

헬기 탑재 레이다 고도계 신호 수집 및 오차 분석

Altitude Error Analysis of Helicopter-Borne FMCW Radar Altimeter

정 정 수 · 이 호 준* · 곽 영 길

Jung-Soo Jung · Ho-Jun Lee* · Young-Kil Kwag

요 약

FMCW 방식의 헬기 탑재 레이다 고도계는 직하 방향의 지표면 반사신호의 크기에 대한 송수신 차의 주파수를 측정하여 고도정보를 추출한다. 그러나 넓은 안테나 빔 폭으로 인하여 빔 폭 내에 RCS가 큰 물체에 의한 반사신호가 수신되면 직하 지점으로 오인하여 고도 오차를 발생시킬 수 있다. 본 논문에서는 고도 측정의 오차를 야기시킬 수 있는 요인을 분석하기 위하여 삼면반사기를 이용한 기준 신호와 직하 방향 주변에 RCS가 큰 지형지물을 이용한 반사신호를 수집하여 주파수 영역에서 비교 분석하였다. 실험 분석결과는 향후 레이다 고도 정확도를 향상을 위하여 활용될 수 있도록 제시되었다.

Abstract

Helicopter-borne FMCW radar altimeter obtains the altitude information using the beat frequency between the transmitted and reflected signal from the nadir direction. However, the altitude error may exist when the strong echoes are received from the large RCS at the off-nadir direction because of the wide beamwidth of the altimeter antenna. In this paper, in order to investigate the effect of the altitude error due to the large RCS around the off-nadir direction, the reflected signals were measured by using the corner reflectors displaced on the several reference ground positions, and the acquired signals were analyzed and compared in the spectral domain. The analysis results can be used for the improvement of the altitude accuracy in the radar altimeter.

Key words : Radar Altimeter, FMCW, Beat Frequency, Radar Cross Section

I. 서 론

밀리미터파 레이다 고도계는 마이크로파 레이다에 비해 정밀한 고도 정보와 도플러 측정이 가능하고, 경량, 소형, 저가로 구현 가능할 뿐만 아니라 다양한 임무를 수행할 수 있어 항행 보조 시스템 및 장애물 탐지 등 다양한 분야로 활용되고 있다^[1]. FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave) 방식의 레이다 고도계는 송신 신호와 지면에서 반사된 신호와의 선형적인 주파수 변화인 차 주파수(beat frequency)

성분을 이용하여 고도 정보를 측정하는 시스템이다^[2]. FMCW 방식은 펄스 방식에 비하여 저가의 간단한 회로로 구현 가능하고 좁은 대역폭에서 높은 해상도를 보유할 수 있지만 시스템 잡음에 취약하다. 시스템 잡음에 의해 발생할 수 있는 RMS(Root Mean Square) 오차는 헬기의 저고도 운용과 착륙 시에 탑승자와 비행체의 안정성 확보에 치명적인 위험 요소로 적용될 수 있다. 저고도에서 FMCW 방식의 정확도를 향상시키기 위하여 차 주파수를 고정시키고 변조 주기로부터 고도를 측정하는 방법이 적용된

한국항공대학교 항공전자공학과(Department of Avionics, Korea Aerospace University)

*LIG 넥스원(LIG NEX1)

· 논문 번호 : 20111116-142

· 교신저자 : 곽영길(e-mail : ykwag@hau.ac.kr)

· 심사일자 : 2012년 1월 2일 · 수정완료일자 : 2012년 1월 26일

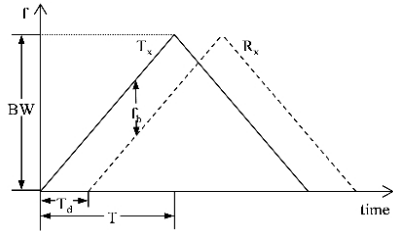


그림 1. 송수신 FMCW 신호
Fig. 1. Transmitted and received FMCW signal.

다^[3]. 차 주파수를 일정하게 고정시키면 FM 기울기가 증가하여 잡음에 의한 영향을 감소시킬 수 있다. 고도계의 직하 방향 신호는 지연 시간이 가장 짧고, RCS(Radar Cross Section)가 가장 큰 특성을 가진다. 지연 시간을 이용하여 고도를 측정하는 경우, 빔 폭 내 지형 고도 변화에 매우 민감하게 반응한다. RCS 측정에 의한 고도 측정 방법은 지면의 구성 물질과 레이더 응시각에 따라 변화하여 지연 시간을 이용하는 경우보다 지표면 변화에 민감하지 않다. 하지만, 지표면의 거칠기와 장애물에 의해 스펙트럼 특성이 달라지며, 저고도에서의 저속 비행이나 정비 비행은 풀, 나뭇잎, 나뭇가지 등의 움직임을 만들어서 다양한 반사 신호를 불규칙하게 발생시킨다. 레이더 고도계가 안정된 고도 값을 측정하기 위해 이러한 불규칙한 신호에 둔감한 복합 필터가 설계되고, 모의시험이 수행되었다^[4].

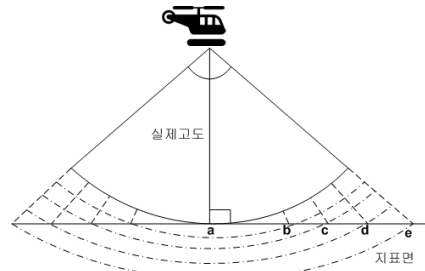
본 논문에서는 복합 필터가 적용된 FMCW 방식의 레이더 고도계의 안정적인 운용을 위해 고도 오차를 발생시킬 수 있는 환경을 조성하여 직하 지점 외의 지형지물 반사 신호의 크기가 레이더 고도계에 미치는 영향을 분석하였다.

II. FMCW 레이더 고도계 고도 측정 원리와 오차

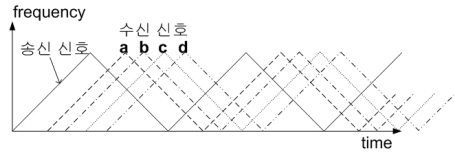
그림 1은 FMCW 방식의 송수신 신호 특성을 시간-주파수 축에서 보여준다. 일반적으로 송신주기 T가 일정하므로 수신 신호의 지연 시간에 따라 차 주파수가 변화하기 때문에 다음의 식을 이용하여 고도 측정이 가능하다.

$$R = \frac{c \times T \times f_b}{2 \times BW} \quad (1)$$

여기서 c 는 빛의 속도, T 는 변조 주기, BW 는 주파수



(a) 운용 환경
(a) Operation environment



(b) 수신 신호
(b) Received signal

그림 2. 레이더 고도계 운용 환경과 수신 신호
Fig. 2. Operation environment and received signal of radar altimeter.

표 1. FMCW 레이더 고도계 파라미터

Table 1. FMCW radar altimeter parameter.

Parameter	Value
운용 대역	4.2~4.4 GHz
대역폭	200 MHz
차 주파수	25 kHz
송신 주기	ns~30 ms
차 주파수 에러 범위	+/- 250 Hz

대역폭, f_b 는 차 주파수를 각각 나타낸다. 일반적인 FMCW 레이더는 주기 T를 고정시키고 차 주파수로부터 거리를 측정한다. 하지만, 개발된 레이더는 저고도에서의 정확도를 향상시키기 위해 차 주파수를 25 kHz 고정시키고 주기로부터 거리를 측정한다. 그림 2(a)는 레이더 고도계의 운용 환경을 나타내고, 그림 2(b)는 이에 따른 수신 신호를 나타낸다. 직하 지점인 a 지점에서의 수신 신호는 가장 짧은 지연 시간과 가장 큰 RCS를 가지며, b, c 그리고 d 지점은 고도계와 각 지점과의 경사 거리에 따라 서로 다른 지연 시간과 RCS를 가진다. 수신 신호중 RCS가 가장 큰 신호를 고도 신호로 측정하기 때문에 빔 폭 내에 직하 지점에서 들어오는 신호보다 큰 RCS를 가지는 장애물이 존재할 경우 고도 오차가 발생한다.

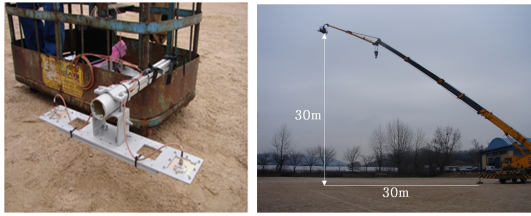
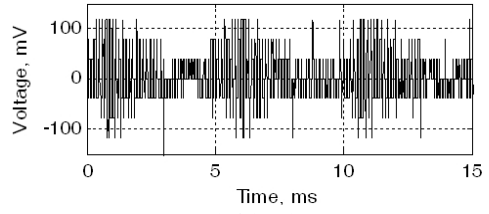


그림 3. 레이더 고도계 설치 형상과 시험 환경
Fig. 3. Radar altimeter field test and environment.

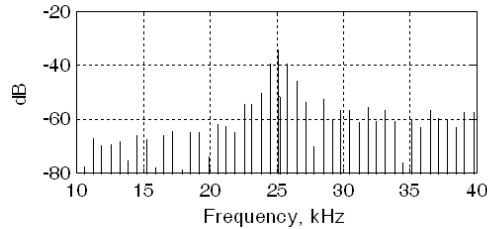
III. 시험 환경

표 1은 시험에 사용된 전파고도계 장비의 주요 사양을 나타낸다. 헬기 탑재 레이더의 특성상 헬기를 이용한 실험은 정확한 고도와 지형지물 정보를 얻기 어려우므로 크레인을 이용하여 30 m 고도에서 시험을 수행하였다. 고도계의 3 dB 빔 폭 50도를 고려하면 직하 방향 기준으로 14 m 지점이 주 빔 폭 범위이다. 따라서 부엽 빔에 의한 크레인 영향을 최소화하기 위하여 직하 지점으로부터 30 m 지점에 크레인을 설치하였다. 그림 3은 레이더 고도계 설치 형상과 신호 수집 환경을 나타낸다. 주변 RCS 변화에 따른 정량적인 분석을 위하여 삼면반사기를 이용하여 시험을 수행하였다. 그림 4의 (a)와 (b)는 시간축과 주파수 축에서의 평탄한 지형에서의 삼면반사기를 사용하지 않고 수집된 기준 환경 수집 신호를 나타낸다. 그림 (a)에서 신호가 수신되지 않는 부분은 차 주파수를 25 kHz로 조정하고, 다음 펄스의 주기를 갱신하는 시간이다. 그림 (b)에서 가장 강한 직하 방향 수신 신호의 세기와 차 주파수는 각각 -29.1 dB와 25.2 kHz이며, 주기는 1.6 ms이므로, 고도는 30.7 m가 측정되었다.

기준 환경에 대한 신호를 수집 후, 삼면반사기를 직하 방향에 설치하여 삼면반사기에 의한 RCS 변화에 대한 데이터를 수집하였다. 직하 지점 이외의 거리에 RCS가 높은 장애물이 존재하는 경우를 가정하여 10 m, 15 m, 20 m, 25 m에 삼면반사기를 설치하고, 고도계와 삼면반사기의 LOS(Line of Sight)를 조정하여 데이터를 수집하였다. 또한, 삼면반사기보다 큰 RCS를 적용하기 위하여 운동장 주변에 있는 중앙단상의 신호와 중앙단상으로부터 2m 이격 거리를 둔 신호를 수집하였다.



(a) 시간축 신호
(a) Time domain



(b) 주파수 축 신호
(b) Frequency domain

그림 4. 기준 환경에서 레이더 고도계 수집 신호
Fig. 4. Acquired signal in reference environment.

IV. 시험 분석

삼면반사기를 이동하면서 수집된 각 거리별 주파수에 따른 신호 세기는 표 2에 제시하였다. 시험 동안 고도 변화는 발생하지 않았으며, 직하 방향에 삼면반사기를 설치하였을 경우, 삼면반사기의 영향으로 인하여 전체적으로 신호 크기가 증가하고, 특히, 30.7 m 거리인 25.2 kHz에서의 크기는 약 5.1 dB 정도 증가하였다. 삼면반사기를 10 m 거리에 설치하였을 때 26.6 kHz 지점(10 m)에서 신호가 기준 신호보다 5.6 dB 크게 나타났다. 이는 반사도가 높은 삼면반사기로 인하여 전체적으로 수신 신호가 증가하고, 10 m 지점에서 높은 신호가 수신되었음을 의미한다.

표 2. 삼면반사기(CR)를 이용한 시험 결과(단위: dB)
Table 2. Result of experiment using corner reflector (Unit: dB).

주파수(kHz)	25.2	26.6	27.9	29.9	31.9
기준 신호	-33.9	-39.6	-52.6	-56.4	-55.6
CR 0 m	-28.8	-37.4	-44.1	-48.7	-53.6
CR 10 m	-32.6	-34	-47.1	-54.1	-56.4
CR 15 m	-32	-37.8	-38	-50.9	-60.3
CR 20 m	-32.9	-39.3	-45.6	-44.4	-57.7
CR 25 m	-33.9	-42	-45.8	-48.4	-47.5

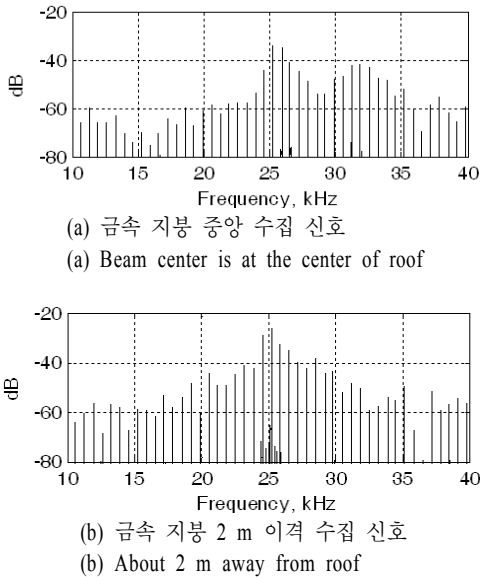


그림 5. 주파수 도메인에서의 지형지물 수집 신호
Fig. 5. Signal about terrain feature in frequency domain.

다른 거리에 삼면반사기를 설치하였을 때, 전체적인 신호 크기는 기준 환경 신호보다 증가하였으며, 삼면반사기 설치 거리에서의 수신 신호는 약 5 ~ 10 dB 정도 증가하였다.

그림 5 (a)와 (b)는 운동장에 있는 금속 지붕 중앙 위치 수집 신호와 지붕과 2 m 이격 거리를 두고 수집한 주파수 신호를 각각 나타낸다. 중앙 단상 지붕의 재질이 금속이므로 그림 4보다 수신 신호가 전체적으로 10 dB 정도 크게 증가하였다. 그림 (a)에서 중앙 지붕은 경사를 가지고 있으므로 고도계와 지붕 경사각의 LOS 지점인 20.8 m 신호가 고도로 측정되었으며, 금속 재질의 강한 반사 신호 특성 때문에, 25.9 kHz 지점의 신호가 매우 큰 것으로 분석된다. 그림 (b)의 경우, 측정 고도는 20~30 m로 급격한 변화를 보였다. 지붕 20 m를 고도로 측정하였을 경우, 운동장 30 m의 신호가 강하게 수신되고, 고도를 30 m로 지시하였을 경우 20 m 지역의 신호가 강하게 수신되어 25 kHz 전후의 주파수 세기가 크게 증가한 것으로 분석된다.

V. 결 론

본 논문에서는 레이더 고도계의 지상 반사 신호 특성을 분석하기 위하여 실험 시나리오를 정립하고,

데이터 수집 장치를 사용하여 실시간으로 고도계의 빔 폭 범위에서 수신되는 레이더 신호를 수집하여 분석한 결과를 제시하였다. 실험은 고도계의 성능을 분석하기 위해 삼면반사기를 이용한 기준 신호 수집과 RCS 변화에 따른 데이터 수집이 수행되었고, 주변에 RCS가 큰 철제 지붕이 있을 경우에 대한 신호를 수집하였다. 기준 신호 측정 실험의 데이터 분석은 삼면반사기가 설치된 지역의 경사 고도에 따른 이론적인 주파수 값에서의 수집 신호의 크기 변화를 분석하였다. 레이더 고도계의 주엽의 3 dB에 의한 이득의 크기가 삼면반사기의 이득보다 커서 직하 방향의 반사 신호보다 큰 RCS 값을 얻을 수가 없었지만, 삼면반사기가 수신 신호에 5~10 dB 정도 영향을 미치기 때문에, RCS가 큰 주변 지형지물이 차 주파수에 영향을 끼친다는 것을 확인하였다. 그리고, 중앙 단상과 운동장 지면 사이에서 발생하는 급격한 고도 변화 현상은 주빔 폭 내의 RCS가 큰 물체와 직하 방향 수신 신호 사이 수신 신호세기의 변화 때문에 발생하였으며, 이는 고도계의 고도 측정 정확도를 저하시키는 요인 중 하나로 분석된다. 본 논문에서 고도 측정 오차가 발생하는 원인을 분석한 결과는 앞으로 FMCW 레이더 고도계를 운용함에 있어서, 수신 신호 요동에 대한 영향을 감소하기 위한 다중 필터의 성능 향상에 활용될 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

- [1] H. J. Hanson, R. Lindop, and D. Majstorovic, "Collision avoidance W-band FMCW radars in an altimeter application", *Australian Government Department of Defence, Defence Science and Technology Organisation, DSTO-TR-1939*, Edinburgh, Australia, Aug. 2006.
- [2] K. Araki, M. Sinriki, S. Nishimoto, and H. Itou, "Observation of fractal scattering from ground surfaces using millimeter wave radar altimeter", *Electron. Comm. Jpn*, vol. 83, issue 12, pp. 25-36, Jun. 2000.
- [3] I. V. Komarov, *Fundamentals of Short-Range FM Radar*, Arewch House, pp. 3-10, 2003.
- [4] 김세윤, 이호준, 현영오, "FMCW 방식의 전파 고도계에서 수신 신호 요동에 대한 영향을 감소하기 위한 다중 필터의 설계", *한국전자과학회논문지*, 21(10), pp. 1073-1199, 2010년 10월.