

# 기준 신호를 이용한 FM-CW 레이더의 VCO 비선형성 보정

## VCO Nonlinearity Correction Scheme for a FM-CW Radar using a Reference Signal

박형근\* · 김병욱\*\* · 김영수\*\*

Hyung-Gun Park\* · Byung-Wook Kim\*\* · Young-Soo Kim\*\*

### 요 약

일반적으로 거리 탐지용 레이더로 FM-CW 레이더 방식을 사용한다. 이 경우 FM-CW의 신호원으로 사용되는 전압제어발진기의 제어전압과 출력주파수의 비선형성이 측정결과에 영향을 주게 된다. 최근 비선형성 보정에 대한 신호처리와 하드웨어적인 방법으로 많은 연구가 진행되고 있다. 본 논문에서는 기준 신호를 이용하여 전압제어발진기의 비선형성으로 인해 측정결과에 발생하는 거리 단면의 왜곡을 보정하는 신호처리 기법을 제안하였다. 이에 대한 성능을 검증하기 위해서 간단한 실험을 수행하였고, 결과를 제시하였다. 제안한 기법에 의해 거리 단면 왜곡의 영향 감소와 분해능이 향상됨을 확인할 수 있었다.

### Abstract

When a FM-CW radar is used to measure the target distance, the nonlinearity relationship between the VCO control voltage and the output frequency makes an adverse effect on the measurement accuracy. Recently, many nonlinearity correction schemes using signal processing techniques and dedicated hardwares have been studied. This paper presents a signal processing technique to compensate for the VCO nonlinearity using a reference signal. To demonstrate the validity of the presented technique, several experiments were conducted and the results show reduction of the distortion in the range profile and the resolution improvement.

Key word : FM-CW radar, Beat frequency, VCO nonlinearity.

### I. 서 론

여러 분야에 걸쳐서 정확한 거리 측정용 시스템으로 FM-CW(Frequency Modulated - Continuous

Wave) 레이더가 사용된다. 예를 들자면, 전파고도계와 같이 고도 측정용으로 사용되거나 일정 거리 유지를 위한 차량 충돌 방지용으로도 사용이 된다. 또한, 제철소 용광로의 쇳물 높이 또는 기름 탱크 내의 기름 높이를 알아내는 용도 등으로 사용될

「본 연구는 국방과학연구소와 LG정밀(주)의 연구비 지원으로 수행되었습니다.」

\* 한국전자통신연구원(Electronics and Telecommunications Research Institute: ETRI)

\*\* 포항공과대학교 전자전기공학과 전자파특화연구센터(Microwave Application Research Center, Dept. of EE., POSTECH(Pohang University of Science and Technology))

· 논문 번호 : 990806-062

· 수정완료일자 : 1999년 9월 22일

수 있다<sup>[1]~[3]</sup>. FM-CW 레이더 방식을 이용하여 거리 측정을 할 경우, 주파수 변조한 송신신호와 목표물까지 전파된 후 되돌아오는 신호의 시간 지연으로 인한 차주파수(Beat Frequency)로부터 거리 정보를 얻는다. 이러한 경우, 응용 분야에 따라서 요구되는 정밀도의 차이가 있겠지만, 거리 측정에 있어서 높은 정밀도가 요구될수록 변조주파수의 대역폭이 증가하게 된다<sup>[2]</sup>. 하지만 변조주파수의 대역폭이 늘어날 경우에는 일반적인 전압제어 발진기의 특성 상 제어전압에 대해 출력주파수가 선형적으로 변하지 않아 측정 결과에 왜곡을 주게 되고, 측정의 정밀도를 떨어트리게 된다. 이렇게 되면 FFT를 이용하여 거리 정보를 얻고자 할 경우, 차주파수 성분이 한 곳에 집중되지 못하고 주파수 성분이 퍼지는 현상을 보이게 되어 정확한 거리 정보를 얻지 못하게 된다. 이러한 문제에 대한 보정 방법으로 직접 하드웨어를 사용하여 전압제어 발진기의 비선형성을 개선하거나 측정결과에 신호 처리 기법을 적용하여 비선형성으로 인한 오차를 제거하는 기법들이 연구되고 있다<sup>[4],[5]</sup>. 본 논문에서는 전압제어발진기의 제어전압의 파형을 변형하여 주파수 변조를 하는 간단한 하드웨어적인 보정

과 기준 지연선을 이용한 기준 신호를 측정결과에 적용하는 신호처리 기법을 이용하여 비선형성으로 인한 거리 단면에서의 왜곡 감소와 분해능의 향상을 보였다.

## II. 전압제어발진기의 비선형성으로 인한 오차

일반적인 Linear FM-CW 레이더의 주파수와 시간의 관계는 그림 1과 같다.

그림 1에서는 전압제어발진기의 출력주파수가 제어전압에 대해 선형적으로 변조될 경우의 결과이다. 즉, 전압제어발진기의 출력 주파수가 제어전압에 대해서 선형적으로 변조되면, 송수신신호 사이의 차주파수는 목표물까지의 시간 지연에 비례한 단일 주파수 성분이 된다. 이러한 Linear FM-CW 레이더의 거리와 차주파수와의 관계식은 다음과 같다.

$$f_B(\text{Beat Frequency}) = \frac{\Delta F}{T} \cdot \frac{2R}{c} \quad (1)$$

$$\therefore R = \frac{cf_B}{2} \cdot \frac{T}{\Delta F} \quad (2)$$

$c$ : velocity of light [m/s],  $R$ : range [m],

$\Delta F$ : sweep band( $F2 - F1$ ),

$T$ : sweep time

그리고 차주파수신호로부터 얻은 측정 데이터를 FFT 기법을 이용하여 거리 정보를 얻을 경우, 주파수 영역에서 분해능은 시간 영역에서의 신호의 Sweep 주기의 역수에 비례한다. 즉,

$$\delta f_B = 1/T \quad (3)$$

와 같고, 이에 의한 거리 분해능은 식 (2)로부터 다음과 같이 유도된다.

$$\delta R = \frac{c \delta f_B}{2} \cdot \frac{T}{\Delta F} = \frac{c}{2\Delta F} \quad (4)$$

식 (4)에서 보듯이 거리 분해능은 Sweep하는 주

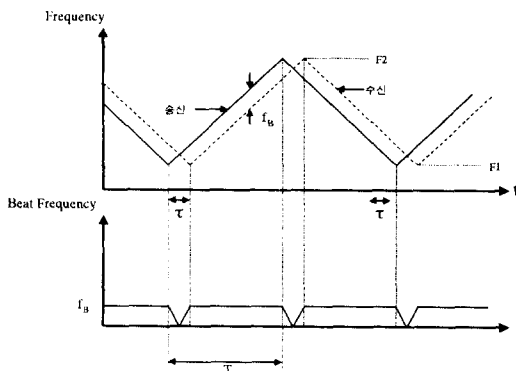


그림 1. 일반적인 FM-CW 레이더의 주파수와 시간의 관계

Fig. 1. Relationship between the frequency and time delay.

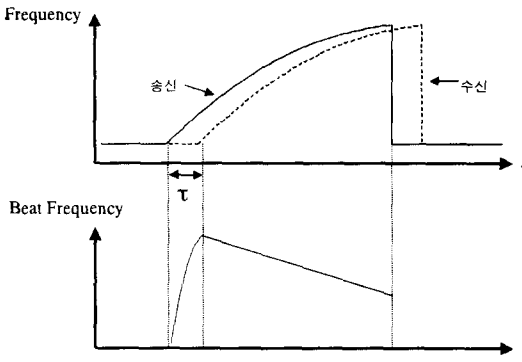


그림 2. 전압제어발진기의 비선형성으로 인한 차주파수의 왜곡

Fig. 2. Distortion of the beat frequency due to the VCO nonlinearity.

파수 대역폭에 반비례함을 알 수 있다. 따라서 정확한 거리 정보와 세밀한 분해능을 얻기 위해서는 Sweep하는 주파수 대역폭을 넓게 해야 한다. 하지만 일반적인 전압제어발진기의 경우 Sweep하고자 하는 주파수 대역폭이 넓어지면 출력주파수가 제어전압에 선형적인 비례 관계를 나타내지 못하고 제어전압이 증가할수록 선형적인 증가에서 조금씩 떨어지는 값의 주파수가 출력된다. 따라서 이로 인해 그림 2와 같이 주파수 변조 주기 내에서 일정한 차주파수를 유지하지 못하고 시간이 지남에 따라 차주파수가 감소하는 현상을 보이게 된다. 이는 주파수 영역에서 차주파수가 한 주파수에 집중되지 못하고 넓게 퍼지게 하고, 이에 상응하는 거리 정보 역시 정확한 한 지점으로 집중되지 못하고 여러개의 목표물로 보이거나 분해능이 떨어지게 된다.

### Ⅲ. 전압제어발진기의 비선형성 보정

II장에서 제시한 전압제어발진기의 비선형성 오차로 인한 거리 정보의 왜곡과 분해능의 저하 현상을 해결하기 위해서 본 논문에서는 간단한 하드웨어적인 보정과 기준 신호를 측정 결과에 적용하는 신호 처리 기법을 구현하였다. 하드웨어적인 보정은 기존

에 이미 많이 언급된 것으로, 전압제어발진기의 비선형성을 제어전압에 대해서 측정하고 선형적인 경우와 비교하여 그 오차를 계산한 뒤 미리 제어전압에 그 오차를 적용하여 발진기의 출력 주파수가 제어전압에 대해서 선형적으로 변조되도록 하였다. 하지만 이 방법은 매번 거리 측정시마다 적용되는 것이 아니라 비선형성을 측정하는 당시의 상황에 의존한 측정결과를 거리 측정에 적용하는 것이기 때문에 실험환경에 의존하여 변할 수 있는 비선형성의 성분은 보정하지 못하는 단점이 있다. 그러나 보정하지 않은 경우에 비하여 대체적인 비선형성의 오차는 보정할 수 있기 때문에 쉽게 적용할 수 있는 방법이다. 이상적인 경우, 전압제어발진기의 출력주파수가 제어전압에 선형적으로 비례한다면, 출력주파수는 다음과 같은 관계식이 성립한다.

$$F_i(v(t)) = \frac{\Delta F}{\Delta V} \cdot (v(t) - V_1) + F_1 \quad (5)$$

여기서  $\Delta F$ 는 Sweep하고자 하는 변조주파수 대역이고  $\Delta V$ 는 변조주파수 대역에 상응하는 전압의 범위를 나타내며,  $V_1$ 은 전압제어발진기의 Sweep을 시작하는 제어전압이다. 그리고  $v(t)$ 는 시간에 대해 선형적인 증가를 하는 제어전압이다. 그림 2와 같이 출력주파수의 비선형성적인  $F_n(t)$ 증가를 라고 하고, 이것과 선형적인 출력주파수와 차를 제어전압의 변화로 환산한 제어전압을  $e(t)$ 라고 하면, 이상적인 경우에 고려해야 하는 제어전압의 오차는 다음과 같이 주어진다.

$$e(t) = \frac{\Delta V}{\Delta F} \cdot (F_n(v(t)) - F_i(v(t))) \quad (6)$$

식 (6)의 오차를 이상적인 제어전압에서 빼면 비선형성을 보상하는 제어전압 파형이 된다. 이렇게 구한 제어전압의 파형은 그림 3의 실선과 같이 된다. 본 논문에서는 제어전압에 대한 출력주파수의 변화를 스펙트럼 분석기를 통해서 제어전압 변화에 대한 출력 주파수의 변화 데이터를 얻은 뒤, 식 (6)

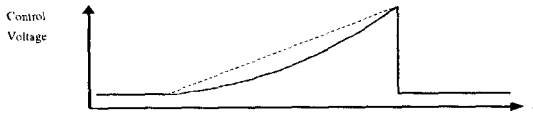


그림 3. 전압제어발진기의 비선형성을 보정하기 위한 제어전압(점선: 이상적인 경우, 실선: 보정을 한 경우)

Fig. 3. Control voltage to correct the VCO non-linearity(dashed line: ideal case, solid line: corrected case).

과 같이 계산한 제어전압에 대한 출력주파수의 비선형성 오차를 보정한 제어전압 파형을 임의신호발생기(Arbitrary Waveform Generator)를 이용하여 전압제어발진기의 제어전압으로 공급하였다. 그림 2와 같은 비선형성을 보정하기 위해 제어전압의 파형을 그림 3의 실선과 같이하여 전압제어발진기의 제어전압으로 공급한다.

그림 3과 같은 방법으로 전압제어발진기의 제어전압을 공급하고, 측정한 데이터로부터 거리 정보를 얻기 위해 기준 신호를 이용하여 분해능을 향상시켰다. 그림 4는 본 논문에서 제안하고자 하는 신호처리 기법을 적용하기 위한 FM-CW 레이더 시스템의 기본적인 블록다이어그램을 나타낸다.

그림 4의 SPDT(Single Pole Double Through)는 기준 신호를 얻기 위한 Calibration 모드와 실제 측정 모드를 선택하기 위해 사용한다. 정확하게 하자면 기준 신호에 의한 차주파수 신호를 별도로 얻기 위한 루프를 형성해야 하지만 기본적인 개념은 같기 때문에 기준 신호는 실제 측정마다 주기적으로 측정하여 전압제어발진기의 비선형성을 보정한다. 기준 지연선을 이용한 기준 신호는 다음과 같이 주어진다.

$$\gamma_{ref}(t) = a(t) - a(t - \tau_{ref}) \quad (7)$$

여기서  $a$ 는 전압제어발진기의 출력주파수를 나타내고,  $\tau_{ref}$ 는 기준 지연선에 의한 시간 지연을 나타낸다. 이때 기준 지연선에 의한 시간 지연이 전체

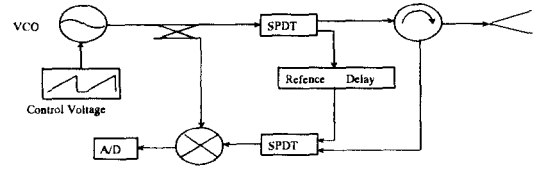


그림 4. FM-CW 레이더 블록다이어그램

Fig. 4. Block diagram of a FM-CW radar.

제어전압의 Sweep 시간보다 매우 짧다면 기준 지연선에 의한 차주파수는 다음과 같이 근사화 할 수 있다.

$$\gamma_{ref}(t) = a'(t) \tau_{ref} \quad (8)$$

여기서  $a'$ 는  $a$ 의 시간에 대한 미분을 나타낸다. 같은 방법으로 각각의 거리  $R$ 만큼 떨어진 목표물에 대한 시간 지연( $\tau = 2R/c$ )으로부터의 차주파수는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \gamma(t) &= a(t) - a(t - \tau) \cong a'(t) \tau \\ &= \frac{\tau}{\tau_{ref}} \gamma_{ref}(t) \end{aligned} \quad (9)$$

따라서 실제 측정한 기준 신호와 목표물로부터의 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V_{ref}(t) = \exp[j2\pi\gamma_{ref}(t)t] \quad (10)$$

$$\begin{aligned} V(t) &= \sum_i A_i \exp[j2\pi\gamma_i(t)t], \gamma_i(t) \\ &= \frac{\tau_i}{\tau_{ref}} \gamma_{ref}(t) \end{aligned} \quad (11)$$

위의 식 (11)에서  $\gamma_i$ 는  $i$ 번째 목표물로부터의 전압제어발진기의 비선형성을 포함한 차주파수를 나타낸다. 따라서 측정된 결과에 FFT를 취하여 스펙트럼을 관찰하면, 정확한 하나의 값에 집중되지 못하고 스펙트럼이 퍼지게 되고 이렇게 얻은 스펙트럼을 거리 단면의 단위에 맞게 대응시켜 보면 목표물의 정확한 거리를 얻지 못할 뿐더러 분해능까지도 떨어지게 된다. 이런 문제를 해결하기 위해 기준 지

연선에 의한 기준 신호를 이용하여 위상 보정 함수를 만들어 측정 결과를 보정하고 정확한 거리 정보를 얻는다. 측정된 데이터에 적용할 기준 신호로부터의 위상보정 함수는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}\phi(t, \tau) &= \exp[-j2\pi\gamma(t)t] \\ &= \exp\left[-j2\pi\frac{\tau}{\tau_{ref}}\gamma_{ref}(t)t\right] \\ &= [V_{ref}^*(t)]^{\frac{\tau}{\tau_{ref}}}\end{aligned}\quad (12)$$

목표물의 거리와 기준 지연선과의 비에 비례하여 기준 지연선에 의한 비선형성으로 인한 위상의 변화들이 측정결과에 나타난다고 보고 거리에 따른 위상 보정 함수를 만든다. 이렇게 얻어진 위상보정 함수를 실제 측정된 데이터에 각각의 거리마다 상관 관계 기법을 적용하여 전압제어발진기의 비선형성으로 인한 거리 측정의 오차를 제거한다. 이러한 방법에 의해 거리 정보를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$R(\tau) = \int V(t)\phi(t, \tau)W(t)dt \quad (13)$$

식 (13)에서  $W$ 는 FFT를 적용할 때 부엽레벨을 줄이기 위한 윈도우 함수이다.

#### IV. 실험결과 및 제안한 기법의 검증

제안한 기법의 검증을 위하여 표 1과 같은 조건 하에서 실험을 하였다.

표 1과 같은 환경에서 전압제어발진기의 비선형성 오차를 포함한 기준 지연선을 통한 차주파수 신호는 그림 5와 같다.

그림 5에서 보듯이 기준 신호는 전압제어발진기의 비선형성에 의한 차주파수 신호의 시간의 변화에 대한 주파수의 감소 변화를 확실히 보여준다. 그리고 제시한 파형의 크기가 변하는 것은 구현한 레이더 시스템의 주파수 응답이 평탄하지 못해서 발생하는 것으로 주로 증폭기의 특성으로 인해 직류성분이

표 1. 실험 요소

Table 1. Experimental parameters.

VCO	Magnum Microwave V111T-1
Control Voltage	0~3 V
Sweep Bandwidth	760 MHz(8.41 GHz~9.17 GHz)
Sweep Time	1 ms
Target Range	5.53 m(Trihedral reflector), 7.77 m(Wall)

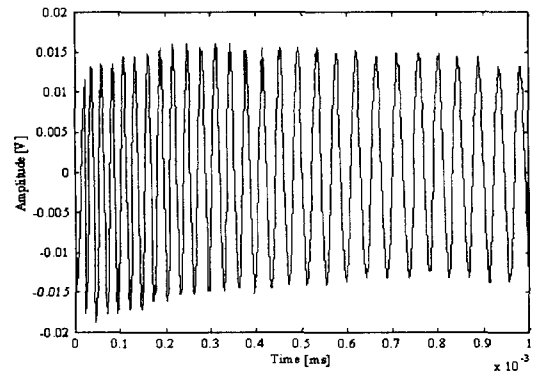
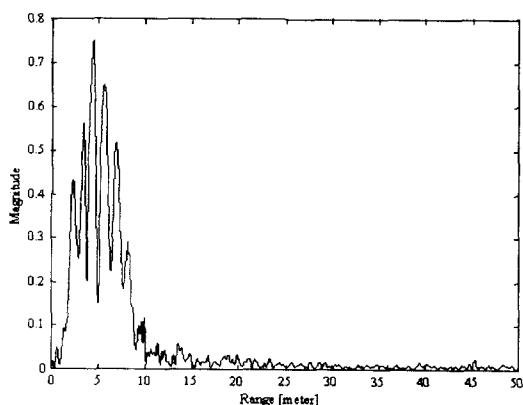


그림 5. 기준 지연선에 의한 차주파수 신호

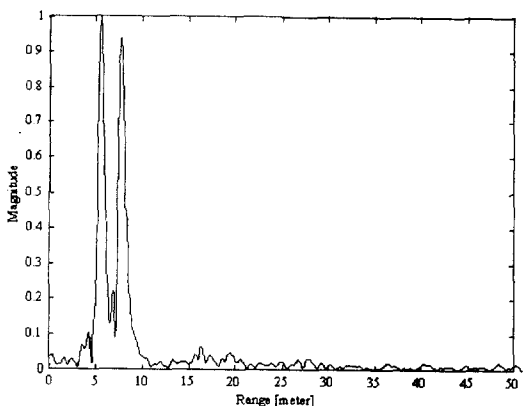
Fig. 5. Beat frequency by a reference delay line.

차주파수 신호에 같이 나타난다. 먼저 하드웨어적인 제어전압의 보정을 통한 거리 단면의 향상을 살펴보면, 그림 2와 같은 비선형성을 실제 측정하여 그림 3의 점선과 같은 이상적인 선형 관계와 그림 2에서와 같은 실제 측정된 출력주파수간의 오차를 제어전압으로 환산하여 제어전압에 오차만큼 변화를 주어 그림 3의 실선과 같은 파형을 임의신호발생기를 사용하여 전압제어발진기의 제어전압으로 공급하면, 쉽게 비선형성을 보정할 수 있다. 하지만 이 방법은 앞서도 언급하였지만 한번의 측정으로 보정이 끝나는 것으로 온도와 같은 실험 환경의 변화에 의해 영향을 받을 수 있는 문제점이 있다. 이렇게 비선형성을 보정하여 얻은 거리 단면을 그림 6에서 제시하였다.

그림 6의 결과에서 보듯이 발진기의 비선형성 오



(a)



(b)

그림 6. 그림 3의 실선과 같은 제어전압으로 비선형성을 보정한 거리 단면. (a) 보상 전, (b) 보상 후

Fig. 6. Corrected range profile using the solid line of Fig. 3 for a control voltage. (a) Before correction, (b) After correction.

차만큼 제어전압을 보정한 결과, 보정을 하기 전과 비교하여 거리 단면에서 정확한 목표물의 거리와 향상된 거리 분해능을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 그리고 본 논문에서 제안한 신호처리 기법을 적용하기 위해, 그림 5와 같이 얻어진 기준 지연선에 의한 차주파수 신호를 이용하여 식 (12)와 같은 위상보정 함수를 구하여 전압제어발진기의 비선형성 오차를 포함한 측정 데이터를 보정한다. 보정 후의 거리 단

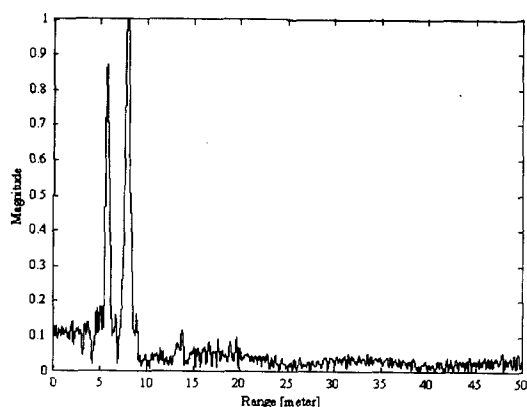


그림 7. 기준 신호를 이용하여 보정한 거리 단면

Fig. 7. Corrected range profile using a reference signal.

면을 그림 7에서 제시하였다.

그림 7에서 보듯이 기준 신호를 사용하여 보정을 하기 전과 후의 결과에서 거리 단면이 향상된 결과를 보임을 알 수 있다. 그리고 그림 6의 결과와 비교에서도 그림 7의 결과가 거리 단면 주엽이 좁게 나온 것으로 보아 거리 단면의 분해능이 향상된 결과를 보여준다.

## V. 결 론

본 논문에서는 전압제어발진기의 비선형성으로 인한 거리 단면의 왜곡과 분해능의 저하를 해결하기 위한 기법을 제안하였다. 먼저 간단한 하드웨어적인 보정 방법을 이용하여 비선형성을 보정하였다. 선형적인 출력주파수의 증가와 비교하여 출력주파수의 오차만큼 미리 제어전압을 보정하여 전압제어발진기를 Sweep 하므로써 비선형성을 보정하였다. 그리고 신호처리적인 방법으로 기준 지연선을 통하여 얻은 기준 신호를 사용하여 보정하도록 하였다. 기준 신호로부터 각 거리마다 위상보정 함수를 결정하여 측정된 데이터에 상관 관계 기법 적용으로 비선형성에 의한 오차를 보정하도록 하였다. 제안한 기법의 검증에 위하여 두 개의 목표물에 대해서 거리 정보를 얻기 위한 실험을 수행하였다. 실험을 통해서 얻

은 데이터에 제안한 기법을 적용하기 전과 후의 결과를 그림 6(a)와 그림 7에서 제시하였고, 그 결과 거리 단면이 향상되는 결과를 보여주고, 제안한 기법의 타당성을 입증해준다. 그리고 본 논문의 제어 전압 보정으로 비선형성에 의한 영향을 줄인 방법은 아주 간단한 하드웨어적인 방법이고 실제 하드웨어를 이용한 전압제어발진기의 보정은 비용이 많이 요구되는 것으로, 본 논문에서 제안한 기법과 같은 신호처리 기법으로 비선형성을 보정할 경우 하드웨어적인 방법을 사용하는 것보다 경제적이고 좀 더 쉽게 구현할 수 있다.

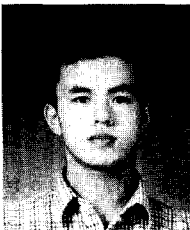
### 참 고 문 헌

- [1] M. I Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, 2nd Edition, McGraw-Hill, pp. 81-91, 1980.
- [2] A. G. Stove, "Obstacle detection radar for

car", *Electronics & Communication Engineering Journal*, vol. 3, no. 5, pp. 232-240, October, 1991.

- [3] H. D. Griffiths, "New ideas in FM radar", *Electronics & Communication Engineering Journal*, vol. 2, no. 5, pp. 185-194, October, 1990.
- [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", *IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, pp. 189-188, Denver, USA, 1997.
- [5] M. Vossiek, T. V. Kerssenbrock, P. Heide, "Novel nonlinear FMCW radar for precise distance and velocity measurements", *IEEE MTT-S International Microwave Symposium*, pp. 511-514, Denver, USA, 1998.

### 박 형 근



1995년: 연세대학교 전기공학과(공학사)  
 1997년: 포항공과대학교 전자전기 공학과(공학석사)  
 1997년~1999년: 전자파특화연구센터 위촉 연구원  
 1999년~현재: 전자통신연구소 연

구원

[주 관심분야] 레이더 시스템 및 신호처리

### 김 영 수



1974년: 서울대학교 전자공학과(공학사)  
 1980년: University of Kansas 전자공학(공학석사)  
 1984년: University of Kansas 전자공학(공학박사)  
 1974년~1977년: 국방과학연구소 연

구원

1978년~1983년: Remote Sensing Laboratory, Univ. of Kansas 연구원

1983년~1987년: Florida Atlantic University 조교수

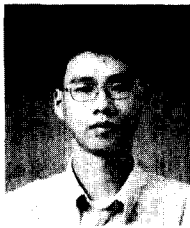
1988년~1994년: 포항 방사광 가속기 저장링 개발 단장

1987년~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 부교수, 교수

1995년~현재: MARC(국방부 및 국방과학연구소 지정 전자파특화연구센터) 원격탐사 연구실 실장

[주 관심분야] 레이더 시스템, 원격탐사, SAR, EMI/EMC

### 김 병 욱



1997년: 경북대학교 전자공학과(공학사)  
 1999년: 포항공과대학교 전자전기 공학과(공학석사)  
 1997년~현재: 전자파특화연구센터 연구원  
 1999년~현재: 포항공과대학교 전

자전기공학과 박사과정

[주 관심분야] 레이더 시스템, 원격탐사, SAR, 마이크로 웨이브 필터