

# 차량 충돌방지용 FMCW 레이더의 주파수 Sweep 선형성 개선을 위한 간단한 기법

## Simple Method for Improving the Frequency Sweep Linearity of FMCW Collision Warning Radar

현 유 진 · 오 우 진\* · 이 종 훈

Eugin Hyun · Woojin Oh\* · Jong-Hun Lee

### 요 약

차량용 FMCW(Frequency Modulation Continuous Wave) 레이더는 선형적인 주파수 변조 방식을 이용하여 장애물의 거리와 속도를 구하는 시스템이다. 정확한 거리 및 속도 측정을 위해서 77 GHz 대역에서 300 MHz 이상의 광대역 주파수 선형성이 보장되는 RF부가 요구되고 있다. 본 연구에서는 VCO를 사용하는 FMCW 시스템에 적합한 선형성 개선을 위한 간단한 방법을 제안하고 있다. 제안된 방법은 FMCW 레이더 송신 파형을 변형하여 VCO의 전압 대 주파수 특성을 측정하고, 이를 LUT(Look-Up Table)로 보상하는 방식이다. 이 방식은 추가적인 회로 없이 기존의 FMCW 레이더에 그대로 적용이 가능한 장점이 있다.

### Abstract

FMCW(Frequency Modulation Continuous Wave) Radar can detect the distance and the velocity of forward obstacles using linearly modulated FM signal. For better performance, the RF of radar should be operated with wideband frequency linearity on 300 MHz bandwidth at 77 GHz carrier frequency. In this paper, we propose a simple method for improving frequency linearity of FMCW radar implemented with VCO. The proposed method shows that the Voltage-Frequency relation of VCO could be measured by using the modified Tx waveform of FMCW radar. Then the measured nonlinearity could be compensated using LUT(Look-up Table) with easy. It is noted that the proposed can be adopted in existing system without extra circuit.

Key words : FMCW Radar, Collision Warning System, VCO, Nonlinearity

### I. 서 론

전방 차량 충돌 방지를 위한 FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave) 레이더는 77 GHz 대역의 초고주파를 사용하여 외부 환경의 영향이 적고 구현이 간단한 장점이 있어 많은 연구가 진행되어 왔다. 최근에는 이를 상용화한 ACC(Adaptive Cruise

Control)가 고가 차량에 장착되어 판매되고 있다<sup>[1]-[4]</sup>.

FMCW 레이더는 선형 FM 변조를 사용하여 거리에 따른 지연 시간으로부터 주파수 차를 측정하는 방식이다. 따라서 그 성능은 RF단의 광대역 주파수 선형에 의존하게 된다. 선형성을 개선하기 위한 많은 연구가 고 해상도 FMCW SAR(Synthetic Aperture Radar)에서 진행되어 왔었다. VCO(Voltage Controlled

「본 논문은 교육과학기술부 2010년 중점연구과제의 연구 결과입니다.」

대구경북과학기술원 미래산업융합기술연구부(Division of Advanced Industrial Science & Technology, DGIST)

\*금오공과대학교 전자공학부(Dept. of Electronic Engineering, Kumoh National Institute of Technology)

· 논문 번호 : 20100531-071

· 교신저자 : 오우진(e-mail : wjoh@kumoh.ac.kr)

· 수정완료일자 : 2010년 9월 30일

Oscillator) 및 주파수 혼합기 등에 의한 비 선형성을 보상하기 위해 PLL(Phase Locked Loop)을 적용하거나, 위상보정용 케환 회로를 갖는 MMIC(Monolithic Microwave IC)로 설계하는 방안에 대하여 제안되고 있다<sup>[5],[6]</sup>. 그러나 이러한 방법은 부가 회로에 따라 복잡도가 증가하거나 특수 공정을 통한 제조 방식으로 가격이 상승이 예상된다.

선형성을 위한 간단한 방법으로 송신단과 수신단을 지연 회로로 연결하여 비선형성을 측정하고 보상하는 방식이 있다<sup>[7]</sup>. 이는 77 GHz 스위치, 커플러 등과 같은 추가 회로가 필요한 단점이 있다. 본 논문에서는 차량용으로 적합하도록 가격과 생산성을 고려하여 상용 VCO에 적합한 선형화 기법에 대하여 제안하고자 한다. 제안된 방법에서는 기존 시스템의 하드웨어 변경 없이 송신 파형만으로 비선형성을 측정할 수 있음을 보였다. 측정된 결과에 의해 송신 신호를 사전 보상하는 LUT(Look-Up Table)를 사용하여 선형성을 개선하게 된다. 이 방식은 VCO의 특성이 단조 증가 또는 감소로 나타날 경우 적용이 가능하므로 대부분의 상용 VCO에 적용이 가능한 장점이 있다.

본 논문의 구성은 II장에서 FMCW 레이더의 동작 원리를 간단히 살펴보고, III장에서 제안된 선형화 방법에 대하여 설명한다. IV장에서는 제안된 방법을 적용한 시험 결과를 비교하였다.

## II. FMCW 레이더 개요

FMCW 레이더의 기본 구조는 그림 1과 같다. 송신 신호는 시간에 따라 주파수가 선형적으로 상승 또는 하강하는 FM 신호이다. 장애물에 반사된 수신 신호는 송신 신호와 주파수 혼합되어 차 주파수 성

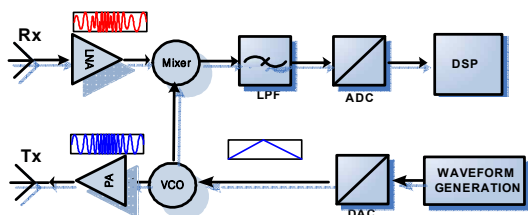


그림 1. FMCW 레이더 블록도  
Fig. 1. Block diagram of FMCW radar.

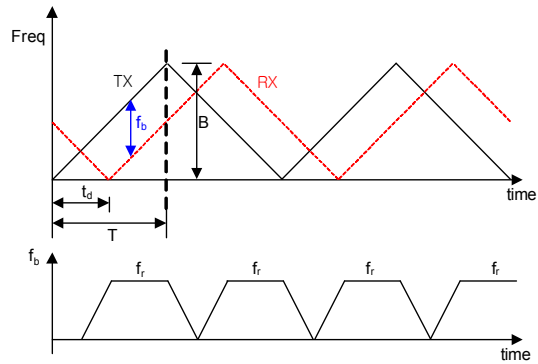


그림 2. 전형적인 FMCW 송수신 파형  
Fig. 2. Typical waveform of FMCW.

분으로 변환된다. 이 주파수 차를 비트 주파수( $f_b$ : Beat Frequency)라 하며, 장애물과 이격 거리에 따라 달라진다.

송신 신호가 그림 2와 같이 선형적으로 주파수가 변화된다면 비트 주파수  $f_b$ 로부터 지연 시간  $t_d$ 를 추정하여 거리를 구하게 된다. 장애물과 상대 속도가 0이고, 변조 대역폭( $B$ ) 내에서 상승 구간( $T$ )인 경우  $f_b$ 와 거리  $R$ 은 다음과 같이 표현된다<sup>[8]</sup>.

$$f_b = \frac{t_d B}{T}, \quad R = \frac{c T f_b}{2B} \tag{1}$$

여기서  $c$ 는 광속이다. 상대 속도가 0이 아닌 경우에는 도플러 효과에 의한 주파수 편이  $f_d$ 도 구할 수 있다. 거리에 의한 주파수 성분을  $f_r$ , 도플러에 의한 주파수 성분을  $f_d$ 라 하면 상승 구간의 비트 주파수  $f_{b,up}$ 과 하강 구간의 비트 주파수  $f_{b,down}$ 는 다음

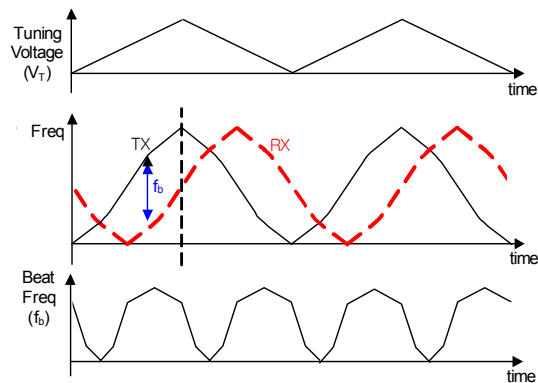


그림 3. 비선형성의 영향  
Fig. 3. Effect of nonlinearity.

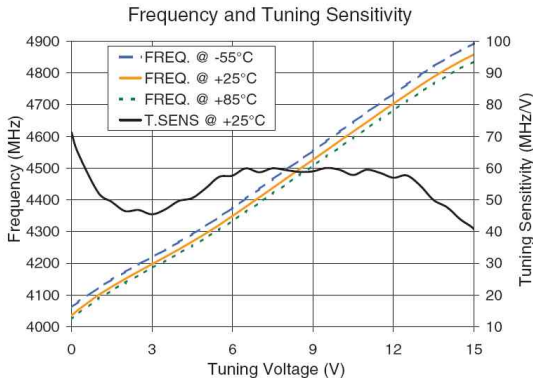


그림 4. 상용 VCO의 선형성 예(Mini-Circuit사의 ROS-4650-111+)

Fig. 4. Example of commercial VCO linearity(ROS-4650-111+ of Mini-Circuit).

의 관계를 갖는다.

$$f_r = \frac{f_{b,down} + f_{b,up}}{2}, \quad f_d = \frac{f_{b,down} - f_{b,up}}{2}$$

지금까지 살펴본 바와 같이 FMCW 레이더는 시간에 따라 선형적으로 주파수 변하는 송신 신호로부터 거리와 속도를 구하는 것이다. 만약 주파수 비선형성이 그림 3과 같이 존재하는 경우에는 식 (1)의  $f_b$ 로부터 거리를 정확히 구할 수 없게 된다. 선형 튜닝 전압  $V_T$ 를 인가하였지만 RF부의 주파수 비선형성으로 인하여 송신되는 sweep 신호가 왜곡될 것이다. 따라서 검출된 비트 주파수가 단일 타겟만 있는 경우에도 여러 비트 주파수로 검출될 수 있다.

차량용 FMCW 레이더는 속도에 의한 도플러 주파수 편이가 크고 직진성이 좋은 24 GHz와 77 GHz가 많이 사용되고 있다. 대역폭  $B$ 와 sweep 시간  $T$ 는 거리 및 속도 해상도와 갠신 속도를 고려하여 각각 500 MHz 내외, 10 ms 이하로 설정하고 있다<sup>[8],[9]</sup>. 이러한 경우 식 (1)에 의해  $f_b$ 는 2 MHz 이하로 나타나게 된다.

FMCW 레이더의 RF부는 77 GHz 대역의 VCO로 직접 구현하거나, 수 GHz 대역의 VCO와 다이오드를 결합한 체배 방식이 사용되기도 한다. VCO의 tuning sensitivity가 일정하지 않은 경우 출력 주파수가 비선형적으로 변하게 되며, 체배 방식에서는 그 영향이 더욱 확대될 것이다. 그림 3에 mini-circuit사의 기관 실장형 VCO의 특성 곡선을 예로써 보였다.

튜닝 전압에 따라 주파수가 비교적 선형이지만 비트 주파수가 수백 KHz 대인 것을 감안하면, sensitivity의 변화 및 온도에 특성 변화가 많은 영향을 미치게 될 것이다.

### III. VCO 선형화 기법

RF부의 비 선형성을 측정을 얻기 위해서는 그림 1의 파형 발생기에서 만들어진 신호를 지연선을 이용하여 수신하거나 계측기를 이용하여 구할 수 있다<sup>[5]~[8]</sup>. 차량용 FMCW 레이더는 차량에 장착되어 넓은 온도 범위에서 동작해야 하므로 계측기로 측정하는 선형화 하는 방식은 사용하기 어렵다. 지연선을 이용한 방법은 RF 신호 전환, 지연선 bypass 회로 등이 요구되어 시스템의 복잡도가 증가하게 된다.

본 논문에서는 추가회로 없이 FMCW 레이더의 동작원리를 분석하여 RF부의 주파수 비 선형성을 측정하는 방법을 제안한다.

제안된 방식은 그림 5(a)처럼 송신 파형 주기  $T$  동안  $M$ 개의 표본점에서  $\Delta t$ 의 간격에 대한 주파수 차를 구하여 선형성을 측정하는 것이다. 참고문헌 [7]

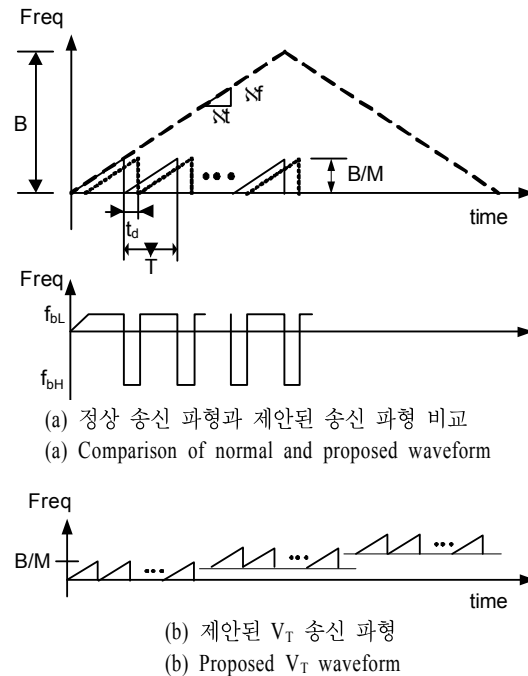


그림 5. 비선형성 보상을 위한 송신 파형

Fig. 5. Tx waveform for nonlinearity compensation.

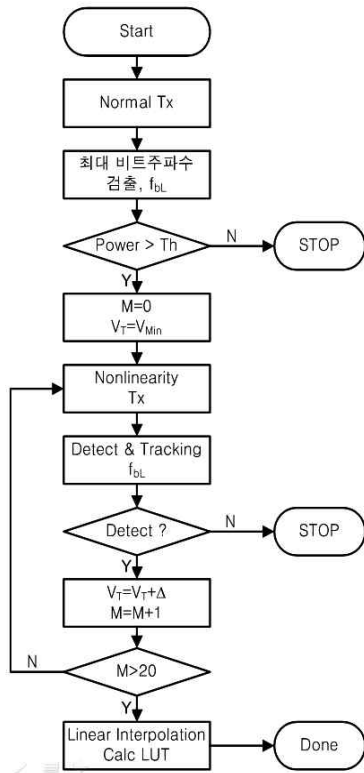


그림 6. 제안된 측정 절차  
Fig. 6. The proposed measurement procedure.

과 다른 점은  $\Delta t$ 의 간격이 지연선 등으로 bypass된 것이 아닌 전방의 장애물로부터 반사된 신호를 활용하는 것이다. 제안된 송신 파형은 광대역 B에서 sweep하는 정상 상태와 달리 대역폭을 M개로 나누는 협대역 B/M의 파형이며, 수신 신호는  $t_d$ 만큼 지연된 점선과 같은 형태로 나타날 것이다. 이 시간차는  $t_d$ 가 되어 송신 파형 주기 T에 비하여 상당히 작은 값이므로 이를 구간 선형(piecewise-linear)으로 근사화할 수 있다. 다만 시간차  $t_d$ 에 의해 검출된 비트 주파수는 절대치로 검출되므로 단조 증가 또는 단조 감소 형태의 비선형 특성일 때만 사용이 가능하다.

또한, 송신 파형이 삼각파 대신에 톱니파 모양이기 때문에 수신된 비트 주파수는 두 종류가 나타난다. 이때 거리에 의한 비트 주파수를  $f_{bL}$ 이라 하고, 톱니파를 사용함으로써 나타나는 비트 주파수를  $f_{bH}$ 라 하자. 여기서  $f_{bL}$ 은  $t_d < 2$  us이므로 식 (1)에 의해 통상 2 MHz 이내의 값을 갖는다.  $f_{bH}$ 는 B/M만큼의 주파수 변위가 그대로 나타나므로, B=500 MHz, M=20

이라 하면 25 MHz의 아주 높은 값이 된다. 따라서 이는 적절한 M을 선택한 경우 필터로 제거가 가능하다.

그러나 M이 큰 경우에는  $f_{bH}$ 가 낮아져 기존의 LPF로 제거되지 않을 수 있으므로 이를 구분하기 위한 방안을 살펴보자. 송신 파형 주기 T에서 각 비트 주파수의 전력비는 다음의 관계를 갖는다.

$$\frac{P_L}{P_R} = \frac{T-t_d}{T}, \quad \frac{P_H}{P_R} = \frac{t_d}{T} \quad (2)$$

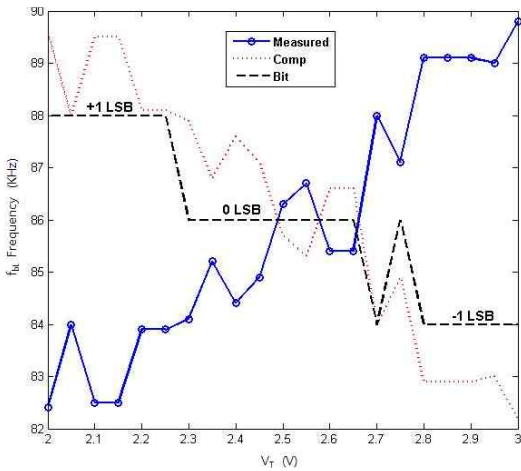
여기서 T는 제안된 B/M 크기의 송신 주기이며,  $t_d$ 는 반사파의 지연시간,  $P_R$ 은 T동안 수신된 전력,  $P_L$  및  $P_H$ 는 각각  $f_{bL}$ 과  $f_{bH}$  신호의 전력이다. 본 실험에서는 T를 50~100 us를 사용하므로  $P_H$ 와  $P_L$ 은 10 dB 이상의 차이가 나타나므로 LPF에 의해 제거되지 않더라도 전력 차로 구분이 가능하다.

비선형성으로 인한 비트 주파수 변화폭이 수신단의 FFT 길이 N에 의해 결정되는 주파수 해상도  $\Delta F$ 보다 작다면 단일 값으로 측정되므로 문제가 없어진다. 본 논문에서 사용된 시스템의 경우 DAC 샘플링 주파수  $F_s$ 가 5~10 Msps, N=2,048~8,192이며, 실제 운용에서는 10 Msps, 4,095 길이이므로 0.5 m의 해상도를 얻고 있다. 이때의  $\Delta F$ 는 다음과 같다<sup>[9]</sup>.

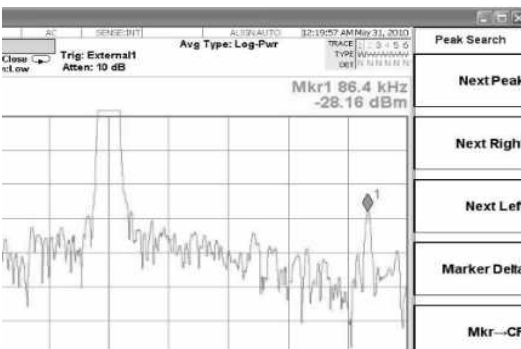
$$\Delta F = \frac{F_s}{N} = 2.4 \text{ [kHz]}$$

VCO 측정용 송신 파형으로 비선형성을 측정하는 과정을 그림 6에 보였다. 먼저 정상 송신 파형으로의 수신 비트 주파수를 측정한다. 최대 전력을 갖는 비트 주파수를 찾아 기준  $f_{bL}$ 로 설정하고, 이 값의 변화를 측정하게 된다. 이는 식 (1)과 같이 정지 상태의 장애물에 의한 비트 주파수가 송신 파형의 모양과 관계없이 B/T가 같다면 동일하기 때문이다. 그림 5(b)처럼  $V_T$ 를 단계적으로 증가시키며 반복적으로  $f_{bL}$ 을 추적하며, M개의 측정을 완료되지 못한 경우에는 이동, 또는 반사체가 사라진 경우로 판단하여 종료한다.

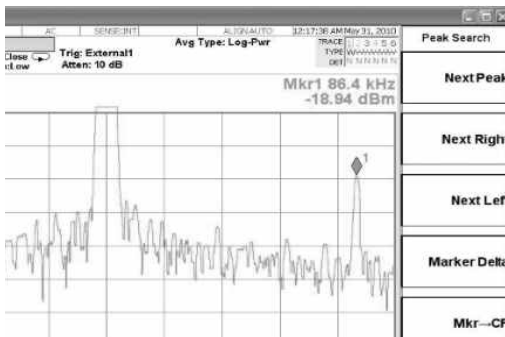
측정된 비선형성은 함수로 모델링한 후 송신 신호를 pre-distortion하여 보상하게 된다. 본 연구에서는 차량에 장착되어 실시간으로 보상을 하는 것을 목표로 하기 때문에 간단한 방법을 적용하였다. M개의



(a) 측정된 비선형성 및 보상 값  
(a) Measured nonlinearity and LUT values



(b) 보상 전 스펙트럼  
(b) The measured spectrum without compensation



(c) 보상 후 스펙트럼  
(c) The measured spectrum with compensation

그림 7. 보상 전후 스펙트럼 비교

Fig. 7. Comparison of the spectrum before and after compensation.

구간에 대하여 인접한 값에 대하여 1차 함수로 선형 보간하고, 그 결과에 따라 보상 값을 LUT로 구성하

여 파형 발생기에 적용하였다.

제안된 비선형 특성 측정 방식은 VCO 특성뿐만 아니라 FMCW 레이더의 송수신 아날로그 및 RF부 전체의 선형성 특성이다. 따라서 ADC, VCO, 체배기, 증폭기, 주파수 혼합기, DAC 등 RF부 전체의 영향을 반영한 것으로 VCO 선형화기로 송신단만 적용하는 방식보다 개선된 성능을 보일 수 있을 것이다. 다만 VCO 측정용 송신 파형이 DC가 아닌 sweep 파형을 사용하므로 정확도가 저하되지만 FFT의 주파수 해상도를 고려하면 차량용 FMCW 레이더에 적합한 효율적인 방법이 될 것이다.

제안된 방법은 상대 속도가 존재하는 경우에는 사용할 수 없다. 즉, 도플러 효과에 의한 주파수 편이가 존재할 경우 상승/하강 구간을 갖는 파형이 필요하며, 이때 측정된 비트 주파수 값이 이미 VCO의 비선형 오차를 포함하기 때문이다. 따라서 제안된 방식은 시동 직후 또는 정차 중인 경우에 적용되며, 수십 ms의 측정 시간을 고려하면 충분히 타당한 것으로 보인다. 먼저 정상 송신 파형으로 전방의 장애물을 검출한 후 정지 타겟에 대하여 제시된 절차를 수행하게 될 것이다.

#### IV. 시험 결과

본 연구에서 사용된 FMCW 레이더의 설정 값은 대역폭  $B=300$  MHz, VCO 튜닝 전압  $V_T=2.62\sim 3$  V, 주기  $T=1$  ms, 중심 주파수  $F_c=77$  GHz이며, 구간  $M$ 은 20으로 설정하여 실험하였다<sup>9)</sup>. VCO 측정은 하강 구간에도 적용할 수 있으나, 특성차가 적어 상승 구간에만 적용하며 총 20 ms 측정 시간이 필요하다.

먼저 실험은 기존 시스템에 대한 주파수 선형성의 측정 결과를 그림 7(a)에 보였다. 모든 튜닝 전압에 대하여 단일 비트 주파수로 검출되어야 하지만, 비 선형성에 의하여 주파수 차가 나타나고 있다. 비트 주파수 차는 8 kHz이며, 이는 거리로 환산하면 약 2.1 m가 된다. LUT에서는 단순 선형 보간을 이용하여 수평 대칭 형태인 점선과 같이 보상하게 된다. 본 논문에서 사용된 RF부는 LSB 1 비트당 4 kHz가 변화하므로 적용된 값은 굵은 실선과 같다. 장애물이 20 m 거리에 있는 경우에 대하여 보상 전후의 비트 주파수 신호를 그림 7(b)~(c)에 비교하였다. 정상 송

신 파형을 사용하여 검출된 장애물에 대한 수신 스펙트럼을 비교해 보면 비 선형성 때문에 나타나던 비트 주파수 주변의 잡음이 개선되었음을 확인할 수 있다.

### V. 결 론

본 논문에서는 차량 충돌 방지용 FMCW 레이더 센서에 적합한 주파수 선형성을 개선하기 위한 송신 파형 방식을 제안하였다. 임의파형 발생기를 통한 VCO 발생 회로의 튜닝 전압과 출력 주파수의 관계를 FMCW 레이더 측면에서 살펴보고, 제안한 송신 파형으로 주파수 특성을 측정할 수 있음을 보였다. 제안된 방식은 기존의 시스템을 변경하지 않고 차량용과 같은 저해상도 FMCW 레이더 시스템에 적합한 선형화 기법이다. 실험을 통하여 주파수 선형성이 측정 가능함을 보이고, 송신 신호를 LUT 방식으로 보정하여 선형성이 개선된 결과를 제시하였다.

제안된 방식은 VCO의 특성이 단조 증가 또는 감소 형태를 가질 때 모두 적용이 가능하므로, 상용 VCO를 사용하는 차량용 FMCW 레이더에 적용이 가능하다.

### 참 고 문 헌

[1] 홍주연, 강동민, 윤형섭, 심재엽, 이경호, "전방감시용 밀리미터파 레이더 기술 동향", 전자통신동향 분석, 22(5), pp. 35-45, 2007년 10월.  
 [2] Federal Motor Carrier Safety Administration, "Concepts of operations and voluntary operational requirements for forward Collision Warning Systems (CWS) and Adaptive Cruise Control(ACC) systems

on-board commercial motor vehicles", <http://www.fmcsa.dot.gov/facts-research/research-technology/report/forward-collision-warning-systems.htm>, Jul. 2005.  
 [3] R. H. Bishop, *Intelligent Vehicle Technology and Trends*, Artech House, 2005.  
 [4] T. Gandhi, M. M. Trivedi, "Pedestrian protection systems: Issues, survey, and challenges", *IEEE Trans. Intell. Transport. Syst.*, vol. 8, no. 3, pp. 413-430, Sep. 2007.  
 [5] H. Li, H.-M. Rein, T. Suttrop, and J. Böck, "Fully integrated SiGe VCOs with powerful output buffer for 77-GHz automotive radar systems and applications around 100 GHz", *IEEE J. Solid-State Circuits*, vol. 39, pp. 1650-1658, 2004.  
 [6] C. Wagner, A. Stelzer, and H. Jäger, "PLL architecture for 77-GHz FMCW radar systems with highly-linear ultra-wideband frequency sweeps", *Proc. IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, San Francisco, pp. 399-402, Jun. 2006.  
 [7] J. Fuchs, K. Ward, M. Tulin, and R. York, "Simple techniques to correct for VCO nonlinearities in short range FMCW radars", *Proc. IEEE MTT-S Int. Microw. Symp. Dig.*, San Francisco, pp. 1175-1178, Jun. 1996.  
 [8] H. Rohling, M. Meinecke, "Waveform design principles for automotive radar systems", *Proc. CIE Int. Radar Conf.*, pp. 1-4. 2001.  
 [9] 현유진, 오우진, 이종훈, "77 GHz 차량용 레이더 신호처리부 구현", 대한전자공학회 하계종합학술대회, 2009년.

현 유 진



1989년 2월: 영남대학교 전자공학과 (공학사)  
2001년 2월: 영남대학교 전자공학과 (공학석사)  
2005년 2월: 영남대학교 전자공학과 (공학박사)  
2005년 3월~현재: 대구경북과학기술원(DGIST) 융합신호처리연구팀 선임연구원, 영남대학교 정보통신공학과 겸임교수

[주 관심분야] 레이더 신호 처리, 디지털 신호 처리 구현

이 중 훈



1996년 2월: 성균관대학교 전자공학과 (공학사)  
1998년 2월: 성균관대학교 전자공학과 (공학석사)  
2002년 2월: 성균관대학교 전자공학과 (공학박사)  
2002년 3월~2005년: 삼성전자 네트워크 통신사업부 선임연구원

2005년~현재: 대구경북과학기술원(DGIST) 융합신호처리연구팀 선임연구원, 영남대학교 정보통신공학과 겸임교수

[주 관심분야] 차량용 레이더, 차량용 비전센서, 지능형자동차

오 우 진



1989년 2월: 한양대학교 전자공학과 (공학사)  
1991년 8월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)  
1996년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)  
1996년 2월~1998년 8월: SK 텔레콤 중앙연구원 선임연구원

1998년 8월~현재: 금오공과대학교 교수

[주 관심분야] 디지털 신호 처리, 통신 신호 처리