

# 마이크로파 거리계의 VCO 비선형성에 의한 시스템 특성 분석 및 개선 방안 연구

전중창\*, 김정목\*\*, 임종수\*\*

\*위덕대학교 전자기술연구소, \*\*포항산업과학연구원 계측연구팀

\*경북 경주시 강동면 유금리 산 50번지

Tel: 0561-760-1124, Fax: 0561-760-1018, e-mail: jcchun@viro.uiduk.ac.kr

\*\*경북 포항시 남구 효자동 산 32번지

## Improved Design of the Microwave Level Meter upon VCO Nonlinearity

Joong-Chang Chun\*, Jeong-Mok Kim\*\*, Jong-Soo Lim\*\*

\*Uiduk University, \*\*Research Institute of Industrial Science and Technology

\*San 50 Yugeom-Ri, Kangdong-Myun, Kyungju, Kyungbuk

\*\*San 32 Hyoja-Dong, Nam-Gu, Pohang, Kyungbuk

### Abstract

In this paper, we have presented an improved design of the microwave level meter based on the principle of FM-CW radar. First, we have analyzed the effect of VCO nonlinearity on the spectral broadening of the beat signal, and presented a new type of design theory to linearize VCO tuning curve adopting FFT algorithm. Simulation results for a VCO having the linearity of 25% have been presented, which show the usefulness of the design algorithm.

### 1. 서론

전자파를 이용한 레이더는 거리 또는 물체의 이동 속도를 측정하기 위하여, 여러 분야에서 응용되고 있다. 특히, 제철소의 용광로 용선(鑄鐵) 높이 측정에서와 같이 분진, 수증기, 고온 가스 등에 의하여 운용 환경이 열악한 곳에서는 초음파나 레이저 거리계의 사용은 불가능하며, 마이크로파 거리계를 사용하는 것이 필수적이다.[1] 대공용 또는 해상용과 같은 장거리의 표적 탐색에는 펄스 레이더가[2], 자동차 충돌방지용 정보장치[3], 마이크로파 거리계[4, 5] 등의 근거리 측정용에는 FM-CW(Frequency-Modulated Continuous-Wave) 방식이 주로 사용된다. FM-CW 레이더는 그 동작 원리는 간단하지만 주파수 변조를 위한 전압제어 발진기(VCO)의 주파수 특성이 시스템에 미치는 영향이 매우 크다는 단점을 갖는다. 즉, 해상도를 높이기

위해서는 VCO의 변조 대역폭이 넓어야 하며, 아울러 출력의 주파수 선형성과 위상잡음은 시스템의 해상도(resolution)와 감도(sensitivity)에 직접적인 영향을 미치게 된다. 선형성이 우수한 VCO는 일반적으로 제작이 어렵고 고가이므로, VCO 출력의 비선형 문제를 해결하기 위한 연구가 꾸준히 이루어지고 있다.[4, 5]

본 논문에서는 40 m 이내의 측정거리를 갖는 마이크로파 거리계의 설계를 목표로 하여, VCO 주파수 비선형성이 시스템에 미치는 영향을 분석하고 VCO 비선형성을 보상할 수 있는 회로를 설계하여 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 제시하였다.

### 2. FM-CW 레이더의 이론

FM-CW 레이더는 시간에 따라 일정한 형태로 캐리어 주파수를 변조시켜서 송신파와 수신파 사이의 주파수를 비교함으로써 거리를 측정한다.[6] 안테나에서 측정 면까지의 거리  $R$ 은 아래 식과 같이 비트 주파수(beat frequency)  $f_b$ 에 비례하게 된다.

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

여기서  $c$ 는 공기중의 광속을,  $f_m$ 은 변조 신호의 주파수를,  $\Delta f$ 는 VCO의 주파수 대역폭을 각각 나타낸다. 그리고 비트주파수  $f_b$ 는 식 2, 3과 같이 송신주파수  $f_{Tx}$ 와 수신 주파수  $f_{Rx}$ 의 차로 계산된다.

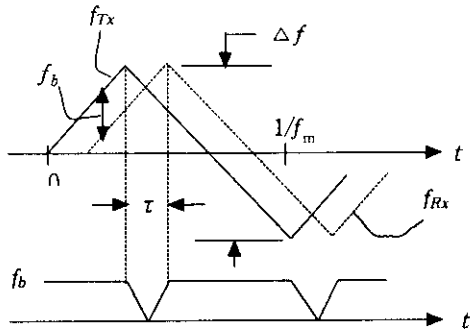


그림 1. FM-CW 레이더의 시간 다이어그램

$$f_b(t) = f_{Tx}(t) - f_{Rx}(t) \tag{2}$$

$$= f_{Tx}(t) - f_{Tx}(t - \tau) \tag{3}$$

$$\tau = \frac{2R}{c} \tag{3}$$

송수신 주파수와 비트 주파수에 대한 시간 다이어그램을 그림 1에 나타내었다.

### 3. VCO 비선형성 효과 분석

본 절에서는 VCO 주파수의 비선형성이 비트 주파수에 미치는 영향을 고찰해 보고자 한다. VCO의 선형도(linearity)는 전압 변화에 대한 주파수 변화의 비직선성 정도를 나타내는 파라미터로서 다음 식과 같이 계산된다.[7]

$$L = \frac{S_{max} - S_{min}}{S_{max} + S_{min}} \cdot 100 \% \tag{4}$$

여기서  $S_{max}$ 과  $S_{min}$ 은 VCO 감도(sensitivity)의 최대값과 최소값을 의미한다.  $L \neq 0$ 인 경우, 비트 주파수는 그림 1과는 달리 일정한 값이 되지 않고, 일반적인 비트 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$s_b(t) = \cos[\phi(t)] \tag{5}$$

$$\phi(t) = 2\pi \int_0^t f_b(t) dt \tag{6}$$

비트신호의 스펙트럼은 식 5를 이산 푸리에 변환(DFT)함으로써 구하여 진다. 측정거리 30 m에 대한

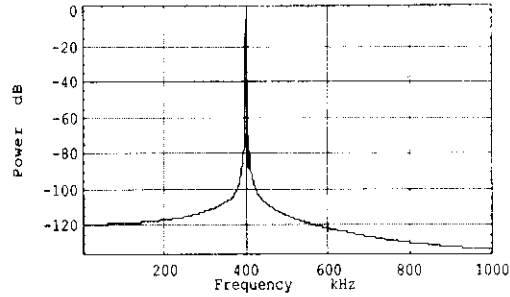


그림 2(a). VCO 선형도가 0%인 경우의 비트신호 스펙트럼

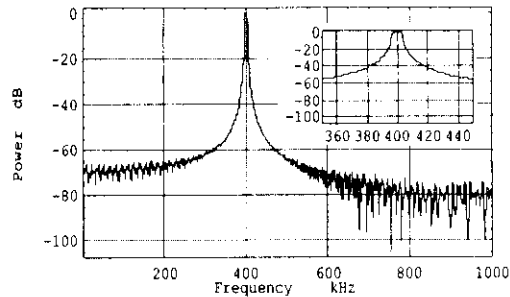


그림 2(b). VCO 선형도가 0.5%인 경우의 비트신호 스펙트럼

비트신호의 스펙트럼을 선형도가 0 %인 경우와 0.5 %인 경우에 대하여 그림 2(a)와 (b)에 각각 도시하였다. 사용된 시스템 파라미터는 주파수 스위프 9-11 GHz ( $\Delta f = 2$  GHz),  $f_m = 500$  Hz 이다. 이 그림에서  $L = 0$  %일 때, 비트 주파수는 400 kHz이며, VCO 선형도가 0.5 %로 커짐에 따라 비트신호의 스펙트럼이 10 kHz 정도 넓어지고, 측엽(side lobe)의 세기가 증가하는 것을 확인할 수 있다.[8]

### 4. 마이크로파 거리계의 설계 및 컴퓨터 시뮬레이션 결과

3절에서 살펴본 바와 같이 VCO의 선형도가 증가하면 레이더의 해상도가 낮아지게 되므로, VCO 비선형성을 극복할 수 있는 시스템 설계가 요구된다. 본 논문에서 제안된 거리계 시스템의 블록 선도를 그림 3에 보였다. 이 설계의 기본 원리는 길이가 알려진 기준 지연선(reference delay line)로부터의 수신 신호를 이용하여 VCO의 주파수 특성을 찾아내어, 원하는 선형성을 갖도록 변조신호를 조절하는 것이다. 그림 3에서 주파수 검출기의 출력을 이산화한 후, 식 2의 관계를 이용하여 푸리에 변환을 취하면, 아래와 같이

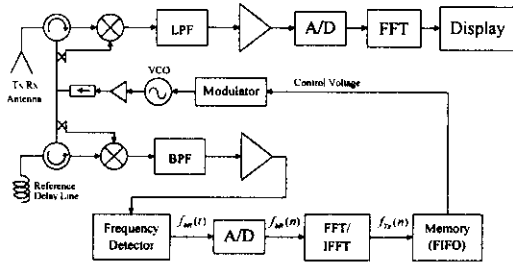


그림 3. VCO 비선형 보상회로를 채택한 마이크로파 거리계의 블록선도

VCO의 주파수 특성을 찾아낼 수 있게 된다.

$$F_{Tx}(k) = \frac{F_{BR}(k)}{1 - e^{-j2\pi n_n k/N}}, k \geq 1 \quad (7 a)$$

$$F_{Tx}(0) = \sum_{n=0}^N f_{Tx}(n) \quad (7 b)$$

$$f_{Tx}(n) = \mathcal{F}^{-1} \{ F_{Tx}(k) \} \quad (8)$$

여기서  $F_{Tx}(k)$ 는  $f_{Tx}(n)$ 의 이산 푸리에 변환을 의미하며,  $F_{BR}(k)$ 와  $n_R$ 는 기준선로에 의한 비트 주파수의 푸리에 변환과 지연시간 내의 표본 개수를 각각 나타낸다.  $N$ 은 전체 표본 개수이며,  $F_{Tx}(0)$ 는 VCO 규격표(data sheet) 또는 이전 단계에서 구한 데이터를 사용하여 계산할 수 있다.

그림 4(a), (b)는 컴퓨터 시뮬레이션을 위하여 가정된 VCO 변조 전압과 특성 곡선(tuning curve)로서, 25%의 선형도를 갖는다. 이 비선형성에 대한 비트 주파수를 그림 5(a), (b)에 도시하였다. DFT의 계산에는 Blackman 윈도우 함수가 사용되었다.[9]

$$w(n) = 0.42 - 0.5 \cos\left(\frac{2\pi n}{N-1}\right) + 0.08 \cos\left(\frac{4\pi n}{N-1}\right), \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad (9)$$

그림 4(b) 곡선은 그림 5(b)의 데이터와 식 7, 8로부터 복원이 가능하며, 미리 입력된 선형 주파수 특성과 비교함으로써 그림 6(a)와 같은 제어 전압 곡선을 도출할 수 있다. 최종적으로 그림 6(b)에 보인 선형 VCO 주파수 특성곡선이 구해진다. 즉, 그림 3의 데이터 처리부에서 그림 6(b)의 제어 전압 곡선을 도출하

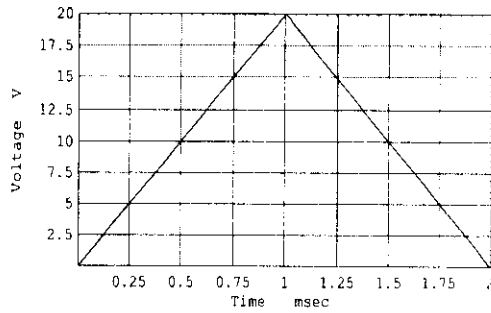


그림 4(a). VCO 변조 전압

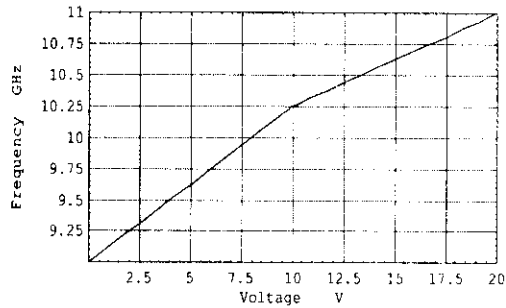


그림 4(b). 선형도가 25%인 VCO 전압-주파수 특성

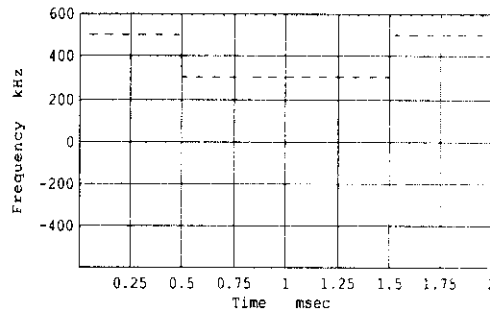


그림 5(a). 시간의 함수로 본 비트 주파수. (VCO 선형도: 25%)

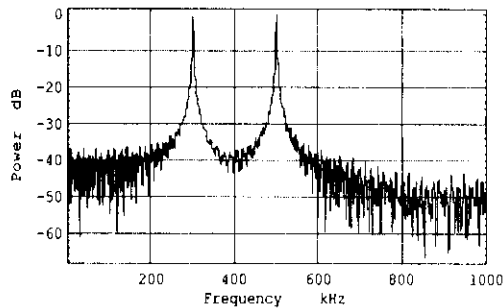


그림 5(b). 비트 신호의 스펙트럼. (VCO 선형도: 25%)

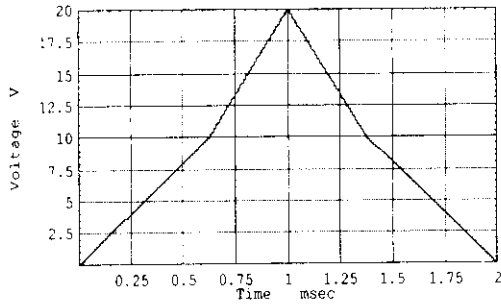


그림 6(a). VCO 선형화를 위한 제어전압 곡선

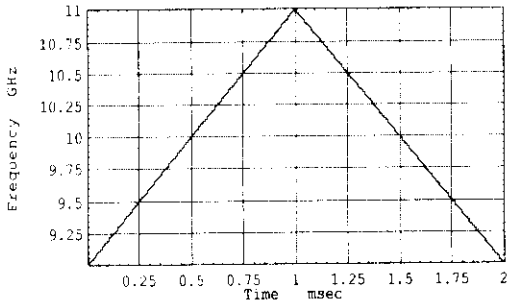


그림 6(b). 그림 (a)의 제어전압 인가로 선형화된 VCO 주파수 특성곡선

고, 이를 메모리에 저장하여 이후의 거리 측정에 VCO 제어 전압으로 사용하는 것이다. 이 교정과정은 초기 전원 인가 시와 운용 환경에 따라 주기적으로 실시하도록 한다.

## 5. 결론

본 논문에서는 FM-CW 레이더의 원리를 이용한 마이크로파 거리계에서 전압제어 발진기(VCO)의 비선형성을 극복할 수 있는 회로 설계이론을 제시하였다. 일정 길이의 기준선로에서 얻어진 비트 주파수의 파형을 이산 푸리에 변환하여 VCO의 주파수 변조 특성을 도출하는 이론적 전개 과정을 보이고, 25%의 선형도를 갖는 VCO를 가정하여, 컴퓨터 시뮬레이션 결과를 보였다. 본 논문에서 제시된 설계이론은 고 정밀도를 요구하는 근거리 측정용의 마이크로파 거리계 설계에 적용 가능하다.

## 참고 문헌

- [1] M. Nowogrodzki, R. Kipp, D. Mawhinnery, "Radar Instruments: Sensors for Industrial Applications," *RCA Engineers*, vol. 27, no. 5, pp. 23-29, Oct. 1982.
- [2] S. A. Hovanessian, *Radar System Design and Analysis*, Artech House, pp. 109-135, 1984.
- [3] W. Schultz, "Traffic and Vehicle Control Using Microwave Sensors," *Sensors*, pp. 34-49, Oct. 1993.
- [4] M. Nalezinski, M. Vossiek, P. Heide, "Novel 24 GHz FMCW Front-End with 2.45 GHz SAW Reference Path for High-Precision Distance Measurements," *1997 IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, pp. 185-188, 1997.
- [5] K. Edvardsson, "Measurement of Contents of Tanks etc. with Microwave Radiations," US Patent 4,044,355, Aug. 1977.
- [6] M. I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, McGraw-Hill, pp. 81-92, 1981.
- [7] E. Holzman, *Solid-State Microwave Power Oscillator Design*, Artech House, pp. 352-353, 1992.
- [8] D. J. Daniels, *Surface-Penetrating Radar*, The Institution of Electrical Engineers, pp. 119-127, 1996.
- [9] A. V. Oppenheim, R. W. Schaffer, *Digital Signal Processing*, Prentice-Hall, pp. 239-250, 1975.