 송신안테나를 통해 전자파를 방출하고 이동물체에서 반사된 반사파 신호를 수신안테나와 수신기를 통해 검출하며, 레이더와 이동물체 사이 주파수변화에 따른 위상차를 이용하여 이동물체의 거리, 속도 및 위치정보를 획득하는 장비이다. 이를 항공우주, 무기개발, 스포츠 및 교통통제 등 다양한 분야에서 활용하고 있다. 나로우주센터에서는 광학추적장비에 MFCW(Multi Frequency Continuous Wave)방식 도플러 레이더를 탑재하여 우주발사체의 비행 초기구간 동안에 사거리(Slant range), 시선속도(Radial velocity) 및 위치정보를 획득하였으나, 제로 도플러상대인 경우에 거리 및 속도정보를 획득할 수 없었다. 그러나 FMCW(Frequency Modulation Continuous Wave)방식 도플러 레이더를 광학추적장비에 탑재하여 이를 해결할 수 있으며, 향후 한국형우주발사체(KSLV-II) 발사 임무 시 사용

계획이다. 본 논문은 광학추적장비의 MFCW방식 및 FMCW방식 도플러 레이더 구성과 거리측정방법 등을 기술하였다.

II. 광학추적장비의 MFCW 방식 도플러 레이더 구성 및 거리측정

광학추적장비에 탑재된 MFCW방식 도플러 레이더는 X 밴드 주파수대역으로 송신안테나로부터 두 개의 지속파에 대한 도플러효과와 신호처리장치에서 FFT방법을 적용하여 이동목표물에 대한 사거리 및 속도정보를 획득할 수 있다. 송수신안테나는 마이크로 스트립패치 형태로써 추적마운트의 고각축에 설치되어있다. 송신기는 PLO(Phase Locked Oscillator), 전력구동장치 및 전력증폭기로 구성되어 있으며, 수신기는 마이크로파 필터, 저잡음증폭기 및 IQ 혼합기(Mixer)로 구성 되어있다. 레이더의 신호처리장치는 수신기

를 통해 전송된 반사파 도플러신호를 이용하여 디지털 신호처리장치(Digital Signal Processor)에서 사거리 및 시선속도를 실시간 계산한다. 광 링크를 이용하여 레이더의 원격제어장치 또는 광학추적장비의 원격제어장치에서 레이더를 원격제어하고 신호처리장치로부터 측정된 데이터를 실시간 수신한다. 또한 수신된 데이터를 원격제어장치의 메모리장치에 저장하고 모니터에 측정정보를 표시한다. 아래그림은 광학추적장비의 MFCW 도플러 레이더 구성도이다.

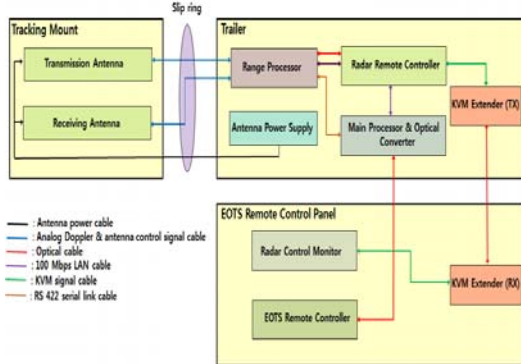


그림 1. 광학추적장비의 MFCW방식 도플러 레이더 구성도

사거리 측정은 송신기내부에 있는 두 개의 발진기를 이용하며 한 개의 발진기는 일정한 중심 주파수를 갖는 지속파 송신주파수 신호를 방출하고 다른 하나의 발진기는 시간에 따라 단계적으로 변화는 송신 주파수신호를 방출한다. 수신기에서 목표물의 반사파신호를 감지하고 상대적인 주파수변화에 따른 위상차를 신호처리장치에서 FFT 방법을 적용하여 사거리를 실시간 측정한다. 이를 수식으로 표현하면 아래와 같다.[1]

$$S_1(t) = A_1 \sin(2\pi f_1 t) \quad (2.1)$$

$$S_2(t) = A_2 \sin(2\pi f_2 t) \quad (2.2)$$

$$S_{1r}(t) = A_{r1} \sin(2\pi f_1 t - \varphi_1) \quad (2.3)$$

$$S_{2r}(t) = A_{r2} \sin(2\pi f_2 t - \varphi_2) \quad (2.4)$$

$$\Delta\varphi = \frac{4\pi R}{c}(f_1 - f_2) = \frac{4\pi R}{c}(\Delta f) \quad (2.5)$$

$$\Delta\varphi = 2\pi \text{ 일 때, } R = \frac{c}{2\Delta f} \quad (2.6)$$

$$\sigma R = \frac{c}{4\pi\Delta f \sqrt{SNR(dB)}} \quad (2.7)$$

여기서 S_1 및 S_2 는 송신신호이며, 두 개의 수신 주파수신호에 대한 위상차는 $\Delta\varphi$ 이다. 또한 신호 대 잡음비가 일정할 때 일정한 중심주파수를 기준으로 송신주파수 차이가 크면 사거리 정확도(σR)는 증가한다. 아래그림은 이동목표물에 대한 MFCW 도플러 레이더의 시간에 대한 주파수변화를 도식적으로 표현하였다.[2]

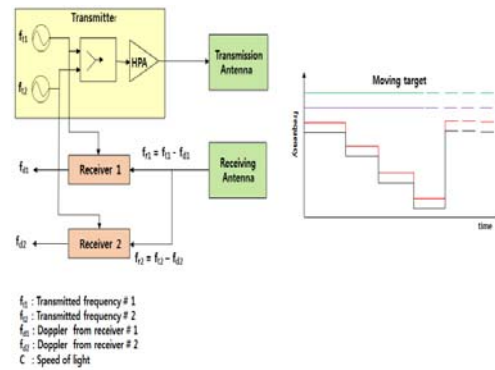


그림 2. MFCW 방식 도플러 레이더의 시간에 대한 주파수 변화

III. 광학추적장비의 FMCW 방식 도플러 레이더 구성 및 거리측정

MFCW방식 도플러 레이더는 목표물이 정지상태 또는 목표물과 레이더를 연결한 선과 목표물이 이동하는 방향과 이루는 각이 수직인 제로 도플러(Zero doppler)상태 일 때 사거리 및 속도를 측정할 수 없는 단점이 있다. 이를 해결하기 위해서 FMCW방식 도플러 레이더를 사용하여 위상잡음이 향상되고 삼각파 또는 톱니파형태의 주파수로 변조된 발진기의 송신주파수 신호를 이용한다. 또한 FMCW 및 FMCW방식을 혼용하여 송신주파수 신호를 방출 할 수 있다. 반사파신호는 수신기에서 검출되고 레이더 신호처리장치에서 FFT기법을 적용하여 정지상태 또는 제로 도플러 상태에서 목표물에 대한 사거리 및 속도를 실시간 측정한다. 동시에 저장장치로 측정된 데이터가 전송되며, 광 링크를 통해 광학추적장비의 원격제어장치 또는 레이더의 원격제어장치를 이용하여 제어한다. 아래그림은 광학추적장비의 FMCW 도플러 레이더 구성도이다.

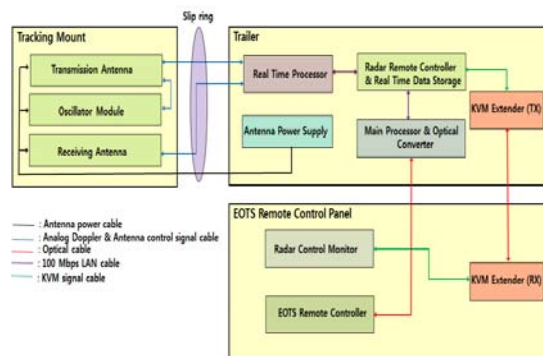


그림 3. 광학추적장비의 FMCW방식 도플러 레이더 구성도

목표물이 정지상태 일 때 FMCW방식 도플러 레이더의 사거리 측정은 아래와 같이 수식으로 표현할 수 있다.[3]

$$f_0 = \frac{\Delta f}{t_0} = 2f_m \Delta f (\because f_m = \frac{1}{2t_0}) \quad (3.1)$$

$$f_b = f_0 T = \frac{4Rf_m \Delta f}{c} (\because T = \frac{2R}{c}) \quad (3.2)$$

$$R(\text{slant range}) = \frac{cf_b}{4f_m \Delta f} \quad (3.3)$$

여기서 f_b 는 정지상태일 때 비트주파수이며, f_0 는 주파수변조율(Modulation rate)이다. 목표물이 이동할 경우에 레이더의 사거리 측정은 아래 수식으로 표현 할 수 있다.[4]

$$f_{bu} = f_b - f_d = \frac{2R}{c} f_0 - \frac{2v_r}{\lambda} (\because v_r = v \cos\theta) \quad (3.4)$$

$$f_{bd} = f_b + f_d = \frac{2R}{c} f_0 + \frac{2v_r}{\lambda} \quad (3.5)$$

$$R(\text{slant range}) = \frac{c}{4f_0} (f_{bu} + f_{bd}) \quad (3.6)$$

도플러 천이(Doppler shift)가 발생하고 송신주파수가 증가(f_{bu}) 및 감소(f_{bd})함에 따라서 비트주파수에 도플러 주파수(Doppler frequency, f_d)를 적용하여 사거리를 측정한다. 아래그림은 정지 및 이동목표물에 대한 FMCW방식 도플러 레이더의 주파수 변화를 도식적으로 표현하였다.[2]

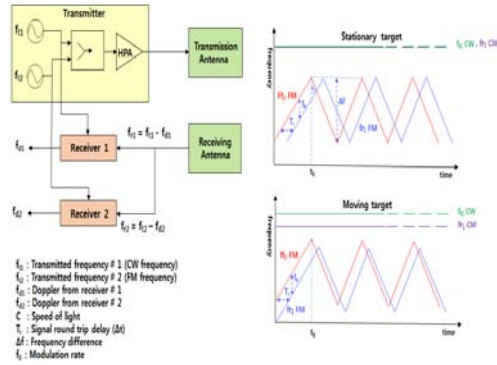


그림 4. FMCW방식 도플러 레이더의 시간에 대한 주파수 변화

광학추적장비의 FMCW 도플러 레이더의 기본 사양은 아래표와 같다.

표 1. 광학추적장비의 FMCW 레이더 사양

항목	사양
출력	60 watt
안테나 이득	34 dBi
발진기 형태	PLO
사거리 측정모드	MFCW 및 FMCW 혼용
송신 주파수	10.527 GHz ~ 10.540 GHz
RF 대역폭	10 MHz
위상 잡음	-124 dBc/Hz@10kHz offset
거리 정확도	0.5 m at 20km
추정 사거리	55 km at 1m ² RCS target

아래그림은 항공기가 비행하는 동안 MFCW방식 도플러 레이더와 FMCW방식 도플러 레이더의 스펙트럼이며, 항공기의 비행방향과 레이더 사이 시선방향이 서로 수직으로 변화하는 순간에 시선속도(Radial velocity)가 영으로 될 때에도 FMCW방식은 사거리를 측정할 수 있다.[5]

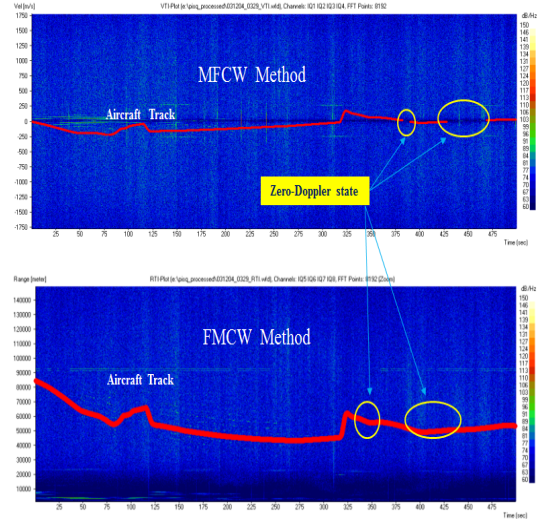


그림 5. MFCW방식 및 FMCW방식 도플러 레이더의 스펙트럼(제로 도플러 상태)

IV. 결론 및 향후계획

위에서 비행물체 및 우주발사체의 사거리, 시선속도 및 위치정보를 측정하기 위해서 사용되는 광학추적장비의 MFCW방식 도플러 레이더와 FMCW방식 도플러 레이더의 구성과 사거리 측정 방법을 기술하였다. 향후 나로우주센터에서는 한국형 우주발사체(KSLV-II)의 비행임무 시, 제로 도플러 상태에서 사거리 및 시선속도 측정이 가능한 FMCW방식 도플러 레이더를 운용할 계획이다.

참고문헌

- [1] Dr. John M. Weiss, "Continuous Wave Stepped Frequency Radar for Target Ranging and Motion Detection", MICS, pp 1~2, 2009
- [2] "WEIBEL Presentation", WEIBEL Scientific, pp 17~18, 2005
- [3] Sinan Kurt, "Ranging Resolution Improvement of FMCW Radars", Middle East Technical University, pp 8~9, 2007
- [4] 이택경, "CW and Pulse Radar", National Radar workshop, pp 12 ~14, 2004
- [5] "Tracking Radar", WEIBEL Scientific, pp 14, 2012