

주파수 변조 연속파를 이용한 레벨 측정 시스템 개발에 관한 연구

박동국* · 한태경** · 박인용*** · 윤천수****

*, **, ***, **** 한국해양대학교 전자·정보통신공학부

A Study on the Development of Level Sensor using Frequency Modulated Continuous Wave

Dong-Kook Park* · Tae-Kyoung Han** · In-Yong Park*** · Chun-Su Yoon****

*, **, ***, **** Div. of Radio & Information Communication Eng., National Korea Maritime University, Pusan 606-791, Korea

요약 : 본 논문은 주파수 변조 연속파 레이더를 사용하여 화물 선박의 탱크의 내용물의 깊이를 측정하는 레벨 센서의 개발에 관한 것이다. 사용 주파수는 10~11 GHz를 이용하였으며, 테스트용 물체는 RCS가 0.8 m² 인 도체판을 사용하였다. 실험은 연구실 내부와 운동장에서 하였으며, 스위프 주기가 100 ms, 안테나 이득이 약 22 dBi인 사각형 혼 안테나를 사용하여 약 8 dBm의 신호를 안테나에 인가하여, 40 m 까지 물체를 움직이며 비트주파수를 측정하여 이론치와 비교하였다. 실험치와 이론치가 잘 일치하였으나 전압제어 발진기의 비선형으로 인해 분해능이 약 10 cm 정도로 측정되었다.

핵심용어 : 레이더, 주파수변조, 레벨센서, 거리측정

Abstract : In this paper, it is presented a level sensor for measuring a level of the contents of cargo tank using frequency modulated continuous wave(FMCW). The frequency range is 10~11 GHz, the radar cross section(RCS) of test target is 0.8 m² of metal plate. The experiment is performed in laboratory and open ground, the sweep time of the signal is 100 ms, the pyramidal horn antenna of about 22 dBi gain is used, and input power of antenna is about 8 dBm. 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 measured about 10 cm due to nonlinear of voltage controlled oscillator(VCO).

Key words : radar, FMCW, level sensor, distance measurement

1. 서 론

거리 측정용 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(Griffiths, 1990 ; Stove, 1991 ; Skolnik, 1980). 또한 주파수 변조 연속파를 이용한 화물 선박의 탱크의 내용물의 높이를 측정하는 레벨 게이지도 SAAB사 등 몇몇 업체에서 개발을 하고 있으며, 선박의 무인자동화의 추세로 이러한 레이더 빔 형태의 계측 시스템의 시장 규모가 점점 더 성장하고 있는 추세이다(인터넷자료, 2004). 그러나 국내에서는 선박용 레이더 빔 형태의 레벨 계측 시스템을 전량 수입에 의존하고 있어 개발이 절실히 필요한 시점이다.

본 논문에서는 FMCW를 사용하는 선박용 레벨 센서를 개발할 때 가장 중요한 부분인 RF 부에 대해 설계 및 실험한 결과를 기술하고자 한다.

2장에 주파수 변조 연속파 레이더의 원리와 본 논문에서 제

작한 레이더의 설계에 대해 기술하고, 3장에서 실험 및 결과를 분석하였으며, 4장에 결론을 기술하였다.

2. 주파수 변조 연속파 레이더

2.1 주파수 변조 연속파 레이더의 기본 원리

레이더란 전파의 발사로 물체에서 반사되는 반사파를 이용하여 목표물의 존재와 그 거리를 탐지하는 무선 감지 장치이다. 만약 송수신 안테나를 하나만 사용하는 레이더의 경우 송신 전력을 P_t , 송수신 안테나의 이득을 G , 목표물까지의 거리를 R 로 나타낼 때, 안테나를 통해 수신되는 전력 P_r 은

$$P_r = \frac{P_t G^2 \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \quad (1)$$

으로 표현된다(Levanon, 1988). 여기서, λ 는 전자파의 파장을 나타내며, σ 는 목표물의 RCS를 나타낸다. 식 (1)에서처럼 수

* 대표저자 : 박동국(경희원), dcpark@mail.hhu.ac.kr 051)410 4311

신된 전력은 $1/R^4$ 으로 감소하기 때문에 원거리 목표물로부터의 미약한 신호를 감지할 수 있도록 수신기는 저잡음 특성을 가져야 한다.

Fig. 1에 본 논문에서 제작한 주파수 변조 연속파 레이더의 블록도를 나타내었다. 전압 제어 발진기(VCO)에서 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 $\tau=2R/c$ 뒤에서 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 (2)와 같이 목표물까지의 거리에 비례하게 된다(Levanon, 1988).

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

그러므로 f_{beat} 를 구하면 목표물까지의 거리를 알 수 있다. 송신 신호를 혼합기의 LO 단자에, 수신신호를 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. 본 논문에서는 Fig. 1처럼 FFT를 디지털 오실로스코프를 통해 수행하였다.

2.2 FMCW 레이더의 설계 및 제작

송신단의 설계는 우선 레이더 방정식을 이용하여 수신 전력을 계산하는 것에서부터 시작된다. 수신단의 수신가능 최소 입력신호 레벨(MDS)을 결정하여, 최대 탐지 거리에서 수신되는 신호가 MDS를 넘도록 송신전력과 안테나의 이득을 결정한다. 또한 선박용 탱크 내에서 레벨 계측을 위해서는 안테나의 크기는 작으면서 안테나의 빔폭(beam width)이 좁은 것이 바람직하므로 주파수가 높아야 하지만 목표물까지의 거리 및 신호의 감쇄를 고려하여 통상 기존의 상용 제품에서 사용하는 10GHz 대역을 선택하였다. 또한 스위프(sweep) 주파수 대역폭은 식 (2)에서 보는 것처럼 주파수 대역폭이 넓을수록 거리 변화에 대한 비트 주파수의 변화율이 크므로 분해능이 좋아지는 것을 알 수 있다. 따라서 본 논문에서는 분해능과 전압제어 발진기의 주파수 특성을 고려하여 주파수 대역폭을 1 GHz로 결정하여 FMCW 레이더의 주파수 스위프를 10 ~ 11 GHz로 선택하였다. 스위프(sweep) 주기는 전압제어 발진기의 sweep 능력과 분해능을 고려하여 100 ms 에서 실험을 하였다.

전압제어 발진기로 Agilent Technology사의 VTO-8951를 사용하였다. 이것은 동작주파수 범위가 9.5 ~ 11 GHz이며, 출력전력이 최소 10 dBm 으로서, 본 연구에서 개발하고자하는 레이더의 주파수 범위를 만족하고 있다. 또한 전압제어 발진기의 출력주파수가 10 ~ 11GHz 범위에서 100 ms 의 스위프 주기를 갖도록 전압제어 발진기의 입력단에 삼각파 발생기를 제작하여 연결하였다.

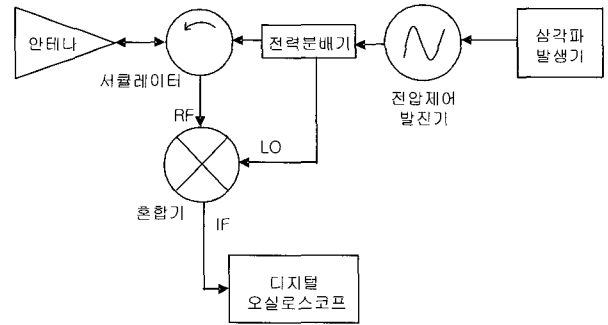


Fig. 1 Block diagram of FMCW radar

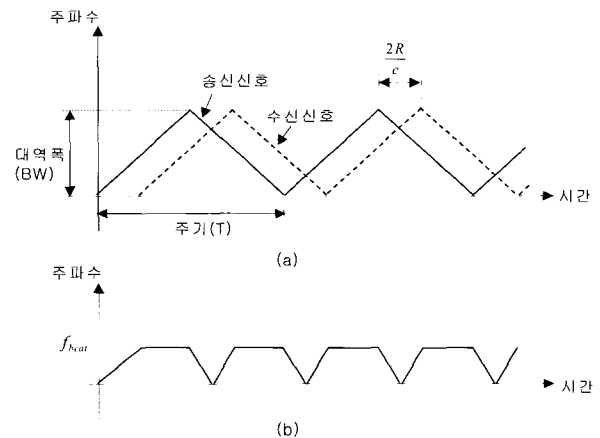


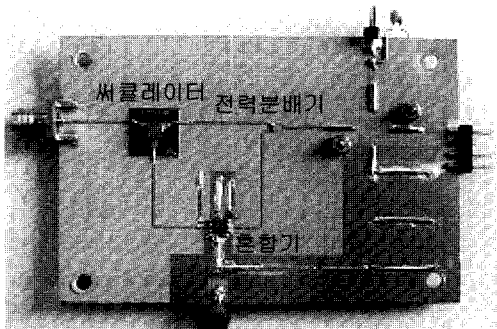
Fig. 2 FMCW radar signal

전압제어 발진기의 출력신호의 일부는 안테나를 통해 송신되고 나머지 일부는 혼합기의 LO단자에 인가가 된다. 이러한 출력신호의 분배는 Wilkinson 3 dB 전력분배기를 사용하였다. 또한 송신신호와 수신신호를 분리하기 위해 TDK사의 CU9214B3L 105C 서큘레이터를 사용하였다. 이것은 사용주파수 범위가 10 ~ 11.1 GHz, 격리도 특성이 20 dB 이상인 특성을 갖고 있다.

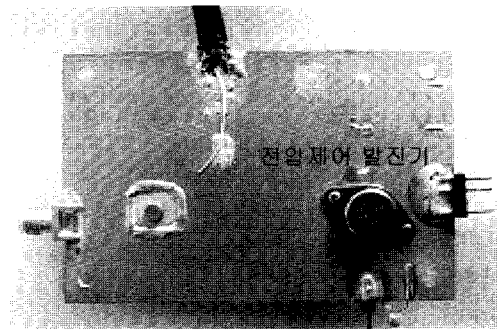
혼합기는 비선형 소자로서 RF 단자나 LO단자로 입사된 두 신호의 하모닉 성분들을 IF 단자로 내보내는 소자이다. 본 논문에서 사용된 혼합기는 Hittite 사의 HMC412MS8G 으로서 RF 및 LO가 9 ~ 15 GHz, IF가 DC ~ 2.5 GHz 이며, 변환손실은 8 dB, 인 특성을 갖고 있다. LO단자로 전압제어 발진기에서 송신되는 신호성분이 인가되고, RF단자로 물체에서 반사된 시간 지연된 신호가 입사된다. 따라서 IF단자에는 송신신

호와 수신신호의 차주파수 성분이 나타나게 되는데 이 주파수는 식 (2)에서 보듯이 물체와의 거리에 비례하며 본 논문에서 고려하는 물체와의 거리 범위에서는 대략 0.2 ~ 8 KHz 범위의 값을 갖는다. 이러한 차 주파수 성분을 추출하기 위한 신호 처리부로 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 측정하고 이것을 바탕으로 각 모듈을 하나로 합쳐 Fig. 3의 RF부를 완성하였다.



(a) 앞면



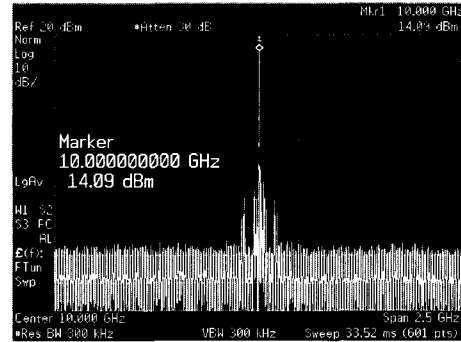
(b) 뒷면

Fig. 3 Fabricated front end of FMCW radar

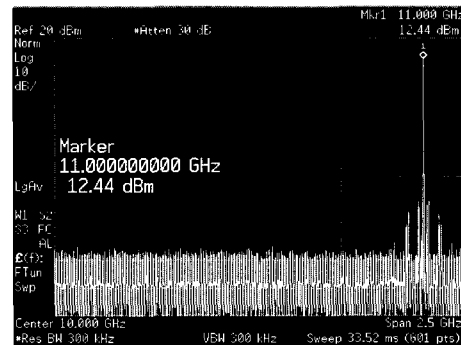
3. 실험 및 결과분석

각 모듈별 회로를 먼저 제작하여 각 모듈의 특성을 측정하였다. 각 모듈의 특성을 살펴보면, 전압제어 발진기의 경우 출력 특성을 알아보기 위해 스펙트럼 분석기를 이용하여 10 GHz 와 11 GHz의 주파수에서 발진기의 출력력을 측정하여 Fig. 4에 나타내었다. Fig. 5는 함수발생기(Function Generator)를 사용하여 주기(T)가 100ms 인 삼각파를 전압 제어 발진기의 입력단에 sweep 하였을 때 전압제어 발진기의 출력 스펙트럼을 나타내고 있다. 10 ~ 11 GHz대역에서 고른 출력 레벨을 나타내고 있음을 알 수 있다. Wilkinson 3 dB 전력분배기를 제작하여 측정한 결과, 10 ~ 11 GHz 주파수 대역에서 약 -4 dB 정도로 분배가 되었으며, 출력 단자간의 격리도는 약

30 dB 이상인 것으로 확인되었다. 또한 서클레이터는 RF 신호와 LO신호의 격리도가 대역 내에서 약 18 dB 이상으로 측정 되었으며, 삽입손실은 약 1 dB 로 관측되었다.



(a)10GHz



(b)11GHz

Fig. 4 Spectrum of output signal of VCO

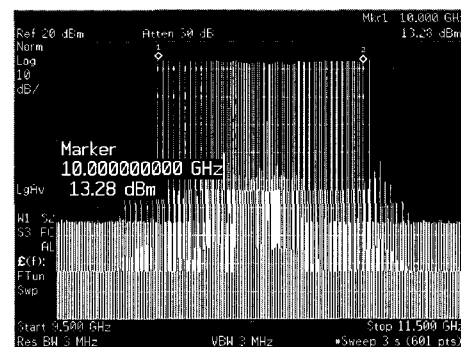


Fig. 5 Spectrum of output signal of VCO with sweep

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

실험은 FMCW 레이더를 실제 탱크에 장착하여 측정을 해야 하나, 탱크가 없는 관계로 FMCW 레이더의 동작특성을 파악하고자 건물 내 약 5 m(길이) × 2 m(폭) × 2.5 m(높이)의 실험실 내 및 가로, 세로가 각각 100 m 이상인 개방된 운동장에서 측정하였다. Fig. 6은 측정한 실험 환경을 나타내고 있다. 제작한 FMCW 레이더를 지상에서 1 m 되는 높이에 설치하고

RCS 가 0.8 m^2 인 반사판을 안테나로부터 거리를 늘려가면서 측정하였다. Fig. 7은 실험을 위한 세팅을 보여주고 있다.

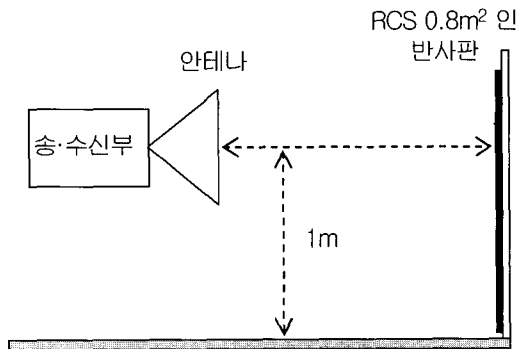


Fig. 6 Experimental environment

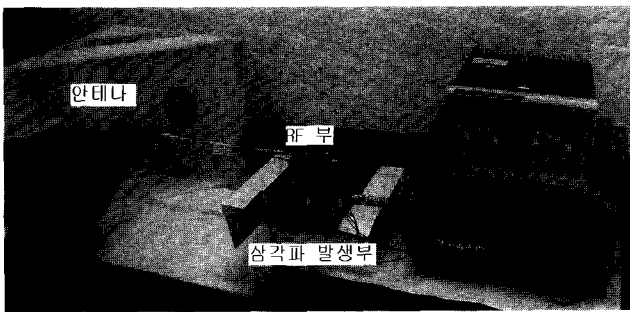
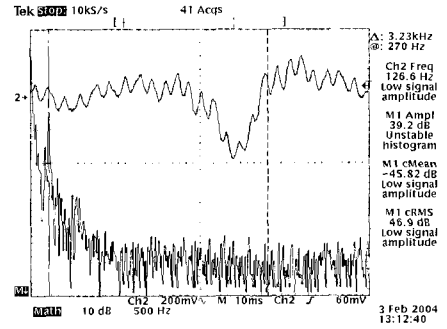


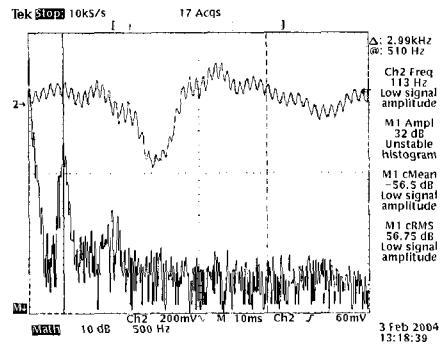
Fig. 7 FMCW radar set-up

Fig. 7에서 레이더의 각 부품의 특성 및 측정용 디지털 오실로스코프의 대역폭 25 kHz 를 사용하여 계산한 수신부의 등가잡음 온도는 약 1900 K 이 된다. 안테나의 등가잡음온도를 무시한 경우 안테나에 수신된 잡음 전력은 약 -120 dBm 이며, 디지털 오실로스코프의 검파를 위한 최소 S/N 비가 약 10 dB 라고 가정하고 20 dB 정도의 마진(margin)을 고려하면, 수신가능 최소입력 레벨(MDS)이 약 90 dBm 이 된다. VCO 의 출력이 13 dBm 이며, 전력분배기 및 서클레이터를 통과하여 안테나에 입력되는 전력은 약 8 dBm 이다. 이것이 안테나를 통해 전파되며, 40 m 떨어져 있는 RCS 가 0.8 m^2 인 물체에 의해 반사되어 돌아올 때 안테나에 수신되는 전력은 약 77 dBm 이 되어 MDS 레벨보다 큰 전력이 수신된다. 그러므로 현재의 시스템 구성으로는 40 m 까지도 RCS 가 0.8 m^2 인 물체의 측정이 가능하다.

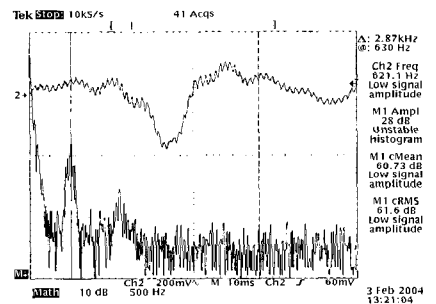
Fig. 8에 실험실에서 반사판의 거리를 바꿔가면서 측정한 디지털 오실로스코프의 파형을 나타내었다. 이때 주파수 스윕은 100 ms로 설정하였다. Fig. 8에서 윗부분의 신호는 시간 영역에서의 파형을 나타내며, 아래 부분의 신호는 윗부분의 신호를 FFT한 주파수 스펙트럼을 나타낸다. Fig. 8에서 거리가 0.8 m 에서 4 m 까지 변할 때, f_{beat} 주파수의 변화를 볼 수 있다.



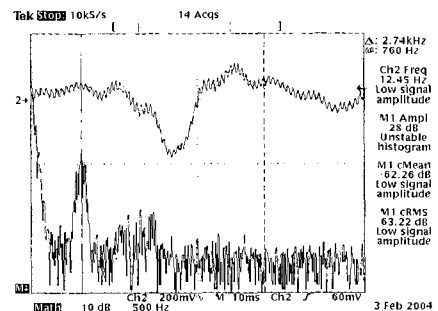
(a) 0.8 m



(b) 2.4m



(c) 3.2m



(d) 4m

Fig. 8 IF signal of mixer according to distance between target and antenna

RF부에서 안테나까지의 길이를 보상하여 Fig. 8의 f_{beat} 주파수로부터 목표물까지의 거리를 식 (2)를 이용하여 측정할 값과 이론값을 Fig. 9에 나타내었다. RF부에서 안테나까지의

길이 보상이 필요한 이유는 실제 측정을 하면 VCO 출력에서 혼합기의 RF 단과 IF 단에 각각 인가되는 신호의 주파수 차, 즉 시간차가 비트주파수로 나오게 되는데, RF단의 신호는 서큘레이터에서 안테나를 거쳐 송신 및 수신이 되므로 이러한 길이가 모두 포함이 되어 있는 반면, 이론적인 값은 안테나 끝단에서 목표물까지의 거리로 계산하므로, 이론치와 실험치간에 길이의 차이가 생긴다. 실제로 Fig. 7의 레이더로 실험을 하였을 때, 약 1.1 m의 거리 보상이 필요하였다. 이러한 보상을 하여 Fig. 9에 나타난 실험값과 이론값은 매우 유사한 것을 볼 수 있다. 또한 운동장에서 목표물의 거리를 40 m 까지 변화시켜 측정한 결과를 Fig. 10에 나타내었다.

그러나 Fig. 8을 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 비선형성 때문에 발생하는 것이다. 이러한 현상 때문에 거리 판독 분해능이 나빠지게 된다. 현재 본 논문에서 제작한 레이더로는 측정결과 약 10 cm 를 구별할 수 있는 정도의 거리 판독 분해능을 갖는 것을 실험적으로 확인 하였다. 거리 판독 분해능을 높게 하기 위한 방법으로는 전압제어 발진기의 선형성을 개선하는 것이 필요하며, 본 연구실에서 이것을 계속 연구 중에 있다.

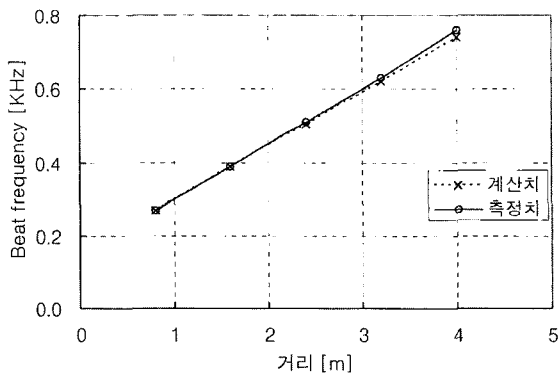


Fig. 9 Measured and calculated beat frequency as function of distance to target in laboratory

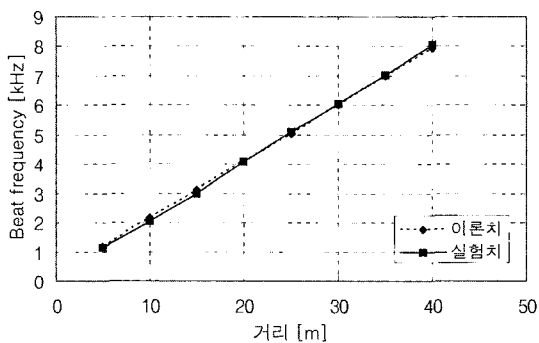


Fig. 10 Measured and calculated beat frequency as function of distance to target in open ground

4. 결 론

본 논문에서는 선박용 탱크의 레벨 게이지에 사용될 FMCW 레이더를 설계 및 제작하였으며, 제작된 레이더를 이용하여 RCS 가 0.8 m²인 물체의 거리를 측정하였다.

제작된 레이더는 전압제어 발진기의 sweep 능력과 분해능을 고려하여 sweep 주기 100 ms, 10 ~ 11 GHz 까지 주파수가 선형적으로 변하는 주파수 변조 신호를 이득이 약 22 dBi 이상인 피라미달 혼 안테나를 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 변함에 따라 비트 주파수 f_{beat} 가 약 0.2 ~ 8 KHz 로 증가하는 것을 볼 수 있었다.

그러나 측정결과 전압제어 발진기의 비선형성으로 인하여 거리 판독 분해능이 나빠져서 현재 제작된 레이더로는 10 cm 의 분해능 밖에 얻을 수 없었다. 전압제어 발진기의 비선형성을 개선하기 위한 방법에 대한 연구가 계속적으로 이루어져야 할 것으로 사료된다.

후 기

본 연구는 2003년도 정보통신부 정보통신기초기술연구지원 사업의 지원을 받아 이루어졌음.

참 고 문 헌

- [1] 인터넷자료(2004), <http://www.saabradar.com/html/technology.html>
- [2] Stove, A. G. (1991), "Obstacle detection radar for cars", Electronics & Communication Engineering Journal, pp. 232-240.
- [3] Griffiths, H. D.(1990), "New ideas in FM radar", Electronics & Communication Engineering Journal, pp. 185-194.
- [4] Skolnik, M. I.(1980), Introduction to radar Systems, 2nd ed, MacGraw-Hill, New York, 1980.
- [5] Levanon, N.(1988), Radar Principles, Wiley-Interscience, New York.

원고접수일 : 2004년 4월 28일

원고채택일 : 2004년 7월 23일