

거리 측정용 주파수 변조 연속파 레이더 개발에 관한 연구

박동국⁺·한태경⁺⁺·이현수⁺⁺⁺

A study on the Development of Frequency Modulated Continuous Wave Radar for Distance Measurement

Dong-Kook Park⁺, Tae-Kyoung Han⁺⁺ and Hyun-Soo Lee⁺⁺⁺

Abstract : In this paper, it is presented a frequency modulated continuous wave radar (FMCW) for distance measurement. The frequency range is 10~11 GHz and the sweep time of the signal is 100 ms. The test target is 0.8 m² of metal plate. The experiment is performed in open ground and the pyramidal horn antenna of about 22 dBi gain is used. The beat frequency according to the target moving to 40 m is measured. There is a good agreement between measured and calculated results. But the resolution of the FMCW radar is not good such as about 10 cm. It is result from the nonlinear signal of voltage controlled oscillator (VCO). To improve the nonlinear characteristic of VCO, a high pass filter and phase locked loop (PLL) frequency synthesizer are included in the radar system.

Key words : Radar, fmcw, distance measurement, phase locked loop, high pass filter

1. 서 론

주파수 변조 연속파(Frequency Modulated Continuous Wave ; FMCW) 레이더는 도로상에서 차량의 충돌 방지용, 비행 물체의 비행 고도 측정용 및 연료 저장고의 연료 저장 높이 측정용 등 많은 분야에서 연구가 진행 되어 오고 있다^[1-13]. 또한 주파수 변조 연속파를 이용한 화물 선박의 탱크의 내용물의 높이를 측정하는 레벨 게이지로도 SAAB사 등 몇몇 업체에서 개발을 하고 있으며, 선박의 무인자동화의 추세로 이러한 레이더 빔 형태의 레벨 계측 시스템의 시장 규모도 점점 더 성장하고 있는 추세이다^[4].

본 논문은 이러한 레벨 및 거리 측정에 응용이 가능한 주파수 변조 연속파 레이더의 개발에 관한 것으로, 현재 시제품으로 제작된 레이더의 제작과정 및 분해능을 개선하기 위해 연구 중인 내용을 소개하고자 한다.

2장에서 제작된 주파수 변조 연속파 레이더의 원리

를 간략히 소개하고, 제작 및 실험 결과에 대해 기술하고, 3장에서 분해능 저하의 원인 분석 및 이것을 개선하기 위한 방안에 대해 설명하고, 4장에 결론을 기술하였다.

2. 주파수 변조 연속파 레이더 제작 및 실험

2.1 주파수 변조 연속파 레이더의 제작

Fig.1에 주파수 변조 연속파 레이더의 블록도를 나타내었다. Fig.1의 전압 제어 발진기에서 Fig. 2(a)와 같이 시간에 따라 주파수가 선형적으로 증가 및 감소하는 송신 신호를 발생시킨다. 주파수 변조된 송신신호는 안테나를 통하여 공간상으로 나가게 되며, 거리 R 만큼 떨어진 위치에서 물체를 만나 반사된 신호가 레이더의 안테나로 되돌아오게 된다. 이때, 수신된 신호는 왕복거리 $2R$ 에 의한 시간지연

+ 박동국(한국해양대학교 전파정보통신공학부), E-mail: dkpark@mail.hhu.ac.kr, Tel: 051)410-4311

++ 한태경, 한국해양대학교 전자통신공학과 대학원 석사과정

+++ 이현수, 한국해양대학교 전자통신공학과 대학원 석사과정

$\tau = 2R/c$ 뒤에 수신된다. 그러므로 임의의 시점에서 안테나를 통해 송신되는 신호와 수신되는 신호를 관찰하면 주파수 차이가 나게 된다. 현재 송신되는 주파수를 혼합기의 LO 단자에 인가하고, 수신된 신호를 혼합기의 RF 단자에 인가하면, 혼합기의 IF 출력 단자에는 이 두신호의 차주파수 신호 성분이 나타나게 된다. 이 차주파수 신호를 비트 주파수 (f_{beat})라 부르며, f_{beat} 는 식 (1)와 같이 목표물까지의 거리에 비례하게 된다^[5].

$$f_{beat} = \frac{BW}{T/2} \frac{2R}{c} \quad (1)$$

그러므로 f_{beat} 를 구하면 목표물까지의 거리를 알 수 있다. 즉, 송신 신호를 혼합기의 LO 단자에, 수신 신호를 혼합기의 RF 단자에 인가하여 혼합기의 IF 단에서 나오는 신호의 스펙트럼을 고속 푸리에 변환 (Fast Fourier Transform ; FFT)을 하면 f_{beat} 를 얻을 수 있다. 이것을 통해 식 (1)에 의해 거리를 판별하게 된다. 이러한 FFT는 신호처리부에서 수행하게 된다.

본 논문에서는 분해능과 전압제어 발진기의 주파수 특성을 고려하여 주파수 대역폭을 1 GHz로 결정하여 FMCW 레이더의 주파수 스위프(sweep)을 10 ~ 11 GHz로 선택하였다. 스위프 주기는 전압제어 발진기의 스위프 능력과 분해능을 고려하여 100 ms에서 실험을 하였다. 전압제어 발진기로는 Agilent Technology사의 VTO-8951를 사용하여 출력주파수가 10 ~ 11 GHz 범위에서 100 ms의 스위프 주기를 갖도록 전압제어 발진기의 입력단에 삼각파 발생기를 제작하여 연결하였다.

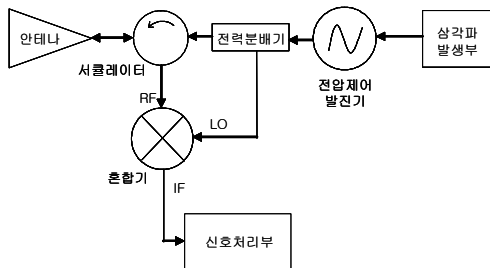


Fig. 1 Block diagram of FMCW radar

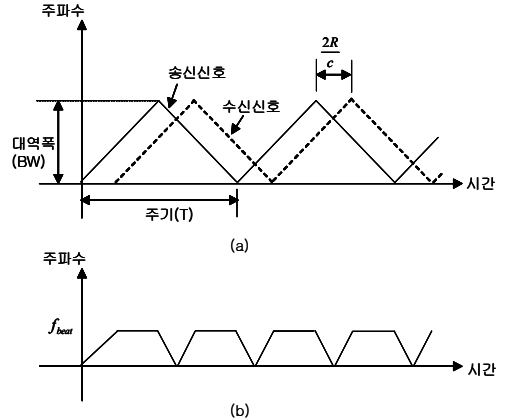


Fig. 2 FMCW radar signal

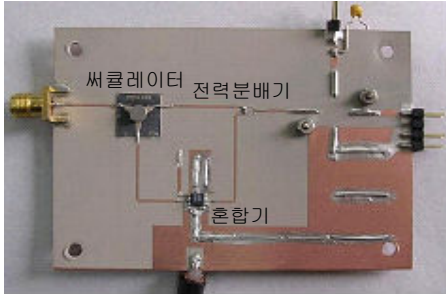
전압제어 발진기의 출력전력은 약 13 dBm 으로서 출력신호의 일부는 안테나를 통해 송신되고 나머지 일부는 혼합기의 LO단자에 인가가 된다. 이러한 출력신호의 분배는 Wilkinson 3 dB 전력분배기를 제작하여 사용하였다.

또한 송신신호와 수신신호를 분리하기 위해 TDK사의 CU9214B3L-105C 서클레이터를 사용하였다. 이것은 사용주파수 범위가 10 ~ 11.1 GHz, 격리도 특성이 20 dB 이상인 특성을 갖고 있다.

혼합기는 비선형 소자로서 RF 단자나 LO 단자로 입사된 두 신호의 하모닉 성분들을 IF 단자로 내보내는 소자이다. 본 논문에서 사용된 혼합기는 Hittite사의 HMC412MS8G 으로서 RF 및 LO가 9 ~ 15 GHz , IF가 DC ~ 2.5 GHz 이며, 변환손실은 8 dB 인 특성을 갖고 있다. LO 단자로 전압제어 발진기에서 송신되는 신호성분이 인가되고, RF 단자로 물체에서 반사된 시간 지연된 신호가 입사된다. 따라서 IF 단자에는 송신신호와 수신신호의 차주파수 성분이 나타나게 되는데 이 주파수는 식 (1)에서 보듯이 물체와의 거리에 비례하며, 거리 0.8 ~ 40 m의 목표물에 대해 f_{beat} 가 대략 0.2 ~ 8 KHz 범위의 값을 갖는다. 이러한 비트 주파수 성분을 추출하기 위한 신호처리부로 제작된 시제품의 경우 디지털 오실로스코프를 사용하였다.

Fig. 3에 제작한 주파수 변조 연속파 레이더의 RF부를 나타내었다. 사용된 기판은 타코닉(Taconic)사의 CER-10 기판(유전율 10)을 사용하였고, 먼저 각 모듈별 회로를 설계, 제작하여 각 모듈의 특성을 측정

하고 이것을 바탕으로 각 모듈을 하나로 합쳐 Fig. 3의 RF부를 완성하였다.



(a) front side



(b) back side

Fig. 3 Fabricated front-end of FMCW radar

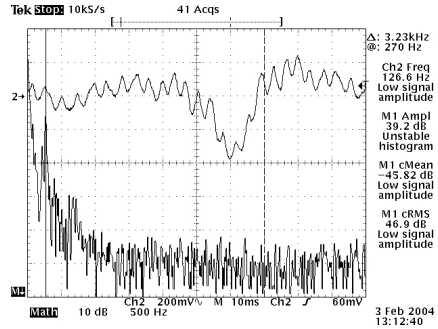
2.2 제작된 레이더의 특성 실험

RF 송수신을 위한 안테나는 동작주파수 범위가 8 ~ 12 GHz 이며, 약 22 dBi 의 이득을 갖는 상용 피라미드 혼(Horn)안테나를 사용하였다.

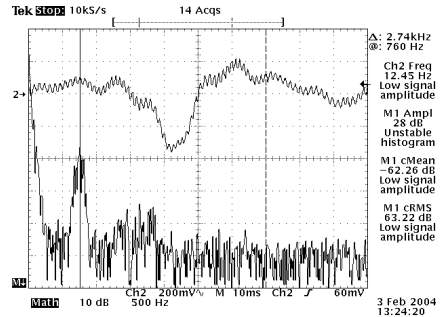
실험은 FMCW 레이더의 동작특성을 파악하고자 약 5 m(길이) × 2 m(폭) × 2.5 m(높이)의 실험실내 및 가로, 세로가 각각 100 m 이상인 개방된 운동장에서 측정하였다. 측정은 제작한 FMCW 레이더를 지상에서 1 m 되는 높이에 설치하고 RCS 가 0.8 m² 인 반사판을 안테나로부터 거리를 늘려가면서 측정하였다.

Fig. 4에 실험실에서 반사판의 거리가 각각 0.8 m 와 4.0 m 일 때 측정된 디지털 오실로스코프의 파형을 나타내었다. Fig. 4에서 윗부분의 신호는 시간

영역에서의 파형을 나타내며, 아래 부분의 신호는 윗부분의 신호를 FFT한 주파수 스펙트럼을 나타낸다.



(a) 0.8 m



(b) 4m

Fig. 4 IF signal of mixer according to distance between target and antenna

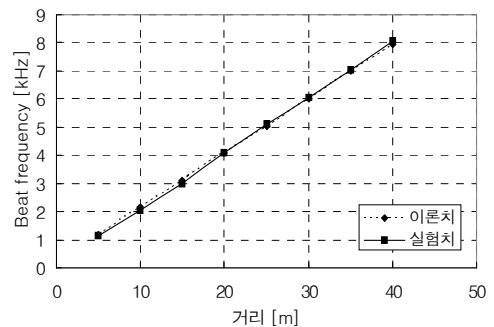
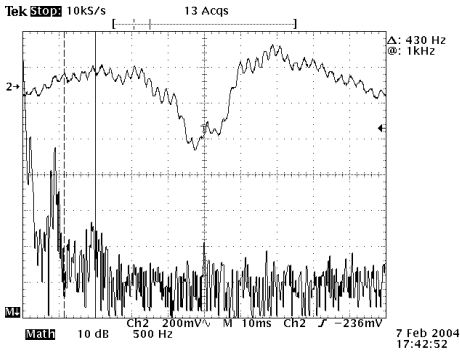


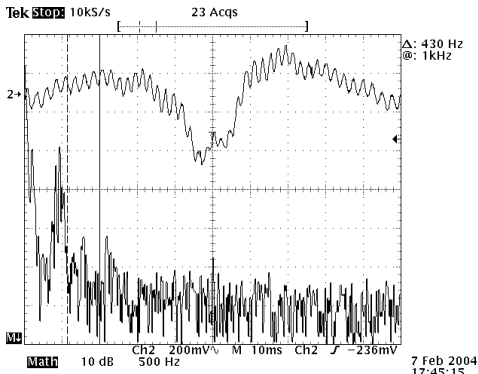
Fig. 5 Measured and calculated beat frequency as function of distance to target in open ground

Fig. 4에서 거리가 0.8 m 와 4 m 에서의 f_{beat} 주파수의 변화를 볼 수 있다. Fig. 4의 f_{beat} 주파수로부터 RF부에서 안테나까지의 길이를 보상하여 목표물까지의 거리를 식 (1)을 이용하여 계산할 수 있다.

Fig. 5에는 운동장에서 목표물까지의 거리를 40 m 까지 변화시켜가면서 측정한 비트 주파수로부터 식 (1)을 이용하여 계산한 거리 결과를 실측치와 비교하여 나타내었다.



(a) 190 cm, $f_{beat} = 450$ Hz



(b) 200 cm, $f_{beat} = 470$ Hz

Fig. 6 Resolution measurement

Fig. 6에 목표물의 거리가 1.9 m 와 2.0 m 일 때 측정한 주파수 스펙트럼을 나타내었다. Fig. 6에서 목표물이 10 cm 차이가 생길 때 비트 주파수는 20 Hz

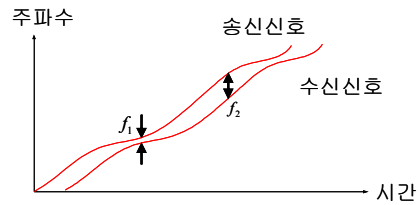
의 차이를 관측 할 수 있었다. 그러나 10 cm 이하의 거리에서는 비트 주파수의 차이가 목표물의 위치에 따라 일정하지 않아 정확한 데이터로 판단하기는 곤란하였다. 따라서 제작된 레이더의 분해능은 10 cm 로서 상용 제품의 분해능에 비해 성능이 뒤지고 있다.

3. 분해능 저하의 원인 분석 및 개선 방안

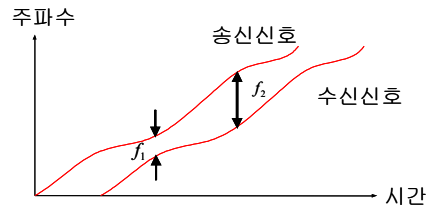
3.1 분해능 저하의 원인 분석

Fig. 4을 살펴보면 차주파수 스펙트럼이 일정한 대역폭을 갖고 있는 것을 볼 수 있다. 또한 이러한 대역폭이 목표물까지의 거리가 멀수록 증가한다는 것을 알 수 있다. 이것은 전압제어 발진기의 출력 신호가 비선형이기 때문이다.

Fig. 7에 전압제어 발진기의 출력 신호의 비선형이 비트 주파수에 미치는 영향을 개념적으로 설명하는 그림을 나타내었다. Fig. 7에서 f_{beat} 주파수는 $f_1 < f_{beat} < f_2$ 범위에 있게 되고, 목표물과의 거리가 멀수록 주파수 범위가 넓어지는 것을 볼 수 있다. 이것은 Fig. 4에서 관측한 현상과 동일하다.



(a) near target



(b) far target

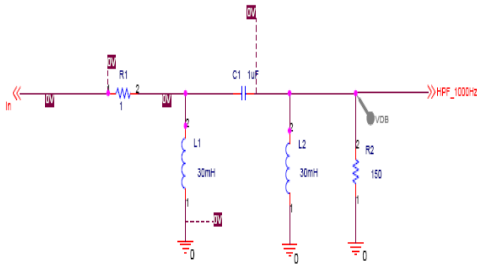
Fig. 7 Effect of nonlinear signal on beat frequency ($f_1 < f_{beat} < f_2$)

3.2 분해능 저하의 개선 방안

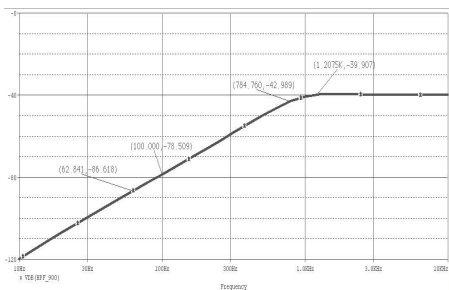
3.2.1 고역 통과 여파기

현재 개발된 FMCW Radar는 Fig. 4 및 Fig. 6의 스펙트럼을 살펴보면 저주파수 대역에서 아주 큰 신호 성분이 존재하는 것을 볼 수 있다. 이것은 안테나에서 반사되어 되돌아오는 신호에 의해 생기는 신호로서 가까이 있는 목표물의 관측 거리를 제한하는 요인이 된다. 그리고 최대 진폭 신호를 체크하여 비트 주파수를 찾는 알고리즘에서 큰 진폭을 갖는 이러한 신호는 에러를 야기하므로 고역 통과 여파기를 사용하여 제거를 해주어야 한다.

Fig. 8에 본 논문에서 설계한 고역 통과 여파기의 모양 및 P-spice를 통한 모의실험한 주파수 응답 특성을 나타내었다. 차단 주파수는 1 KHz 로 설계하였다.

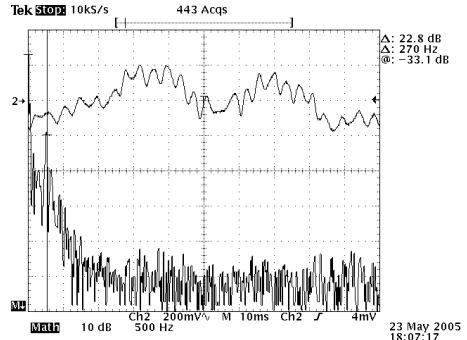


(a) Schematic diagram

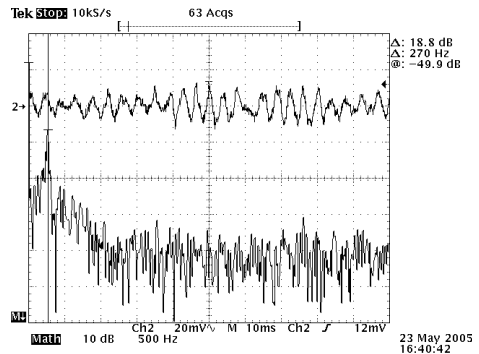


(b) Frequency response

Fig. 8 Designed high pass filter



(a) before filtering



(b) after filtering

Fig. 9 IF signal of mixer (a) before and (b) after high pass filtering

Fig. 9에 목표물의 거리가 0.8 m 에 있을 때 고역 통과 여파기 통과 전과 통과 후의 신호 파형을 비교하여 나타내었다. 고역 통과 여파기를 통과 전과 통과 후의 시간 영역에서의 신호 파형을 살펴보면, 저주파 대역의 신호 성분이 제거된 후 신호의 변화를 볼 수 있다.

3.2.2 PLL 주파수 합성기

전압제어 발진기에서 출력되는 Fig. 2(a) 신호의 선형성이 주파수 변조 연속과 레이더의 해상도에 직접적인 영향을 미치게 되므로 선형성을 확보하는 것이 가장 중요하다. 본 논문에서는 Phase locked Loop (PLL) 을 사용하여 이것을 구현하고자 한다. Fig. 10에 PLL 회로를 삽입한 레이더의 블록도를 나타내었다.

Fig. 10에서는 전압제어 발진기에서 나오는 신호를 모니터링하기 위해 신호의 일부를 분배기를 통해 프리스케일러(Prescaler)로 분배를 한다. Prescaler에서 10 ~ 11 GHz 대역의 신호를 1/16 배로 주파수 변환을 하여 625 ~ 687.5 MHz 로 변환을 하였다. 본 논문에서는 Prescaler 로 Hittite社의 HMC365G8 과 HMC433을 사용하여 각각 (1/4 * 1/4 = 1/16)로 나누도록 설정하였다.

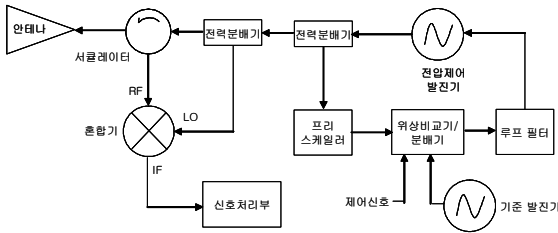


Fig. 10 Schematic diagram of FMCW radar with PLL frequency synthesizer

이렇게 분배된 신호가 위상비교기에 입력된다. 위상 비교기는 기준 발진기로부터의 신호주파수와 입력되는 신호주파수의 위상차에 따른 펄스폭을 가진 펄스를 출력한다. 본 논문에서는 기준 발진기로서 TCXO 인 12.5 MHz를 사용하였으며, 위상비교기 및 분배기로 LMX2326을 사용하였다. 이 칩은 기준 주파수 및 Prescaler 인 Hittite社의 HMC365G8 과 HMC433을 통해 입력되는 625 ~ 687.5 MHz 주파수 신호를 비교할 수 있도록 제어가 가능하게 되어 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 거리 측정용 FMCW 레이더를 설계 및 제작하였으며, 제작된 레이더를 이용하여 RCS 가 0.8 m²인 물체의 거리를 측정하였다.

제작된 레이더는 전압제어 발진기에서 10 ~ 11 GHz 까지 주파수 스위치가 100 ms 로 주기적으로 변하는 주파수 변조 신호를 이득이 약 22 dBi 이상인 피라미달 혼안테나를 통해 송신하고, 물체를 맞고 반사된 신호를

수신하여 디지털 오실로스코프를 통해 고속 푸리에 변환을 하여 목표물까지의 거리를 측정하였다.

실험실과 운동장에서 안테나와 반사판과의 거리를 늘려가면서 실험한 결과 거리가 1 ~ 40 m 변환에 따라 비트 주파수가 약 0.2 ~ 8 KHz 로 증가하는 것을 볼 수 있었다.

그러나 측정결과 전압제어 발진기의 비선형성으로 인하여 거리 판독 분해능이 나빠져서, 이것을 개선하기 위해 고역 통과 여파기 및 PLL 주파수 합성기를 이용하였다. 고역 통과 여파기를 사용한 실험 결과 및 현재 제작 중인 PLL 주파수 합성기의 설계에 대해 기술하였다.

향후 PLL 주파수 합성기를 제작하여 전압제어 발진기의 신호의 선형성을 개선하여 분해능이 향상되는 것을 관측하기 위한 실험을 수행하고자 한다.

참고문헌

- [1] H. D. Griffiths, "New ideas in FM radar", Electronics & Communication Engineering Journal, pp. 185-194, 1990.
- [2] A. G. Stove, "Obstacle detection radar for cars", Electronics & Communication Engineering Journal, pp. 232-240, 1991
- [3] M. I. Skolnik, Introduction to radar Systems, 2nd ed, MacGraw-Hill, New York, 1980.
- [4] www.saabradar.com/html/technology.html
- [5] N. Levanon, Radar Principles, Wiley Interscience, New York, 1988.