
차량용 FMCW 레이더의 탐지 성능 분석 및 신호처리부 개발

김상동* · 현유진* · 이종훈* · 최준혁** · 박정호** · 박상현***

The analysis of the detection probability of FMCW radar and implementation
of signal processing part

Sang-Dong Kim* · Eugin Hyun* · Jong-Hun Lee* · Jun-Hyeok Choi** · Jung-Ho Park** · Sang-Hyun Park***

이 논문은 2010년도 ADD의 FMCW 레이더/추적장치 신호처리 모듈 과제 연구비를 지원받았음

요 약

본 논문에서는 차량용 FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave) 레이더의 도플러 주파수와 아날로그-디지털 변환기 비트 수에 따른 탐지 성능 분석 및 신호처리부 개발을 진행하고자 한다. 성능 평가를 위한 FMCW 레이더의 시스템 모델은 송신부와 수신부로 구성되어 있으며 채널은 가우시안 잡음 환경을 사용한다. 이론과 시뮬레이션을 통해서 시스템 모델을 검증한다. 수신부에서는 수신 신호와 기준 신호사이의 부정합으로 인한 주파수 오차가 발생하게 된다. 75cm의 분해능을 갖는 FMCW 레이더에서 도플러 주파수가 약 38KHz이하인 경우 탐지 성능의 열화가 발생하지 않음을 알 수 있다. 아날로그-디지털 변환기 비트에 따른 탐지 성능은 6비트가 최소의 비트로 결정될 수 있음을 알 수 있다. 그리고 FPGA를 이용하여 디지털 송신 파형 발생기를 위한 집적 디지털 신디사이저(Direct Digital Synthesis) 칩을 기반한 FMCW 레이더 신호처리부를 설계 및 구현을 진행한다.

ABSTRACT

This paper analyzes the detection probability of FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave) radar based on Doppler frequency and analog-digital converter bit and designs and implements signal processing part of FMCW radar. For performance evaluation, the FMCW radar system consists of a transmitted part and a received part and uses AWGN channel. The system model is verified through analysis and simulation. Frequency offset occurs in the received part caused by the mismatching between the received signal and the reference signal. In case of Doppler frequency less than about 38KHz, performance degradation of detection does not occur in FMCW radar with 75cm resolution. The analog-digital converter needs at least 6 bit in order not to degrade the detection probability. And, we design and implement digital signal processing part based on DDS chip of digital transmitted signal generator for FMCW radar.

키워드

FMCW, 레이더, 도플러 주파수, 아날로그-디지털 변환기, 신호처리부

Key word

FMCW , radar, Doppler frequency, analog-digital converter, digital signal processing

* 대구경북과학기술원 (이종훈, jhlee@dgst.ac.kr)

** LIGNex1

*** 국방과학연구소

접수일자 : 2010. 10. 31

심사완료일자 : 2010. 11. 10

I. 서 론

FMCW 레이더는 차량용 충돌방지 시스템에서 외부 환경에 영향을 받지 않고 차량의 거리를 측정할 수 있는 기기로서 많은 관심을 받고 있다[1]-[8]. 충돌 방지 시스템은 자동차 근방에 장애물을 인지하여 시스템과 장애물간의 상대거리를 추출함으로써 미연에 충돌을 방지하는 것을 목적으로 가지고 있다. 장애물 감지센서로는 초음파, 레이저 그리고 카메라와 같은 센서들이 거론되고 있으나, 초음파는 단거리의 물체를 측정하는 데만 사용되고, 레이저와 카메라는 눈과 비와 같은 환경에서는 거리 인식의 어려움을 가지고 있다. 그래서 이에 대한 대안으로 차량용 레이더는 환경에 상관없이 눈, 비와 같은 운전자의 시야를 가리는 상황이나 운전자의 부주의로 인해 발생할 수 있는 사고를 미연에 방지하고 개발된 차량의 안전 운행 시스템으로 사용되고 있다[3].

밀리미터파 레이더를 이용하는 충돌방지 시스템은 대부분 장거리 물체 탐지를 위한 FMCW 레이더를 사용하고 있다. FMCW 레이더는 W band의 초고주파에서 광대역 변조를 사용하기 때문에, 수 cm까지 거리 해상도를 검출할 수 있는 장점이 있다. 그러나, FMCW 레이더가 고성능의 탐지 성능을 갖고 디지털로 동작하기 위해서는 도플러 주파수에 따른 탐지 성능 분석과 아날로그-디지털 변환기 비트수에 따른 탐지 성능 분석이 필요하다 [9]. 본 연구에서는 FMCW 레이더 신호처리 알고리즘 성능 평가와 디지털 송신 파형 발생기를 위한 집적 디지털 신디사이저 칩을 기반한 신호처리부를 설계 및 구현하였다.

본 논문의 구성은 2장에서는 FMCW 레이더의 개요에 대해서 나타내고, 3장에서는 FMCW 레이더의 신호처리 구성도를 나타낸다. 4장에서는 시뮬레이션 결과 고찰과 구현을 기술하였고, 결론은 5장에서 정리하였다.

II. FMCW 레이더 개요

FMCW 레이더는 그림 1과 같이 시간에 따라 선형적으로 변하는 삼각파 신호를 송신하여 목표물로부터

반사되는 신호를 수신하게 된다. 송신 신호와 수신 신호사이에는 거리에 따른 주파수 차이가 발생한다 [10]. 차주파수는 장애물로부터 반사된 수신신호와 송신신호를 곱(Mix)하는 방식을 사용하여 추출한다. 곱해진 신호는 저대역주파수통과필터를 지나면 합주파수는 제거되고 차주파수 성분만 남게 되어 이를 비트 주파수(fr, Beat frequency)라고 정의한다 [11]. 비트주파수는 식 (1)에서 알 수 있듯이 거리 정보를 포함하고 있다.

$$R = \frac{cTfr}{4\pi B} \quad (1)$$

여기서, B는 주파수 변조폭 또는 대역폭을 나타내며, T는 FMCW 변조 주기 또는 신호 폭을 나타낸다.

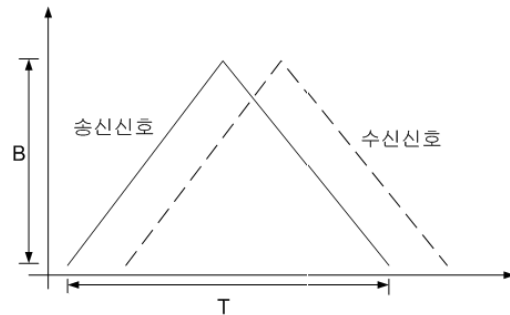


그림 1. FMCW 레이더 송수신 신호
Fig. 1 FMCW radar transmitted and received signal

그림 2는 FMCW 레이더의 시스템 블록도를 나타내고 있다. 집적 디지털 신디사이저 칩을 이용하여 선형적인 FMCW 레이더의 송신신호를 발생시키고, W band의 오실레이터를 곱한 후, 안테나를 통해서 목표물로 송신을 하게 된다. 목표물의 거리에 따라 시간적으로 지연된 반사 신호가 수신 안테나를 통해서 수신되며 수신된 신호는 송신신호와 곱해져서 비트 주파수 성분을 발생한다. 비트 주파수 성분은 증폭기와 저대역 주파수 통과 필터를 통과하여 증폭된 아날로그 신호가 아날로그-디지털 변환기를 통해서 디지털 신호로 변환된다. 변환된 디지털 신호는 고속 푸리에 변환기를 통해서 주파수성분이 추출되고 추출된 주파수를 통해서 반사된 신호와 레이더간의 상대거리를 알 수 있다.

FMCW 레이더의 특성상 거리 분해능은 주파수 분해능에 의해서 비례한다. 그러나, 움직이는 물체를 탐지하는 경우에 FMCW 레이더의 수신신호에 도플러 주파수가 더해지게 된다. 이는 주파수를 거리로 탐지하는 FMCW 레이더에서는 탐지성능의 열화를 발생하게 된다. 레이더의 탐지성능은 최대탐지거리에서 약 90% 이상의 탐지율을 갖도록 요구하고 있으므로, 도플러 주파수에 따른 탐지 성능 분석은 필연적으로 수행해야함을 알 수 있다. 그리고 FMCW 레이더는 RF 모듈을 통해서 수신된 신호를 디지털 신호로 변환해야 하므로 아날로그-디지털 변환기의 비트수에 따라서 탐지 성능에 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 따라서, 본 논문은 도플러 주파수와 아날로그-디지털 변환기 비트에 따른 성능 평가를 분석하였다.

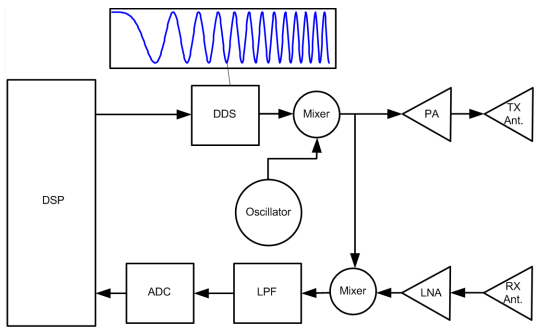


그림 2. FMCW 레이더 시스템 블록도
Fig. 2 FMCW radar system block diagram

III. FMCW 레이더의 신호처리 구성도

3.1 신호처리 구성도

본 절에서는 차량용 FMCW 레이더 신호처리부의 탐지 성능을 분석하기 위한 시스템 모델을 분석한다. 그림 3은 차량용 FMCW 레이더 시스템의 개략적인 디지털 송수신 구조를 나타내고 있다. FMCW 레이더 송신부에서는 LFM(Linear Frequency Modulation) 전송 신호를 생성하여, RF 모듈을 통해 목표물로 송신한다.

또한 목표물로부터 수신된 레이더 전송 펄스에 대응하는 레이더 반사 펄스는 RF 모듈의 믹서와 곱해져서 수신된 신호는 아날로그-디지털 변환기를 통해서 디지털 신호로 변환된다. 디지털 신호처리부에서 고속

푸리에 변환기를 통해서 RF 모듈에서 수신된 신호의 주파수를 측정하고 최종적으로 차량용 FMCW 레이더 시스템이 목표물과의 상대 거리를 인식할 수 있게 된다.

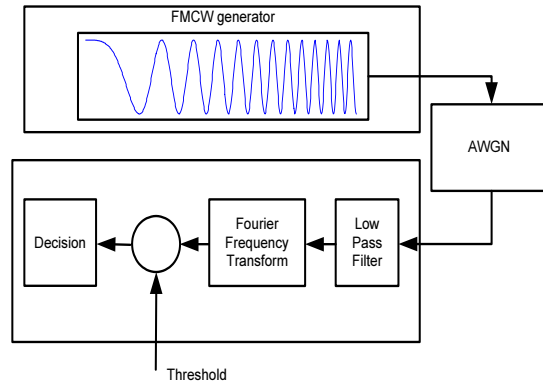


그림 3. FMCW 레이더 신호처리 구성도
Fig. 3 FMCW radar signal processing block diagram

3.2 FMCW 레이더 신호 모델

본 절에서는 FMCW 레이더에서 송신 신호와 상관된 수신 신호를 기술한다. FMCW 송신신호는 식 (2)와 같이 표현한다.

$$w(t) = \cos(2\pi(f_0t + \frac{B}{2T}t^2)), 0 \leq t \leq T(2)$$

여기서 B는 200MHz 대역폭이고 T는 FMCW 신호 폭이며 33us이다.

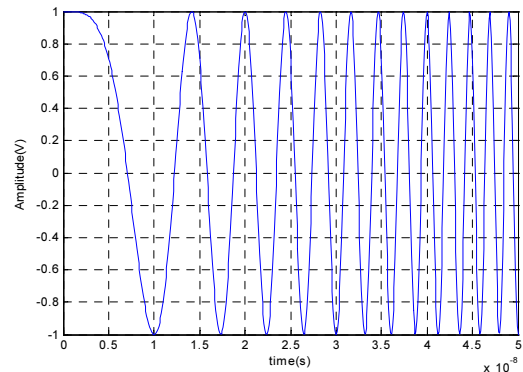


그림 4. 시간 영역에서의 FMCW 송신 신호
Fig. 4 FMCW transmitted signal in the time domain

식 (3)는 식 (2)에서 나타내고 있는 FMCW 신호의 수신신호는 다음과 정의한다.

$$r(t) = a \cos \left[2\pi \left(f_0 \left(t - \frac{2R}{c} \right) + \frac{B}{2T} \left(t - \frac{2R}{c} \right)^2 \right) \right] + n(t) \quad (3)$$

여기서, a 는 수신 신호의 진폭이며, τ 는 반사체에서 의한 시간 지연을 나타내며, R 은 반사체의 거리이고, c 는 빛의 속도이며, $n(t)$ 는 가우시안 잡음을 나타내며, $\frac{n_0}{2}$ 의 파워 스펙트럼 밀도를 의미한다.

수신부에서는 식 (3)의 수신 신호가 믹서기를 통해서 송신 신호와 곱해진 후 저주파 대역 통과 필터를 지나게 되면, 수신 신호는 반사체의 시간 지연에 비례해서 일정 주파수를 갖는 정현파 신호로 변하게 된다[9]. 이 때, 정현파 신호의 주파수는 다음과 같다.

$$s(t) = a \cos \left[\left(\frac{4\pi BR}{cT} \right) t + f_0 \frac{4\pi R}{cT} \right] \quad (4)$$

식 (4)에서 나타난 정현파 신호의 주파수를 고속 푸리에 변환기 모듈을 통해서 탐지하게 되면, 레이더와 반사체와의 거리를 계산할 수 있다.

IV. 시뮬레이션 결과 고찰과 구현

4.1 FMCW 레이더의 아날로그-디지털 변환기 비트 수에 따른 영향

본 절에서는 FMCW 레이더의 아날로그-디지털 변환기 비트수에 따른 성능 분석을 하였다. 시스템 모델은 참고문헌 [12]에서 제시된 모델을 사용하였다. 아날로그-디지털 변환기의 양자화는 3비트에서 7비트까지 진행하였으며, 양자화된 아날로그-디지털 변환기 값은 아날로그 값에서 디지털 값의 가장 가까운 값 중 높은 (Ceil) 값으로 설정하였으며, 오버플로우(Overflow) 값은 포화시켰다(Saturate). 오류확률은 10^{-2} 로 설정하여 시뮬레이션을 진행하였다. 그림 5를 통해서, FMCW 레이더의 탐지 성능에 영향을 미치지 않는 아날로그-디지털 변환기 비트수는 최소 6비트라고 판단됨을 알 수 있다.

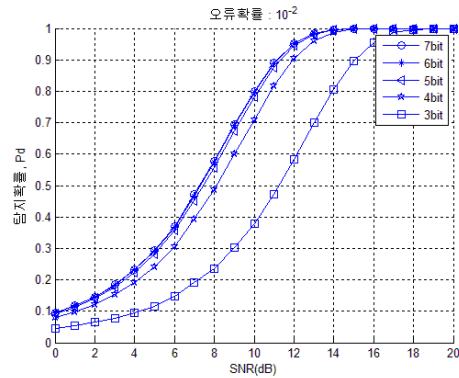


그림 5. 아날로그-디지털 변환기 비트 수에 따른 탐지 성능 결과

Fig. 5 The detection probability based on analog-digital converter bit

4.2 FMCW 레이더의 도플러 주파수 영향

본 절에서는 FMCW 레이더의 도플러 주파수가 탐지 성능에 미치는 영향에 대해서 기술한다. 도플러 주파수가 고정된 값이라고 가정하였을 때, 수신기에서는 수신 신호와 기준 신호사이의 부정합으로 인한 주파수 오차가 발생하게 된다. 이는 탐지 성능에 영향을 미치지 때문에 시스템의 도플러 주파수 스펙을 결정해야 한다. W band의 시스템 파라미터는 T가 33us, BW를 200MHz로 정하였다. 1m와 1.75m의 반사체에서 반사되는 FMCW 레이더 수신 신호의 주파수는 각각 250KHz, 444KHz이다. 이때, 1m에서 수신되는 신호에서 도플러 주파수에 따른 최대값으로 정규화시킨 고속 푸리에 변환기 결과는 그림 6에서 나타내었다.

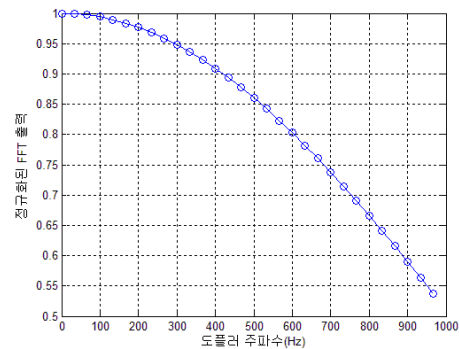


그림 6. 도플러 주파수에 따른 고속 푸리에 변환기 결과
Fig. 6 FFT result based on Doppler frequency

그림 7은 도플러 주파수에 따른 탐지 성능에 대해서 나타내고 있다. 오류 확률은 10^{-2} 로 설정했다. 도플러 주파수가 약 38KHz 이내인 경우 탐지 성능이 거의 미치지 않는다.

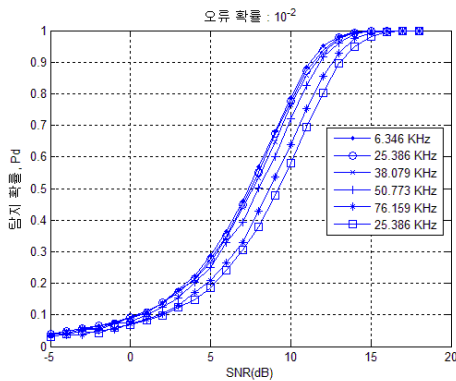


그림 7. 도플러 주파수에 따른 탐지 성능 영향
Fig. 7 The effect of detection performance based on Doppler frequency

4.2 FMCW 레이더 신호처리부 설계 및 구현

본 절에서는 FMCW 레이더의 거리 탐지 모듈의 신호 처리부를 설계 및 구현을 진행하고자 한다. FMCW 레이더의 RF 모듈은 W 대역의 중심주파수와 B는 200MHz의 스펙으로 구현하였다. 거리분해능은 0.75m을 갖도록 설계되었고, 이를 위한 FMCW 레이더 파라미터는 표 1과 같다.

표 1. FMCW 레이더 파라미터
Table. 1 FMCW radar parameters

항목	값
주파수 대역폭(B)	200MHz이하
샘플링 주파수(fs)	5Msps
신호 폭(T)	33us
고속 푸리에 변환기 길이(N)	256 point

신호처리부의 기능은 3절의 그림 3과 같이 진행하였으며, 제시된 파라미터를 만족하고 다양한 기능을 시험할 수 있도록 주요부분을 FPGA(field programmable gate array)로 구현하였다. 먼저, 아날로그 처리부를 살펴보면,

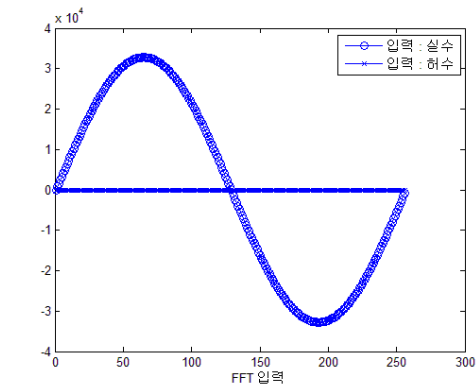
수신신호는 FMCW 레이더의 비트주파수 신호이며 수 MHz 이내로 존재한다. 따라서, 수신부 아날로그-디지털 변환기는 14비트, 50Msps인 Analog device사의 AD9252를 사용하여 구현하였다. AD9252의 스펙은 50Msps의 샘플링 속도에서 약 93.5mW의 전력을 사용하며, SNR는 73dB 정도 갖으며, 2Vp-p의 신호를 수신받아 디지털 신호로 변환할 수 있다. 송신신호는 Analog device사의 AD9910의 집적 디지털 신디사이저 칩의 디지털 램프 모듈레이션 모드를 이용하여 선형적인 FMCW 송신 파형을 만들었다.

집적 디지털 신디사이저 칩의 스펙은 1Gsps의 샘플링을 할 수 있으며, 14비트 디지털-아날로그 변환기를 포함하고 있다. 위상 잡음은 -125dBc/Hz @ 1KHz offset(400MHz carrier)를 갖는다. 디지털 변환된 신호를 신호처리하기 위해서 사용된 FPGA는 Xilinx사의 XC5VLX330-FF1760를 사용하였으며, 추후 신호처리의 확장성을 고려하여 고속 동작의 대용량 FPGA를 사용하였다. 주요기능은 아날로그-디지털 변환기 신호의 주파수를 추출하기 위한 고속 푸리에 변환기와 고속 푸리에 변환기의 결과에서 거리를 추출하기 위한 임계치 탐지기를 수행한다.

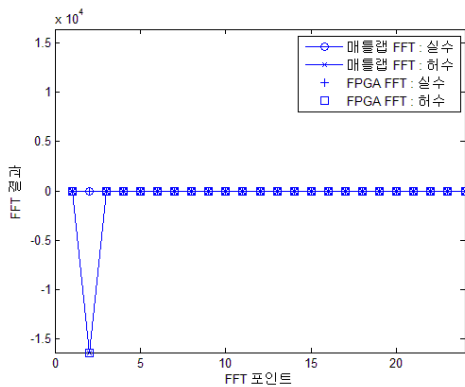
디지털 신호처리의 핵심 기술인 고속 푸리에 변환기를 설계하기 위해서 Xilinx사에서 제공하는 FFT LogiCore를 사용하였다. FFT LogiCore는 입력 비트를 8에서 34까지 변경할 수 있으며, Pipelined, streaming I/O 방식, Radix-4 Burst I/O방식 그리고 Radix-4 Burst I/O방식 등을 사용할 수 있으며, 본 논문에서는 FPGA 내부 블록래프 slice를 작게 사용하면서도 처리 속도가 빠른 Pipelined, streaming I/O방식을 사용하였다. 본 논문을 위해서 설계된 16비트와 256-point 고속 푸리에 변환기의 하드웨어 성능은 DSP slice를 24개 사용하였으며, 18K 블록래프를 2개 사용한다. 처리 속도는 256-포인트 고속 푸리에 변환기를 수행하는 데 861 사이클을 필요로 하였으며, 50MHz의 클럭속도로 환산하면, 약 17.22us의 처리 시간이 걸린다.

그림 8은 FPGA에서 개발된 256-포인트 고속 푸리에 변환기를 검증하기 위해서 고속 푸리에 변환기의 실수부에 사인파를 입력으로 하고, 허수부에 0을 입력으로 하였다. FPGA내의 256-포인트 고속 푸리에 변환기의 결과는 매투프로 수행한 결과의 오차값이 최대 $1/2^{16}$ 만큼 나왔다. FFT는 범용적으로 많이 사용하기 때문에,

기존의 연구에 따른 FFT의 결과는 매텔랩에 정의되어 있으며, 이와 비교하였을 때 개발된 FFT는 문제없이 사용될 수 있음을 알 수 있다. 그림 9은 FPGA에서 개발된 256-point 고속 푸리에 변환기의 결과를 Xilinx사의 ISE 프로그램에서 결과 파형을 나타내고 있다. 이 결과는 그림 8의 (b)의 결과에서 나타내었다.



(a)



(b)

그림 8. (a) 256-포인트 고속 푸리에 변환기 입력 값 (b) FPGA 고속 푸리에 변환기결과와 매텔랩 고속 푸리에 변환기 결과 비교 결과

Fig. 8. (a) 256-point FFT input (b) FPGA FFT results and matlab FFT results

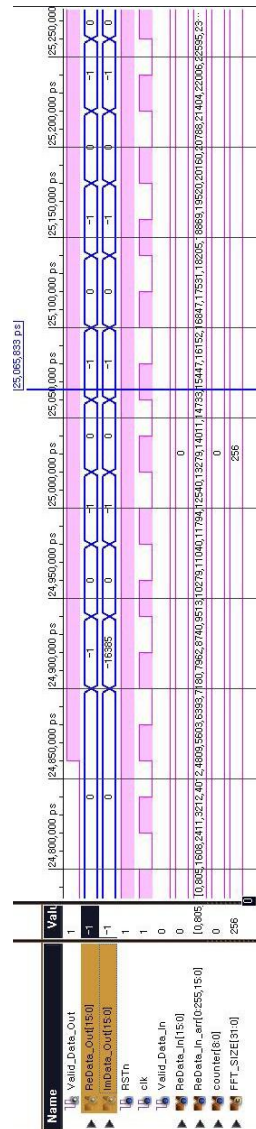


그림 9. FPGA의 고속 푸리에 변환기 결과

Fig. 9. the FFT results of FPGA

V. 결론

본 논문에서는 차량용 FMCW 레이더의 도플러 주파수와 아날로그-디지털 변환기 비트 수에 따른 탐지 성능 분석 및 신호처리부 설계 및 구현을 진행하였다. 탐지 성능 평가를 위한 FMCW 레이더의 시스템 모델

은 송신부와 수신부로 구성하였으며 채널은 가우시안 잡음 환경을 사용하였고, 분석과 시뮬레이션을 통해서 시스템 모델을 검증하였다. 수신부에서 도플러 주파수에 의해서, 기준 신호와 수신 신호사이의 부정합으로 인한 주파수 오차에 의해서 FMCW 신호는 도플러 주파수가 약 38KHz이내인 경우 탐지 성능의 열화가 발생하지 않음을 알 수 있었다. 아날로그-디지털 변환기 비트에 따른 탐지 성능은 6비트가 최소의 비트로 결정할 수 있음을 알 수 있었다. 마지막으로 FPGA를 이용하여 디지털 송신 파형 발생기를 위한 집적 디지털 신디사이저 칩을 기반한 FMCW 레이더 신호처리부를 설계 및 구현을 진행하였다. 향후 본 논문에서 제시된 도플러 주파수와 아날로그-디지털 변환기의 결과를 적용하여 차량용 FMCW 레이더가 개발될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 2010년도 국방과학연구소의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

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 기술 동향", 전자통신동향분석 제 22권 제 5호 2007년 10월.

[3] 오우진, "FMCW 방식의 자동차 레이더 신호처리부 설계 및 구현", 전자공학회논문지 제 41권 제 TC편 제 12호, 2004년, 12월, pp. 67~74.

[4] 현유진, 오우진, 이종훈, "77GHz 차량용 레이더 신호처리부 구현", 대한전자공학회 하계종합학술대회, 2009년, 7월, pp. 1119~1120.

[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 and R. Mende, "Waveform Design Principles for Automotive Radar Systems", in CIE Int. 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, pp. 109-114.

[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] B. R. Mahafza, "Radar Systems Analysis and Design using Matlab," Chapman & Hall/CRC, 2000

[10] 김민준, 천이환, 김주현, "real FFT를 이용한 FMCW 레이더 신호처리," 한국해양정보통신학회논문지, 제 11권 제 12호, 2007년, pp.2227~2232.

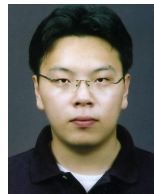
[11] 오우진, 이종훈, "차량용 FMCW 레이더 신호처리부 개발 및 주행시험," 한국해양정보통신학회논문지, 제 14권 제 7호, 2010년, pp.1565~1571.

[12] S. D. Kim and J. H. Lee, "Performance analysis of LFM-UWB radar based on Doppler frequency", International Conference on ICT Convergence(ICTC), Nov., 2010, pp.297~298.

[13] S. M. Kay, "Fundamentals of statistical signal processing, Volume 2: detection theory," Prentice Hall, 1993, pp. 67-70.

저자소개

김상동(Sang-Dong Kim)



2004년 한양대학교
전자컴퓨터공학부 공학사
2006년 한양대학교 전자통신전파
공학화 공학 석사

현재, 대구경북과학기술원 연구원
※관심분야: UWB, 차량용 레이더, 통신용 신호처리



현유진(Eugin Hyun)

1999년 영남대학교 전자공학과
공학사
2001년 영남대학교 전자공학과
공학 석사

2005년 영남대학교 전자공학과 공학 박사
현재, 대구경북과학기술원 선임연구원.
2007년~현재 영남대학교 전자공학과 겸임교수
※ 관심분야: 레이더 신호처리, 디지털 신호 프로세서
설계



박상현(Sang-Hyun Park)

1990년 한국과학기술대학
전자공학과 학사
2001년 충남대학교 전과공학과
석사

1990년~현재 국방과학연구소 연구원
※ 관심분야: 레이더, RF 회로설계, 디지털 신호처리



이종훈(Jong-Hun Lee)

1996년 성균관대학교 전자공학과
공학사
1998년 성균관대학교 전기전자
컴퓨터공학과 공학 석사

2002년 성균관대학교 전기전자컴퓨터공학과 공학박사
2002년~2005년 삼성전자 통신연구소 책임연구원
2005년~현재, 대구경북과학기술원 과제책임자/
선임연구원.
2007년~현재, 영남대학교 정보전자공학부 겸임교수
※ 관심분야: 레이더/비전 융합신호처리, 차량용
레이더



최준혁(Jun-Hyeok Choi)

2007년 경북대학교 전자전기
컴퓨터학부 공학사
2009년 경북대학교 전자전기
컴퓨터학부 공학석사

현재, LIG넥스원 ISR 연구센터 주임연구원
※ 관심분야: 레이더 신호처리, 디지털 신호처리



박정호(Jung-ho Park)

1988년 연세대학교
전자전산기공학사
1990년 연세대학교
전자전기공학과 석사

2001년 포항공대 전자전기 공학과 박사
현재, LIG넥스원 ISR 연구센터 수석연구원
※ 관심분야: 레이더 신호처리, 레이더 체계공학