
차량용 FMCW 레이더 신호처리부 개발 및 주행시험

오우진* · 이종훈**

Implementation and Road Test of Signal Processing Unit for FMCW vehicle Radar system

Woojin Oh* · Jong-Hun Lee**

본 논문은 교육과학기술부 2010년 중점연구과제의 연구결과입니다

요 약

FMCW(Frequency Modulation Continuous Wave) 레이더는 간단하게 장애물의 거리와 속도를 검출할 수 있어 차량용 충돌 방지 시스템에 많이 사용된다. 본 연구에서 개발된 FMCW 차량 레이더 시스템의 신호처리 부는 DSP, FPGA, 고속 ADC 및 DAC 등을 활용한 유연한 구조로 설계 되어 다양한 알고리즘에 대하여 개선 방안을 적용, 평가할 수 있도록 설계되었다. 구현된 시스템은 기본 동작 성능이 설계 성능과 유사함을 확인하였으며, 실제 주행시험을 통하여 상용화에 필요한 몇가지 문제점을 분석하고 이에 대한 개선 방안을 제시하였다. 제기된 문제점을 분석하여 타겟들의 겹침으로 인한 섀도우 효과(Shadow effect), VCO의 비선형 특성에 따른 비트주파수의 퍼짐, 차량 형상에 따른 비트주파수의 군집화로 구분하였으며 이에 대한 해결방안을 간단히 살펴보았다.

ABSTRACT

FMCW(Frequency Modulation Continuous Wave) Radar is very useful for vehicle collision warning system because of the simplicity. In this work, a signal processing part of FMCW vehicle radar system is implemented with flexibility using DSP, FPGA, ADC, and DAC so that the system could adopt lots of algorithm and could be improved through road test. It is shown that the system meets basic requirements as designed, and finds some problems in road test. We briefly discuss the problem which are caused by shadow effect from overlapped target and the distortion of beat frequency from the nonlinearity of VCO and the RCS of vehicle.

키워드

FMCW 레이더, 충돌 방지 시스템, 레이더 신호처리

Key word

FMCW Radar, Collision Warning System, Radar Signal Processing

* 금오공과대학교 (wjoh@kumoh.ac.kr)

** 대구경북과학기술원 (jhlee@dgist.ac.kr)

접수일자 : 2010. 05. 25

심사완료일자 : 2010. 06. 30

I. 서론

FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave) 레이더는 초고주파를 사용하므로 외부환경에 영향을 받지 않으면서도 비교적 구현이 간단하여 차량용 충돌방지 시스템으로 많은 연구가 진행되어왔다[1]-[8]. 최근에는 FMCW 차량용 레이더가 일부 상용화 되어 고가 차량에 장착되어 시판 중에 있다[1].

FMCW 레이더는 77GHz의 초고주파에서 광대역 변조를 사용할 경우 수cm까지 거리 해상도와 수 Km/h의 상대 속도를 검출할 수 있는 장점이 있다. 그러나 FMCW 레이더가 고성능으로 동작하기 위해서는 광범위한 선형적인 FM 변조가 필요하며, 이를 위해서 정밀한 밀리미터파 영역의 VCO가 요구되어 이 부분에 연구가 집중되어 왔다. 그러나 상용화된 대부분의 FMCW 레이더 시스템은 가격과 성능의 한계 등으로 인하여 거리 및 속도 측정값을 사용자에게 직접 제공하기 보다는 위험 조건을 설정하여 타겟이 해당 조건에 있을 때 경보를 제공하는 형태로 운영되고 있다[1].

본 연구에서는 주파수 체배방식의 VCO에 기반한 저가형 RF 부에 적합한 FMCW 레이더 신호처리 알고리즘을 검증하기 위한 유연한 구조의 신호처리부를 설계 및 구현하였다. 구현된 77GHz FMCW 차량용 레이더 시스템은 주행시험에서 기본적인 설계 성능을 확인할 수 있었다. 실제 주행 시험에서는 몇가지 문제점을 확인하고 이에 대한 원인을 분석하고 해결 방안을 검토하였다. 제시된 문제점은 근거리 타겟으로 인해 후방 타겟이 섀도우(Shadow) 효과로 사라지는 현상, 거리와 속도 해상도를 높은 수준으로 유지하면서 pairing하기 위한 multi chirp 송신파형, 단일 타겟에서도 다수의 비트주파수 발생하여 군집화 되는 현상 등이 있다.

본 논문의 구성은 II장에서 FMCW 레이더를 간단히 소개하고, III장에서 신호처리부의 설계 및 구현 방안을 제시하였다. IV장에서는 실제 주행시험에서 얻은 결과를 통하여 문제점을 찾아내고, 해결 방안에 대하여 논의하였다.

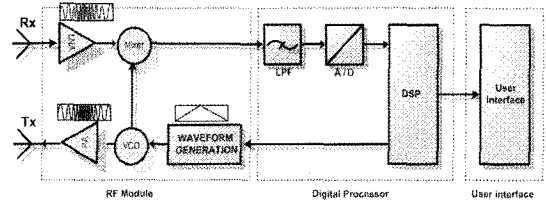


그림 1. FMCW 레이더 시스템 블록도
Fig. 1 Block Diagram of FMCW Radar system

II. FMCW 개요 [3]

FMCW 레이더는 그림 1과 같이 시간에 따라 선형적으로 sweep하는 삼각파를 FM으로 변환하여 송신하고 장애물로부터 반사된 수신신호와 송신 신호를 곱(Mix)하는 방식을 사용한다. Mix된 신호는 LPF를 거치면서 합주파수 성분이 제거되고 차주파수 성분만 남게 되며 이를 비트주파수(f_b : Beat Frequency)라 한다. 시간에 따라 주파수가 선형적으로 변하므로 비트주파수는 그림 2(a)와 같이 정지상태인 경우 시간 지연(t_d)에 비례한 값인 거리주파수(f_r : Range Frequency)가 된다. 따라서 다음과 같이 거리(R)를 구할 수 있다.

$$f_r = \frac{t_d B}{T} \quad R = \frac{c T f_r}{2B}$$

여기서 c 는 광속, T 는 sweep 시간, B 는 변조대역폭이다. 그림 2(b)와 같이 상대속도가 0이 아닌 경우에는 도플러 효과에 의한 주파수편이 f_d 가 발생하게 되며, 이때는 상승과 하강구간에 따라 다음의 관계를 갖는다.

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

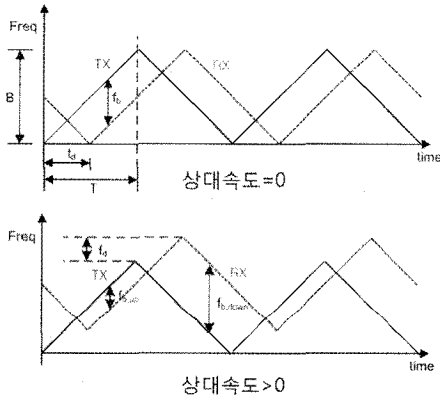


그림 2. 송수신 Chirp 신호의 예
Fig. 2 Example of Tx-Rx Chirp signal

FMCW 레이더의 성능인 거리분해능, 속도분해능은 레이더 센서와 관련된 중심주파수(f_c), 변조대역폭(B) 및 sweep 시간(T)과 신호처리부와 관련된 샘플링 주파수(f_s), FFT point 수(N)에 의해 다음과 같이 결정된다.

$$\Delta R = \frac{cT\Delta F}{2B} \quad \Delta V_r = \frac{c\Delta F}{2f_c} \quad (1)$$

여기서 주파수분해능($\Delta F = f_s/N$)은 거리 및 속도 오차를 결정하는 중요 요소임을 알 수 있다.

III. 신호처리부 설계 및 구현

본 논문에서 사용된 FMCW 레이더의 RF는 $f_c = 76.5$ GHz, $B = 300$ MHz이며 체배방식으로 구현되어 있다. 이를 위한 신호처리부는 우선 기본적인 성능확인을 위하여 0.5m의 거리 분해능, 5Km/h의 속도 분해능을 갖도록 설계하였다. 이를 위한 FMCW 파라미터는 표 1과 같다. 식 (1)에 의해 결정되는 요구 해상도를 만족시키는 파라미터 값은 많으나 구현에 따른 한계를 고려하여 설정하였다[3]-[5].

표 1. 제안된 FMCW 레이더 파라미터
Table. 1 The Proposed FMCW Radar Parameter

항목	값
중심주파수(f_c)	76.5GHz
주파수대역폭(B)	300MHz 이하
샘플링주파수(f_s)	3, 5, 7, 10, 15, 20Msps
sweep시간(T)	0.2~100 ms, 0.1ms 단위
FFT 길이(N)	512~8192

식 (1)에서 제안된 시스템의 최고 거리해상도는 ADC 구간과 T가 일치하는 $T\Delta F = 1$ 인 경우에 0.5m로 제한된다. 예를 들면 $f_s = 10$ MHz, $N = 4096$, $T = 0.4096$ ms와 $f_s = 10$ MHz, $N = 2048$, $T = 0.2048$ ms는 같은 해상도를 갖는다. 속도 해상도는 주파수 분해능에 비례하므로 $N = 8192$ 이고 $f_s = 3$ MHz 일 때 2.58 Km/h 가장 좋다. 그러나 본 연구에서는 RF부에서 DC 제거회로 때문에 10KHz 이하가 차단되므로 충분한 비트주파수를 갖도록 $f_s = 3$ MHz, $N = 4096$, $T = 1.37$ ms 설정하여 사용하였다. 여러 논문에서는 송신파형을 다중 chirp으로 설정하여 pairing을 용이하게 하고, 거리 및 속도를 개선하는 방안을 제시하고 있다[6].

신호처리부의 기능은 그림 3과 같다. 제시된 파라미터를 만족하고 다양한 기능을 시험할 수 있도록 주요부분을 FPGA와 DSP로 구현하였다.

먼저 아날로그 처리부를 살펴보자. 수신신호는 FMCW 레이더의 비트주파수 신호이며 수 MHz 이내에 존재한다. 따라서 수신부 ADC는 12bit, 20Msps인 analog device사의 AD9235로 구현하였다. 송신신호는 VCO에 입력되는 전압신호로써 작은 오차가 RF부에서 급격히 체배되므로 고속 DAC인 14bit, 125Msps의 AD9764를 사용하였다. 송신파형의 정확도와 유연성을 높이기 위하여 DAC 출력을 1Vpp로 설정하고 출력단에 가변형 level shift 회로를 Trim DAC로 구성하였다. 따라서 송신파형은 DC=0~3V에서 1Vpp의 변화폭으로 설정이 가능하여 이는 16bit DAC와 동일한 성능이다. DAC로 인한 SQNR은 $6.02QdB = 96.3dB$ 가 되며 이는 VCO출력에서 phase noise로 나타날 것이다. 이 값은 상용 Direct Digital Synthesizer (DDS) IC와 비슷한 수준이다.

FPGA부는 송수신 데이터 속도가 낮으므로 고속 소자

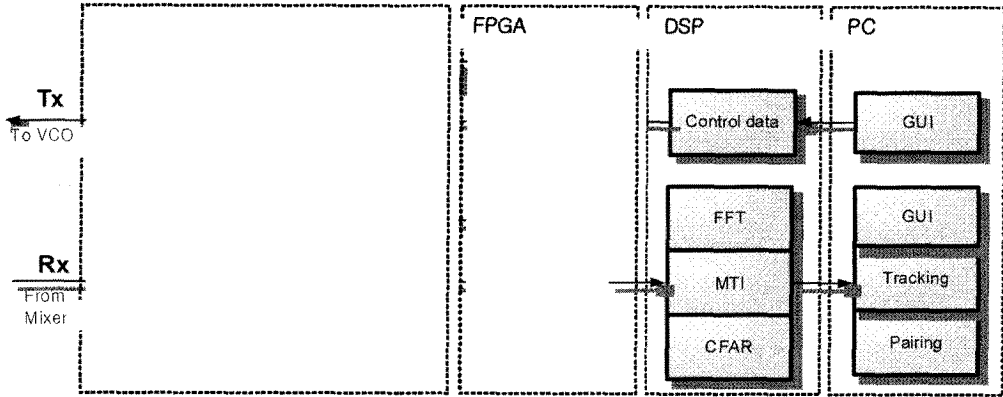


그림 3. 신호처리 기능 구성도
Fig. 3 Functions of Signal Processing part

대신 범용 Altera Cyclone III EPC3C40 을 사용하였다. 주요 기능은 송신파형을 위한 임의파형 발생, 수신부의 ADC값을 일시 저장하기 위한 FIFO, 수신신호 크기를 조정하는 AGC (Automatic Gain Control), 수신 Level 보정을 수행한다. 그리고 디지털 데이터의 신뢰성 개선을 위한 windowing, 측정 거리를 제한하는 필터, data rate의 변환과 같은 전처리기능을 수행한다.

DSP부는 다양한 알고리즘을 C언어나 Matlab등과 연동하여 프로그래밍 할 수 있도록 초고속 DSP인 TI TMS320C6455 1.2GHz를 사용하였다. 적용된 주요 기능은 가변 길이의 FFT, 정지물체와 이동물체를 구분하기 위한 MTI(Moving Target Indicator), 클러터 영향을 제거하기 위한 CFAR(Constant False Alarm Rate) 등과 같은 핵심 기능이다[4], [7]. 그리고 PC의 Matlab과 연계하여 상승 및 하강 구간의 비트주파수를 조합하여 거리 및 속도를 구하는 Pairing, 타겟 추적을 통해 검출 오류를 제거하는 tracking으로 정확한 위치와 속도 등을 제공하게 된다[6].

설계된 시스템은 다중 chirp 신호가 표 1의 N, T, B 범위에서 필요에 따라 가변 송신된다. 다만 샘플링 주파수 f_s 는 FPGA 내부의 PLL Lock 시간과 ADC 클럭 lock 지연 문제로 인하여 고정하였으나, FPGA 내부에서 multirate 신호처리 기법으로 1/2x, 1/3x, 1/5x, 2x, 3x의 조합으로 수신 데이터율이 변경된다. 예를 들면 속도 측정구간에서는 10Msps, 거리측정 구간에서 4Msps이 필요한 경우,

ADC는 20Msps로 설정하고 FPGA의 전처리부에서 1/2x 와 1/5x로 변환되는 것이다.

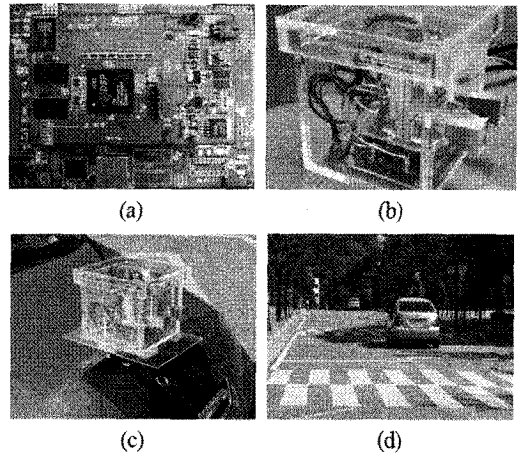


그림 4. 시스템 형상 및 주행 시험 (a) 신호처리부 (b) 레이더 시스템 (c) 차량장착 (d) 시험: Case 2
Fig. 4 Implemented system and Road Test
(a) Signal processing part (b) Radar System (c) Vehicle Mount (d) Road test

그림 4에 구현된 레이더 시스템을 보였다. 시스템 크기는 135x110x150mm(WxHxD, 안테나 혼 제외)이며 PC와 LAN으로 연결되어 Matlab에서 GUI 기반으로 제어된다.

IV. 주행시험 결과 및 개선 방안

주행 시험은 차량에 장착하여 교내에서 다음과 같은 실험환경에서 실시하였다. (그림 4 (c), (d))

- Case 1: 정지 상태에 정지 타겟만 존재
- Case 2: 정지 상태에 정지+이동 타겟이 존재
- Case 3: 이동 중에 정지+이동 타겟이 존재

실험에 사용된 레이더 파라미터 및 송신파형은 다음과 같다.

- 파라미터: $B=300\text{MHz}$, $f_s=10\text{MHz}$, $T=0.2\text{ms}$, $N=4096$
- 송신파형: 단일 Chirp, Chirp간 간격은 10ms

측정된 데이터 중에서 상승구간의 비트 주파수를 그림 5에 보였다. 가로축은 FFT 인덱스로 거리를 의미하며 세로축은 시간순서로 송신신호 인덱스로 본 연구에서는 10ms 간격이다. 수신신호의 세기에 따라 진하게 나타나며 정지 차량은 수직선으로 나타나고 상대 속도가 존재하는 경우에는 시간에 따라 거리가 달라지므로 접근 또는 이격에 따라 서로 다른 기울기 형태로 나타나게 된다.

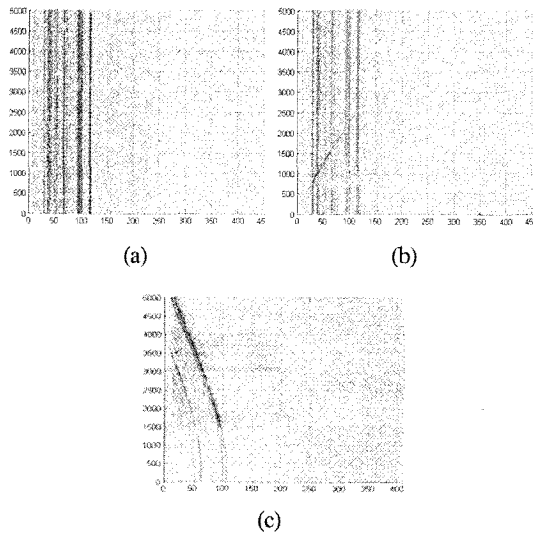


그림 5. 측정된 비트주파수
(a) Case 1 (b) Case 2 (c) Case 3
Fig. 5 Measured Beat Frequency
(a) Case 1 (b) Case 2 (c) Case 3

본 연구에서 주행 시험 중에 관찰된 몇가지 문제점은 다음과 같다.

- 새도우 효과(Shadow effect): 밀리미터파의 직진성과 좁은 방사패턴으로 인하여 근거리 물체로 인한 shadowing이 발생하여 일정 거리의 후방 물체가 사라짐 (그림 6(a))
- VCO의 비선형성: 입력 전압과 출력 주파수간의 관계가 비선형인 경우 그림 6(b)처럼 비트주파수가 시간에 따라 변화
- 차량의 비균질 반사: 차량의 형상에 의한 반사 위치 차이로 인하여 군집된 비트주파수 검출
- 자차속도의 정확성: FMCW 레이더는 상대속도만 검출이 가능하므로 절대속도의 검출 및 정지물체 인식을 위해서는 자차속도 정보가 요구됨
- 비트주파수들의 pairing: 실제 주행 상황에서 검출되는 타겟, 즉 비트주파수 수가 수십개가 넘어 이에 대한 pairing 조합이 급격히 증가

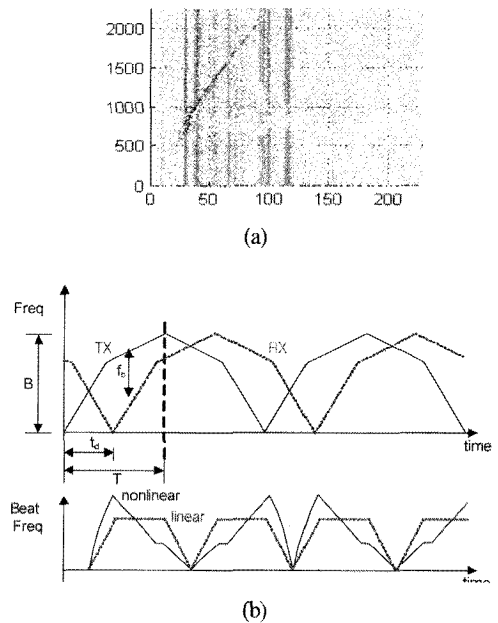


그림 6. 주행시험에서 나타난 문제점
(a) 새도우 효과 (b) VCO 비선형성
Fig. 6. Observed Problems in Road Test
(a) Shadow Effect (b) VCO Nonlinearity Effect

이들에 대한 구체적인 해결 방안과 이론적인 모델링 및 실험결과는 향후 연구과제로 계속 진행 중에 있으며 본 논문에서는 실험을 통하여 적용된 해결방안에 대하여 간단히 설명하겠다.

새도우 효과는 그림 6.(a)에서 세로축의 800번째 시간에서 FFT인덱스 50~120까지의 비트주파수가 사라지는 현상이 나타난다. 이는 좁은 단일 방위각만을 제공하는 기존 FMCW 레이더에서는 CFAR와 같은 타겟 검출 방법으로는 해결하기 어렵다. Phased array 안테나를 사용하는 경우에는 방위각 정보로부터 새도우 여부를 판별할 수 있으며 다음 연구로 기공 중에 있다[8]. 본 연구에서는 tracking 단계에서 타겟마다 사라진 타겟에 대하여 timer로 life-time을 설정하는 방식을 사용하고 있다.

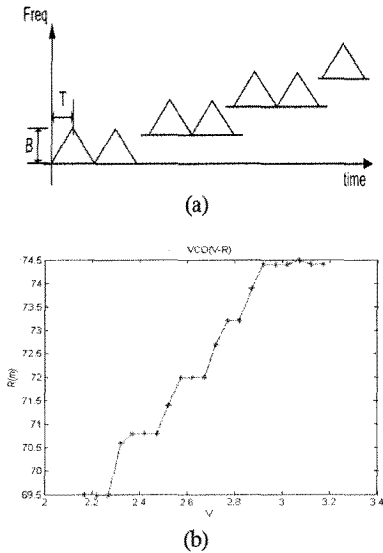


그림 7. VCO의 비선형성
 (a) 송신 파형 (b) 측정된 비트주파수
 Fig. 7. Nonlinearity Effect of VCO
 (a) Tx waveform (b) Measured beat frequency

VCO의 비 선형성을 보상하기 위해서 별도의 bypass 회로를 부가하여 loop 제어를 하거나 스펙트럼분석기로 측정하여 pre-distortion하는 방법이 있다[9]. 그러나 레이더가 차량에 장착된 경우에는 온도, 열화 등에 의해서도 이러한 문제점이 지속적으로 발생할 수 있으므로 본 연구에서는 추가 회로없이 VCO 보상 송신파형을 사용하였다. 그림 7에 보인 VCO 보상 송신파형은 진폭

이 좁고 DC가 순차적으로 증가하므로 전압대별로 동일 타겟에 대한 비트주파수를 얻게된다. 이 방식은 차량의 초기 기동시 또는 신호 대기중에 타겟의 정확한 거리 정보가 없어도 동일한 정지 타겟인 경우에 적용이 가능하다. 그림 7(b)와 같이 측정된 전압대별 비트주파수로부터 비선형성을 추정하고 송신파형에 pre-distortion을 적용하게 된다.

차량의 비균질 반사는 레이더의 거리해상도가 높은 경우에 차량 형상에 의해 나타난다. 본 연구에서는 차량의 길이를 고려하여 1.5m 이내의 군집 타겟을 단일로 처리하고 tracking에서 타겟의 검침 및 분리 문제를 후처리 한다.

자차속도는 정지 타겟을 검출하기 위해서는 필수적이지만 상용 자동차에서 별도의 정확한 정보를 받기 어려우며 GPS와 연동하는 것도 5Hz 내외의 갱신 속도로 인하여 적용하기에 문제가 있다. 본 연구에서는 측정된 거리의 시간적 변화를 관찰하여 자차속도를 추정하였다. 즉 이동 중의 측정결과를 분석해보면 동일한 속도이면서 서로 다른 거리로 검출된 타겟은 대부분 정지물체라는 점이다. 이는 일반적인 도로 상황에서는 동일한 속도로 다수의 타겟이 동시에 이동하는 사례가 적다는 점에서 타당하다고 생각된다.

비트주파수의 pairing을 정확하게 하기 위하여 송신파형을 다중 chirp으로 사용하는 것이 보편적이다. 본 연구에서는 타겟 수를 줄이기 위하여 근거리와 원거리로 구간을 나누는 방법을 추가로 적용하였다. 즉 pairing이 각 구간별로 처리되어 타겟 수가 절반으로 줄어들며 최종 판정은 (거리, 속도) 정보에 따라 전 구간에서 통합적으로 이루어진다[6].

V. 결론

차량용 전방 장애물 감지장치로써 FMCW 레이더는 간단하면서도 우수한 성능으로 많은 연구가 진행되어 상용화되기까지 이르렀다.

본 연구에서는 저가형 RF 부에 적합한 FMCW 레이더 신호처리 알고리즘을 개발하기 위하여 유연한 구조의 신호처리부를 설계 및 구현하였다. 주행시험을 통하여 설계 성능을 확인하고 몇가지 문제점을 찾아내어 이에 대한 원인 및 해결 방안에 대하여 검토하였다. 제시된 문

제점은 근거리 타겟으로 인해 후방 타겟이 섀도우(Shadow) 효과로 사라지는 현상, VCO의 비선형성 및 차량의 형상에 따른 단일 타겟에서 비트주파수 군집화 되는 현상, 자차 속도의 측정방법 및 거리속도 측정을 위한 pairing 문제 등이 있었다. 현재는 제기된 문제의 원인을 파악하고, 이에 대한 해결 방안을 적용하여 시험 중에 있다. 최종적인 알고리즘은 별도의 논문에서 제시할 예정이다.

참고문헌

- [1] P. E. Ross, "Top Ten Tech Cars-2010", IEEE Spectrum, Apr., 2010, pp 28-58.
- [2] 홍주연, 강동민, 윤형섭, 심재엽, 이경호, "전방감시용 밀리미터파 레이더 기술동향", 전자통신동향분석 제22권 제5호 2007년 10월.
- [3] 오우진, "FMCW방식의 자동차 레이더 신호처리부 설계 및 구현" 전자공학회논문지 제41권 TC편 제 12호, 2004.12, pp. 67 ~ 74
- [4] 현유진, 오우진, 이종훈, "77GH 차량용 레이더 신호처리부 구현", 대한전자공학회 하계종합학술대회, 2009
- [5] W. Chang, L. Huan, L. Yubai, "A Practical FMCW Radar Signal Processing Method and Its System Implementation", in Int. Conf. ITS Telecomm., 2006, pp. 1195~1199
- [6] H Rohling, M. Meinecke, "Waveform Design Principles for Automotive Radar Systems" in CIE Int. Radar Conf., 2001, pp. 1~4.
- [7] H. Rohling and R. Mende, "OS CFAR performance in a 77 GHz radar sensor for car application", CIE International Conference of Radar, Oct. 1996.
- [8] K. Cheng and H. Su, "Multi-target Signal Processing in FMCW Radar System with Antenna Array", Radar Conf., 2008 Radar'08, IEEE, pp. 1~5
- [9] J. Fuchs, K. Ward, M. Tulin, and R. York, "Simple Techniques to Correct for VCO Nonlinearities in Short Range FMCW Radars", IEEE Int. Microwave Symposium Digest (San Francisco), vol. 2, pp. 1175-1178

저자소개

오우진(Woojin Oh)



1989년 한양대학교 전자공학과 학사.
1991년 한국과학기술원 전자공학과 석사.

1996년 한국과학기술원 전자공학과 박사.
1996년~1998년, SK 텔레콤 선임연구원.
현재, 금오공과대학교 전자공학부 교수.
※관심분야: 레이더 신호처리, 통신 신호처리

이종훈(Jong-Hun Lee)



1996년 성균관대학교 전자공학과 학사.
1998년 성균관대학교 전기전자 컴퓨터공학과 석사.

2002년 성균관대학교 전기전자컴퓨터공학과 박사.
2002년~2005년, 삼성전자 네트워크 통신 사업부 선임연구원.
현재, 대구경북과학기술원(DGIST) 융합신호처리연구팀 과제책임자.
영남대학교 정보통신공학과 겸임교수
※관심분야: 차량용 레이더, 차량용 비전 센서, 지능형 자동차