

VCO 비선형 보상 알고리즘을 적용한 근거리 측정용 FMCW 레이더 개발†

(Development of a FMCW Radar Using a
Compensation Algorithm for VCO Nonlinearity)

전 중 창*, 이 현 수**, 손 중 윤***, 김 태 수****

(Joong Chang Chun, Hyun Soo Lee, Jong Yoon Sohn, and Tae Soo Kim)

요 약 본 논문에서는 근거리 측정용의 주파수변조 연속파(FMCW: Frequency Modulated Continuous Wave) 레이더를 설계 제작하였다. FMCW 레이더의 구조에서는 전압제어 발진기(VCO: Voltage-Controlled Oscillator)의 비선형성에 의한 오차를 제거하는 것이 관건이며, 본 연구에서는 비트 신호의 스펙트럼 상관성을 이용한 비선형성 보상 알고리즘을 채택하였다. 본 연구에서 제작된 레이더는 X-Band(9.55~10.25GHz) 마이크로파를 사용하여, 30m 범위에서 3% 이내의 정밀도를 실현하였으며, 차량 충돌방지 및 탐사 로봇 등의 전방 감시 레이더에 응용될 수 있다.

핵심주제어 : FMCW 레이더, 근거리 측정, VCO 비선형성, 보상 알고리즘, 충돌방지

Abstract In this paper, we have implemented an FMCW radar for a near distance measurement. In the structure of the FMCW radar, it is a key problem to solve the VCO nonlinearity. In this work, we have adopted a VCO nonlinearity compensation algorithm using the spectrum correlation of beat signals. The radar experimented in this work uses an X-band(9.55~10.25GHz) microwave signal, and realizes precision of 3% in the range of 30m. The prototype can be applied to the front surveillance radar such as in vehicle anti-collision and probing robot mission.

Key Words : FMCW radar, near distance measurement, VCO nonlinearity, compensation algorithm, anti-collision

1. 서 론

레이더는 전자파 에너지를 발사하여 표적물로부터

반사되어 되돌아오는 반사파의 도착 시간을 측정함으로써 송신 안테나와 표적물 사이의 거리를 측정하는 장치이다[1]. 레이더 시스템은 비행기나 선박의 항법장치 뿐 아니라 중화학 산업단지의 대형 탱크 레벨 측정, 기상관측, 해상 안전시설, 그리고 차량 충돌 방지 등 다양한 분야에서 응용되고 있다[2-5]. 특히 최근에는 차량 충돌방지 레이더 기술 수요가 급증하고 있다[6]. 일반적인 대공 레이더가 수 백 킬로미터의 측정거리를 대상으로 하는 반면에, 차량용 전방 레이더는

† 이 논문은 2012년도 경남과학기술대학교 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

* 경남과학기술대학교 전자공학과, 제1저자, 교신저자
(e-mail: jcchun@gntech.ac.kr)

** 대한민국 공군 15비행단 정보통신대대

*** 경상대학교 물리학과

**** 위덕대학교 정보통신공학과

200m 이내의 근 거리 측정이 가능하여야 한다. ITU-R 권고 M.1452에 따른 차량 레이더 시스템 요구 사양에는 FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave) 방식, Pulse 방식, CW(Continuous Wave) 방식, Spread Spectrum 방식이 있으며, 경제적 기술적 이유로 인하여 FMCW 방식이 가장 널리 이용되고 있다. 근거리용의 FMCW 방식 레이더에서는 전압제어 발진기(Voltage-Controlled Oscillator)의 선형적인 주파수 특성이 중요한 관건으로 작용한다[7,8]. VCO에는 베틀렉터 다이오드를 이용한 VTO(Varactor-Tuned Oscillator)와 YIG를 사용하는 YTO (YIG-Tuned Oscillator)가 있으며, YTO는 VTO에 비하여 주파수 변조 선형성은 극히 우수하지만 부품 가격이 높고, 구동회로가 복잡한 단점이 있다.

본 논문에서는 근거리 측정용의 주파수변조 연속파(FMCW) 레이더를 설계 제작하였다. VCO의 비선형성에 의한 오차를 제거하기 위해서 본 연구에서는 비트 신호의 스펙트럼 상관성을 이용한 비선형성 보상 알고리즘을 채택하였다[8]. FMCW 레이더 이론과 VCO 비선형성 개선 방법을 고찰하고, FMCW 레이더를 실제 제작하여 측정된 결과를 분석하였다. 본 연구에서 제작된 레이더는 X-Band (9.55~10.25GHz) 마이크로파를 사용하여, 30m 범위에서 3% 이내의 정밀도를 실현하였으며, 이 레이더는 차량 충돌방지용 전방 레이더 및 탐사로봇 등에 응용될 수 있다.

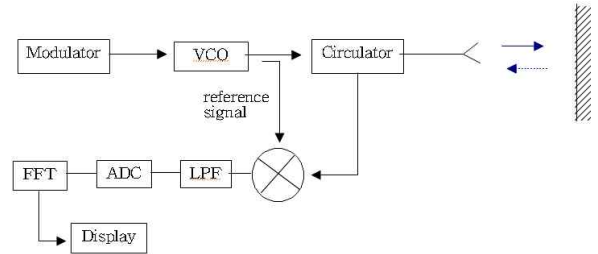
2. FMCW 레이더 이론 및 비선형 보상 알고리즘

2.1 FMCW 레이더 이론

그림 1은 FMCW 레이더의 기본적인 시스템 구성도를 나타낸다. 시간에 따라 톱니파 모양의 주파수 변조된 마이크로파 신호를 표적물에 투사하여, 송·수신신호 사이의 주파수 차를 측정함으로써 거리를 환산할 수 있다. 표적물까지의 거리 d 는 아래 식과 같이 비트 주파수 (beat frequency) f_b 에 비례하므로, f_b 를 측정하면 거리 d 를 구할 수 있다.

$$d = \frac{cf_b}{4f_m \Delta f} \quad (1)$$

여기서 c 는 공기중의 광속을, f_m 은 변조 신호의 주파수를, Δf 는 VCO의 주파수 대역폭을 각각 나타낸다.



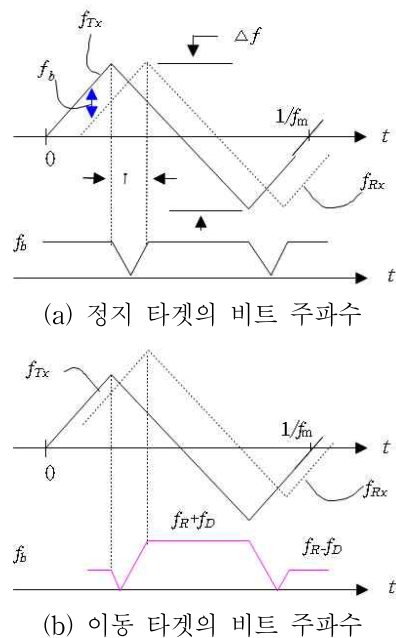
<그림 1> FMCW 레이더의 기본 구조

그리고 비트주파수 f_b 는 아래 식과 같이 송신주파수 f_{Tx} 와 수신 주파수 f_{Rx} 의 차로 계산된다.

$$f_b(t) = f_{Tx}(t) - f_{Rx}(t) = f_{Tx}(t) - f_{Tx}(t - \tau) \quad (2a)$$

$$\tau = \frac{2d}{c} \quad (2b)$$

그림 2는 송수신 주파수와 비트 주파수에 대한 시간 다이어그램을 나타내고 있다. 그림 2a에서는 표적물이 움직이지 않는다고 가정하였으며, 만일 표적물이 움직일 경우에는, 그림 2b에 보인 바와 같이 도플러 효과에 의하여, 비트신호에는 거리에 의한 주파수와 도플러 주파수가 혼합되어 존재한다.



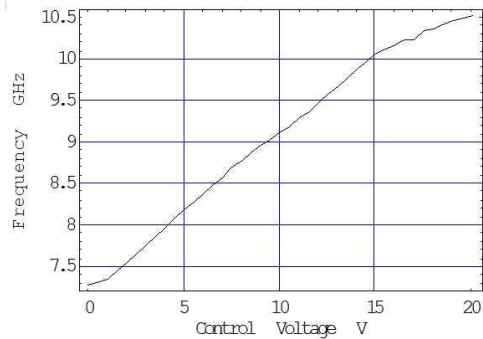
<그림 2> FMCW 레이더의 주파수-시간 다이어그램
2.2 비선형 보상 알고리즘

FMCW 레이더는 그 동작 이론이 잘 알려져 있으며, 시스템 구성도 비교적 간단한 편이다. 그러나 VCO의 주파수 변조의 선형성이 우수하지 않으면 일정한 비트 주파수를 얻을 수 없게 된다. 따라서 VCO 특성은 어떤 다른 부품보다도 더 중요하며, 선형 보상 알고리즘을 적용함으로써 부품 수급의 경제성을 기할 수 있다. VCO의 주파수 변조 선형도 L 은 다음과 같이 정의된다[9].

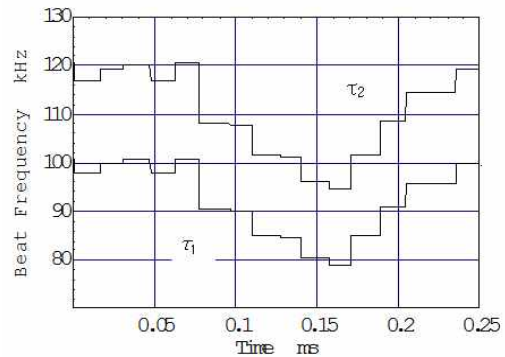
$$L = \frac{S_{max} - S_{min}}{S_{max} + S_{min}} \times 100 (\%) \quad (3)$$

여기서 S_{max} 와 S_{min} 은 튜닝감도(sensitivity)의 최대값과 최소값을 각각 나타낸다. 0%의 선형도는 전압-주파수 특성곡선이 완벽한 직선임을 의미한다. 양호한 FMCW 레이더를 설계하기 위해서는 0.1% 이하의 선형도가 필요하다.

실 예로 스위프 구간 내에서 비트 주파수의 변화를 살펴보기 위해서 Magnum Microwave 사의 VCO HV113T-1의 주파수 변조특성을 분석하였다. 그림 3은 이 VCO의 전압-주파수 특성을 측정한 결과이다. 8~10 GHz 범위에서 선형도(linearity)는 12.1%로 계산된다. 이 VCO로써 0.25ms 동안 1.493GHz의 대역폭을 갖도록 선형적으로 주파수 변조하였을 때, 임의로 설정된 지연 시간 $\tau_1=15.4\text{nsec}$ 와 $\tau_2=18.4\text{nsec}$ 에 대한 비트 주파수의 시간변화를 그림 4에 도시하였다. 여기에서 어떤 시간 t_1 에서 두 비트 주파수의 비는 $f_{b\tau_2}(t_1)/f_{b\tau_1}(t_1)=\tau_2/\tau_1=1.19$ 로 일정하게 유지됨을 볼 수 있다. 따라서 τ_1 과 τ_2 의 지연시간에 의한 비트 신호를 각각 $v_{b_1}(t)$ 와 $v_{b_2}(t)$ 라



<그림 3> Magnum VCO의 주파수-전압 다이어그램
 고 하면, 이들을 DFT 변환한 $V_{b_1}(k)$ 와 $V_{b_2}(k)$ 의 스펙트럼도 동일 비율로 주파수 천이가 발생된다. 즉, τ_1 과 τ_2 의 차이가 크지 않으면 주파수 영역에서 상관성(correlation)은 $\Delta d_{21} = d_2 - d_1$ 에 비례하게 된다.



<그림 4> 시간 지연에 따른 비트 주파수의 변화
 ($\tau_1=15.4\text{nsec}$, $\tau_2=18.4\text{nsec}$)

이와 같은 VCO의 비선형성을 보상하기 위하여 비트 신호 스펙트럼 상관성을 이용하는 방법은 송수신 신호 사이의 전파지연 시간이 비슷한 두 비트 신호를 주파수 영역에서 비교하면, 두 신호의 상관성(correlation)이 매우 크다는 점에 착안하고 있다. 오실레이터의 전압-주파수 출력 선형도 특성이 어느 정도 비선형성을 가지더라도 짧은 시간 구간 내에서는 직선 특성을 가지게 되므로, 스위프 시간 내에서 중간주파 신호의 주파수 편이가 측정 거리에 비례한다. 즉, 마이크로파의 전파 지연시간이 알려진 두 개의 기준 지연선로에 의한 중간주파 신호의 상대적인 주파수 편이를 구하면, 측정 거리에 의한 중간주파 신호의 주파수 편이를 비례적으로 계산하여 전파와 전파지연 시간을 환산할 수 있다.

두 비트신호 $v_{b_1}(t), v_{b_2}(t)$ 의 주파수 영역의 상관함수

$R_{12}(k)$ 는 아래와 같이 N-point 이산 상승적분(convolution)으로 계산된다.[8]

$$\begin{aligned}
 R_{12}(k) &= V_{b1}(k) \otimes V_{b2}(k) \\
 &= \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{N-1} V_{b1}((l))_N V_{b2}((k-l))_N \\
 &= \frac{1}{N} \sum_{l=0}^{N-1} V_{b1}((l))_N V_{b2}((l-k))_N \\
 &= \mathfrak{I}\{v_{b1}(n) \cdot v_{b2}(n)\}
 \end{aligned} \tag{4}$$

3. 제작 및 측정

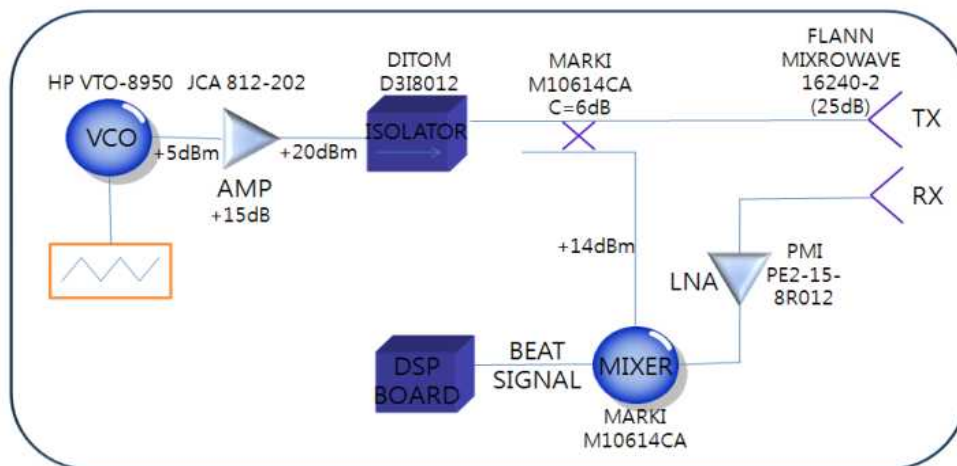
본 연구에서 제작된 FMCW 레이더의 구성도와 제작 결과를 그림 5와 6에 각각 보였다. 마이크로파 신호 발생을 위해서는 HP 사의 VTO-8950 VCO가 사용되었다. 이 외에 증폭기, 아이솔레이터, 서큘레이터, 믹서, 안테나, 그리고 디지털 신호처리 보드(TMS320F28335)를 사용하여 레이더 시스템을 구성하였다. 9.55~10.25GHz 스위프(sweep) 대역의 레이더 신호와 770Hz의 변조 주파수가 사용되었다.



<그림 6> 제작된 FMCW 레이더의 실험 셋업

측정거리 30.6m에 대한 비트 신호의 시간영역 파형과 FFT 주파수영역 파형을 그림 7에 도시하였다. 그림 7(a)는 변조 주기에 관찰된 시간영역의 비트신호이다. 그림 7(b)는 스펙트럼 분석 결과를 나타내며, 비트주파수는 253kHz로 관찰 된다.

표 1에 비선형 보상 알고리즘 적용 효과를 제시하였

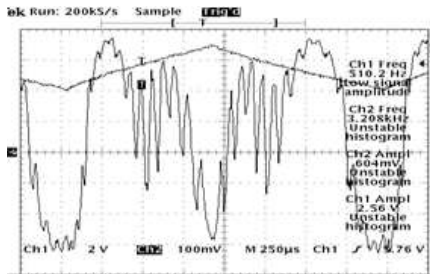


<그림 5> 본 논문에서 제작된 FMCW 레이더의 블록 다이어그램

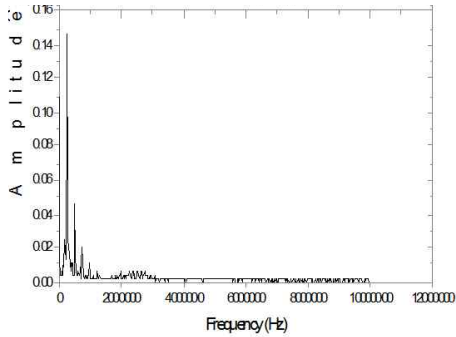
다. 측정된 비트 주파수로부터 직접 계산된 거리값은 근거리에서 44.4%의 오차가 나타났으며, 비선형 보상 알고리즘을 적용함으로써 정확한 값을 얻을 수 있었다.

<표 1> 비선형 보상 알고리즘 적용 효과

기준 거리(m)		3.6	6.3	8.1
f_b 로부터 직접 계산	거리(m)	5.2	7.8	9.1
	오차(%)	44.4	23.8	12.5
상관성 알고리즘	거리(m)	3.6	6.3	8.1
	오차(%)	0	0	0



(a) 시간 영역의 측정 결과



(b) 스펙트럼 분석

<그림 7> 타겟 거리 30.6m에 대한 비트 신호의 측정 및 스펙트럼 분석 결과

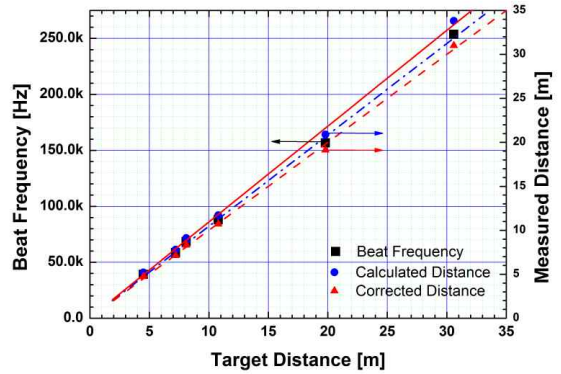
30m 범위에서 실제 거리에 따른 측정값과 보정값 사이의 관계를 그림 8에 보였다. 비트주파수로부터 직접 계산된 거리값(d^{cal})은 실제 타겟 거리(d^{target})와 약 10%의 오차를 가지고 있으며, 이 계산값과 타겟 거리와의 상관관계는

$$d^{cal} = 1.08934d^{target} + 0.05197 \quad (5)$$

로 나타났다. 식 (1)과 식 (5)를 이용하여 계산값에 나타나는 오프셋이 보정된 거리 $d^{correct}$ 을 구할 수 있는 식 (6)을 도출 하였다.

$$d^{correct} = \frac{kf_b - 0.05197}{1.08934} \quad (6)$$

여기서 k 는 식 (1)에 주어진 $\frac{c}{4f_m \Delta f}$ 이며, 본 실험에서는 0.133428×10^{-3} 으로 계산된다. 보정된 측정값을 그림 8에 도시하였으며, 실제 타겟 거리와는 3% 이내로 정밀도가 향상되었다.



<그림 8> 비트 주파수 및 거리 측정 결과

4. 결론

본 논문에서는 근거리 측정용으로 사용할 수 있는 주파수변조 연속파(FMCW) 레이더의 제작 및 실험결과를 제시하였다. FMCW 레이더에서 VCO의 선형성은 거리 측정 정확도에 직접적으로 영향을 미치게 되므로, 거리계에 사용되는 VCO의 주파수 선형도가 매우 좋아야한다. 본 연구에서는 주파수 선형도를 개선하기 위해서 비트 신호의 스펙트럼 상관성을 이용한 비선형성 보상 알고리즘을 적용하였으며, 근거리에서는 44.4%의 측정 오차가 개선되었다. 아울러 측정 결과의 오프셋 보정식을 도출함으로써 30m 범위에서 3% 이내의 정밀도를 갖는 레이더 시스템을 제작 하였다. 본 연구에서 제시된 FMCW 레이더는 자동차 충돌방지용, 열차, 선박, 탐사 로봇, 군사용 탱크 등의 전방 장애물 감시 센서 등에 응용가능하다.

참고 문헌

[1] M. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, 3rd Ed., McGraw-Hill, 2001.

- [2] M. Nowogrodzki, R. Kipp, D. Mawhinnery, "Radar Instruments: Sensors for Industrial Applications," *RCA Engineers*, vol. 27, no. 5, pp. 23-29, Oct. 1982.
- [3] 이채욱, 오신범, "이동식 기상 레이더 자료 시스템 개발," 한국산업정보학회논문지, 제5권, 제3호, pp. 45-50, 2000년 9월.
- [4] 정중혁, 강상욱, 조영창, 최병진, 윤정오, 오주환, "개선된 기능을 갖는 능동 레이더 반사기 개발에 관한 연구," 한국산업정보학회논문지, 제5권, 제3호, pp. 38-43, 2000년 9월.
- [5] L. Giubbolini, "A Multistatic Microwave Radar Sensor for Short Range Anticollision Warning," *IEEE Trans. Vehicular Tech*, vol. 49, no. 6, pp. 2270 - 2275, 2000.
- [6] 배창호, "차량 레이더 기술 동향 연구," ETRI 전자통신동향분석, 제21권, 제4호, pp. 142-151, 2006년 8월.
- [7] 정수용, 이성로, 정민아, 박창수, "FMCW 레이저 거리 측정기의 비선형성 보정 방법," 한국통신학회 논문지, 제38C권, 제4호, pp. 351-358, 2013년 4월.
- [8] J.M. Kim, Z.S. Lim, J.C. Chun, T.S. Kim, "Correlation Algorithm for High Precision Measurement in FM-CW Radar Level Meters," *IEICE Trans. Communications*, Vol. E84-B, No. 8, pp. 2326-2329, Aug. 2001.
- [9] E. Holzman, *Solid-State Microwave Power Oscillator Design*, Artech House, pp. 352- 353, 1992.



정보통신대대

- 경남과학기술대학교 전자공학과 공학사
- 경남과학기술대학교 전자공학과 공학석사
- 대한민국 공군 15비행단

- 관심분야 : 레이더 시스템, 안테나, 무선통신



손종윤 (Jong Yoon Sohn)

- 정회원
- 경남대학교 물리학과 이학사
- 경남대학교 물리학과 이학석사
- 경남대학교 물리학과 이학박사
- 경상대학교 물리학과 시간강사
- 관심분야 : 신호처리, 컴퓨터 시뮬레이션, 제어 시스템 설계, 고체물리



김태수 (Tae Soo Kim)

- 정회원
- 경북대학교 전자공학과 공학사
- 요코하마국립대학 전자정보공학과 공학석사
- 요코하마국립대학 전자정보공학과 공학박사
- 위덕대학교 정보통신공학과 교수
- 관심분야 : 디지털 신호처리, 영상인식, 무선랜



전중창 (Joong Chang Chun)

- 정회원
- 경북대학교 전자공학과 공학사
- 포항공과대학교 전자전기공학과 공학석사
- 포항공과대학교 전자전기공학과 공학박사
- 경남과학기술대학교 전자공학과 교수
- 관심분야 : 레이더, 마이크로파 시스템, 안테나

논문접수일 : 2013년 08월 14일
 1차수정완료일 : 2013년 12월 03일
 2차수정완료일 : 2014년 01월 05일
 게재확정일 : 2014년 02월 12일

이현수 (Hyun Soo Lee)