

차량 충돌 방지를 위한 FMCW 레이더 설계 및 DSP 구현

김양수*, 오우진*, 오상철**

* 금오공과대학교 전자공학부, ** 정보산업

Implementation and Design of FMCW radar for Automotive Collision Warning

Yang-Su Kim*, Woo-Jin Oh*, Sang-Chul Oh**

* Dept. of Electronic Eng., Kumoh National University of Technology, ** Sung-Bo Inc

wjoh@knut.kumoh.ac.kr

본 논문은 산학연 공동 기술개발 지역 컨소시엄 연구개발사업의 지원 결과임

요약

본 논문에서는 차량 충돌 방지 시스템으로 많이 사용되고 있는 밀리미터파를 이용한 FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave) 레이더의 신호 처리부를 분석 및 설계하였고, 설계한 레이더의 파라미터 값들을 이용하여 선행 차량의 거리와 속도 정보를 검출하는 신호 처리 과정을 시뮬레이션 해 보았다. 최종적으로 FMCW 레이더의 신호 처리부를 TI사의 TMS320C31 DSP을 이용하여 하드웨어로 구현하였다.

1. 서론

오늘날 자동차의 급격한 보급과 더불어 교통사고로 인한 인적, 물적 피해가 기하급수적으로 늘어나면서 커다란 사회 문제로 대두되고 있다. 교통사고의 발생 원인 중 70~90%가 운전자의 부주의에 의해서 일어난다. 이러한 여러 가지 교통 문제들을 해결하기 위해서 선진국을 중심으로 지능형 교통시스템(ITS: Intelligent Transport System)의 도입이 적극적으로 추진되고 있다[1-3].

본 논문에서는 ITS의 한 방법으로 활발히 연구되고 있는 FMCW 레이더를 이용한 차량 충돌 경고 시스템의 신호 처리부를 분석 및 설계하였다. 상대 차량의 정확한 거리와 속도 검출을 위하여 신호 처리의 보간(Interpolation) 알고리즘을 이용하여 FMCW 레이더의 신호 처리 과정을 시뮬레이션 하였다. 최종적으로 TI사의 TMS320C31 DSP를 이용하여 FMCW 레이더 신호 처리부를 하드웨어로 구현하였다.

2. FMCW 레이더

밀리미터 파장대의 안테나 설계, 제작 및 MMIC(Monolithic Microwave Integrated Circuit) 기술의 눈부신 발전으로 자동차 충돌 방지용 레이더로 24GHz~77GHz 대의 밀리미터 파를 이용한 FMCW 레이더가 많이 사용되고 있다. 밀리미터

파는 전반손실이 크므로 불필요한 반사에 의한 오동작과 간섭 문제를 줄일 수가 있고, 회로와 안테나가 소형화됨으로써 차량 탑재가 쉽다. 특히 안개나 우천시에도 사용이 가능하므로 현재 차량용 레이더에서 많이 사용되고 있다[4-5].

FMCW 레이더의 구성은 그림 1과 같이 크게 RF 모듈부와 디지털 신호 처리부로 나눌 수 있다. RF 모듈부는 송신 주파수를 삼각파 또는 그와 가까운 파형으로 FM 변조하여 목표물로부터 반사된 반사파와 혼합시켜 비트 주파수(f_b)를 얻는다.

디지털 신호 처리부는 레이더 센서로부터 입력받은 비트 주파수를 사용하여 목표물까지의 거리나 목표물과의 상대속도를 검출하여 운전자에게 선행 차량에 대한 정보를 제공한다.

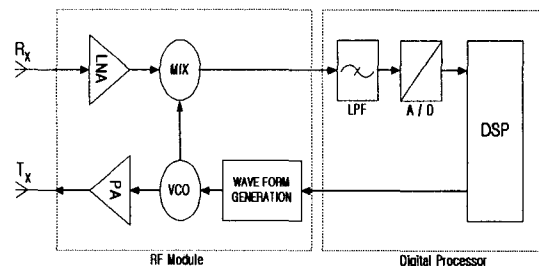


그림 1. FMCW 레이더 시스템 블록도

3. FMCW 레이더 신호 처리부

FMCW 레이더에서 송신 주파수는 그림 2(a)와 같이 시간의 함수로 변화하므로, 거리 R 만큼 떨어진 곳에 선행 차량이 존재할 경우, 에코 신호는 그림 2(a)의 점선과 같이 $T=2R/C$ 시간 후에 귀환된다. 여기서, C는 광속을 나타낸다.

FMCW 레이더 센서를 이용한 선행 차량들의 상대 속도와 거리는 Down_Sweep 구간과 Up-sweep 구간의 비트 주파수에서 구할 수 있다. 선행 차량의 속도와 자차의 속도가 같을 경우 Down_Sweep 구간과 Up-sweep 구간의 비트 주파수는 그림 2(a)와 같이 수신 주파수(f_r)와 일치하고, 만약 상대 차량의 속도와 자차의 속도가 다를 경우 Down-sweep 구간과 Up-sweep 구간에서 그림 2(b)와 같이 Doppler 주파수에 의해 영향을 받는다. 상대 차량의 속도 정보가 포함된 Doppler 주파수는 Up-sweep 구간과 Down-sweep 구간의 비트 주파수의 차로 간단히 구할 수 있다.

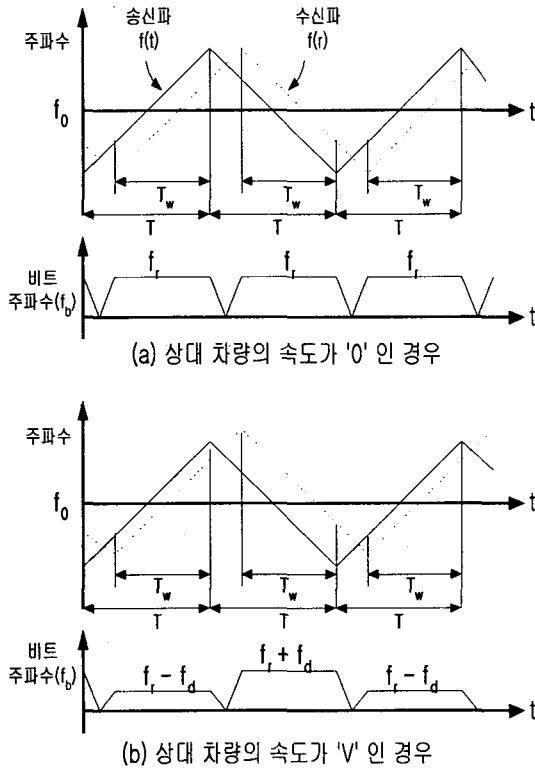


그림 2. FMCW 레이더에서 주파수와 시간관계[6]

3.1. 거리 및 속도 검출

거리와 속도를 검출하기 위해서 송수신 주파수를 곱하여 나오는 비트 주파수를 구해보자. 측정 시간 t에

서의 송신 신호는

$$t_x = \cos(2\pi(f_1 + f_2(t)) \cdot t) \quad (1)$$

와 같고, 왕복 지연(Round_trip Delay : ΔT)된 수신 신호는

$$r_x = \cos(2\pi(f_1 + f_2(t - \Delta T)) \cdot (t - \Delta T)) \quad (2)$$

와 같이 표현된다. 두 신호의 주파수 차를 구하기 위해 식 (1)과 식 (2)를 곱하면,

$$X = \cos(2\pi((f_b \cdot t + (f_1 - f_b)\Delta T + f_2(t) \Delta T)) \quad (3)$$

와 같이 된다. 이때 $(f_1 - f_b)\Delta T$ 는 시간 t와 무관한 상수이므로 이를 Φ 로 놓고, 측정 시간 t의 범위에서 $f_2(t)$ 는

$$f_2(t) = \frac{f_m}{t_m} \cdot t \quad (4)$$

이므로, 식 (3)은

$$X = \cos(2\pi(f_b \cdot t + \frac{f_m}{t_m} \cdot t \cdot \Delta T + \Phi)) \quad (5)$$

가 된다. 또한 FMCW 레이더의 송수신 신호는 아래의 그림 3과 같이 삼각 함수관계를 갖고 있으므로, 식 (5)는 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} X &= \cos(2\pi(f_b + \frac{f_m}{t_m} \cdot t \cdot \frac{f_b}{f_m} \cdot t_m + \Phi)) \\ &= \cos(2\pi(2 \cdot f_b \cdot t + \Phi)) \\ &= \cos(2\pi(2 \cdot f_b \cdot t) + \Phi) \end{aligned} \quad (6)$$

그러므로 신호처리부에 수신되는 신호는 FFT 등을 이용하여 f_b 를 찾아 낼 수 있게 된다.

FMCW 레이더에서 선행 차량과 자차의 속도가 다를 경우 Doppler 주파수(f_d)와 수신 주파수(f_r)는 다음과 같이 정의된다

$$f_d = \frac{f_b(Down) - f_b(Up)}{2} \quad (7)$$

$$f_r = f_b(Down) - f_d \quad (8)$$

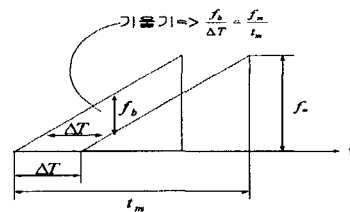


그림 3. FMCW 레이더 원리

식 (6), (7)과 식 (8)을 이용하여 선행 차량의 거리(R)와 선행 차량의 절대 속도(V_1)를

$$R = \frac{c \cdot T_w \cdot f_r}{2 \cdot BW} \cdot \frac{1}{2} \quad (9)$$

$$V_1 = V_r + V_2 \quad (10)$$

와 같이 표현할 수 있다. 식 (10)에서 V_2 는 자차의 속도이고, V_r 은 선행 차량의 상대 속도로서

$$V_r = \frac{c \cdot f_d}{2 \cdot f_c} \quad (11)$$

와 같이 Doppler 주파수를 이용하여 구할 수 있다[7-8].

3.2. FMCW 레이더 신호 처리부의 분석 및 설계

FMCW 레이더에서 선행 차량들의 거리와 속도를 검출하기 위해서는 신호 검출을 위한 파라미터 값들을 설정하여야 한다. 이러한 파라미터 값들로는 레이더 센서와 관련된 중심주파수(f_c), 주파수 대역폭, sweep 시간이 있고, 신호 처리 알고리즘과 관련된 샘플링 주파수(f_s), FFT 길이(N), 최대/최소 측정거리 및 측정 속도와 거리/속도 분해능 등이 있다. 이러한 파라미터 값들은 상호간에 대립된 관계를 갖고 있으므로 설계하고자 하는 레이더의 조건을 만족하도록 적당한 값을 설정하여야 한다.

레이더 센서의 파라미터 값들이 정해지면 상대 차량의 속도와 거리 측정 알고리즘에서 거리와 속도 분해능, 그리고 측정 데이터의 정확도가 중요한 요소로 작용하게 된다. 거리 분해능(ΔR)과 상대 속도 분해능(ΔV_r)은 아래의 식과 같이 표현된다[7].

$$\Delta R = \frac{c \cdot T_w \cdot \Delta F}{2 \cdot BW} \quad (12)$$

$$\Delta V_r = \frac{c \cdot \Delta F}{2 \cdot f_c} \quad (13)$$

식 (12), 식 (13)에서 레이더 센서의 파라미터 값들인 관측시간(T_w), 관측 시간 동안의 sweep 대역폭(BW) 그리고 f_c 가 고정되어 있다면, ΔR 과 ΔV_r 은 주파수 분해능($\Delta F = f_s/N$)에 비례하고, 주파수 해상도를 높이기 위해서는 N 을 크게 해야 한다. 그러나, N 이 증가할 수록 프로세서의 연산 시간과 데이터 획득시간이 길어져 실시간 처리가 어렵게 된다. 이런 경우, 해상도를 높이기 위한 방법으로 신호 처리부에서 FFT를 수행한 후에 보간(Interpolation) 알고리즘을 적용하는 방법이 있다.

본 논문에서는 FMCW 레이더를 설계하기 위해서 파라미터 값들을 표 1과 같이 설정하였으며, 표 2는 설정된 파라미터 값들을 이용하여 이론적으로 구한 거리와 주파수 분해능을 ICC (Intelligent Cruise Control)의 요구 사항과 비교하였다[9].

표 1. 파라미터 설정 값

중심주파수(F_c)	24GHz
주파수 대역폭(BW)	300MHz
관측 시간(T_w)	2ms
샘플링주파수(f_s)	1MHz
FFT Point	1024

표 2. 성능 비교

	설계된 레이더	ICC
거리 분해능	0.976m	1m 이하
속도 분해능	6.1 m/s	25m/s 이하

4. TMS320C31 DSP을 이용한 하드웨어 구현

신호 처리부는 비트 주파수를 사용하여 상대 차량의 거리와 속도를 검출하므로 FFT 계산 시간에 따라 레이더의 Update Rate가 결정된다. 차량 충돌 방지 시스템으로 사용되는 레이더는 10Hz~20Hz정도의 Update Rate를 가져야 하므로 고속의 DSP 전용 칩을 사용하여야 한다. 20MIPS로 동작하는 TMS320C31 DSP를 사용하여 FFT를 수행하는 경우, 연산시간은 표 3과 같다[10].

표 3. FFT 수행 시간(단위:ms)

Transform Size	Radix-2 complex FFT	Radix-2 Real FFT
256	0.453	0.215
512	0.991	0.476
1024	2.175	1.055

구현된 FMCW 레이더 신호 처리부 구성은 그림 4와 같고, TI사의 TMS320C31 DSP에 의해 FFT와 신호 처리 등 주프로그램이 수행된다. 입력 비트 신호는 1MHz의 A/D 변환기로 디지털 신호로 변환되고, 변환된 데이터는 고속의 DSP와 속도를 매칭하기 위해 FIFO에 FFT를 수행하는 데이터 길이 만큼 임시로 저장된 후 SRAM으로 다시

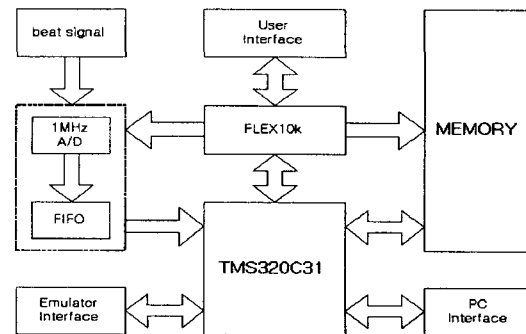


그림 4. 하드웨어 Block도

저장되어 계산된다. 또한, 어드레스 디코더, 입출력 장치, 그리고 기타 주변 장치와 인터페이스를 수행하기 위하여 ALTRA사의 FLEX 10K를 사용하였다

그림 5는 FMCW 레이더 신호 처리 보드의 실물 사진을 보여주고 있으며, 구현된 보드의 사양은 아래와 같다.

- ▶ TMS320C31-60MHz(30MIPS) 부동소수점 연산 DSP 칩.
- ▶ 64K word의 zero wait-state SRAM
- ▶ 84-Pin PLCC EPF10K10
- ▶ 1MHz A/D 및 2K × 9 FIFO
- ▶ User interface 및 기타 주변 장치

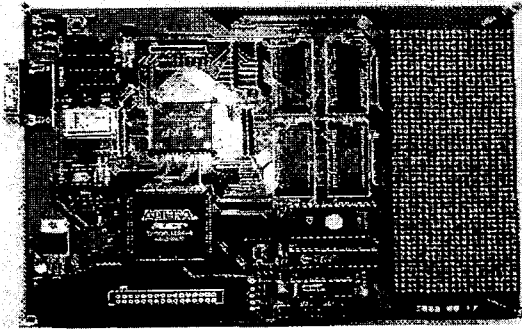


그림 5 FMCW 레이더용 신호처리 보드

5. 모의 실험

그림 6과 표 4는 선행 차량이 73m 전방에 존재하고 선행 차량과 자차의 속도가 같은(Doppler 효과가 일어나지 않는) 경우를 가정한 모의 실험 결과이다. 실험 환경은 표 1에서 제시한 FMCW 레이더의 파라미터 값들을 사용하였으며 보간 기법은 cubic spline을 사용하였다.

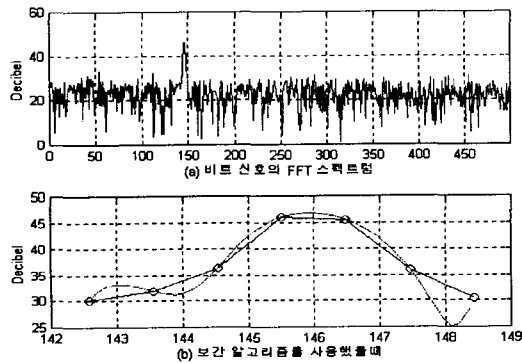


그림 6. 시뮬레이션 결과

표 4. 주파수 정확도 비교

	비트 주파수(KHz)
이론 값	146
보간 전	145.508
보간 후	145.978

6. 향후 계획

현재 상용화된 레이더 센서부와 구현된 신호 처리부를 이용하여 필드 테스트를 준비중에 있다. 향후 필드 테스트를 통하여 차량용 충돌 방지 레이더에서 가장 문제가 되는 커브 길에서 도로변의 물체와 인접차량에 의한 오동작 방지 및 자신의 주행 차선상의 장애물을 정확하게 탐지할 수 있는 신호 처리 알고리즘을 개발할 계획이다.

References

- [1] K. Yi, "An Experimental Investigation of a CW/CA System for Automobiles Using Hardware in-the-Loop Simulations," *Proc. of the American Control Conference*, Jun. 1999.
- [2] R. Dixit. "Radar Requirements and Architecture Trades for Automotive Applications," *IEEE MTT-S International Microwave Symposium Digest vol. 3*, Jun. 1997.
- [3] W. David "FMCW MMW Radar for Automotive Longitudinal Control," *California PATH Research Report*, 1997.
- [4] B. E. Tullsson. "Digital Interference Suppression in An Automotive FMCW Radar," *Proc. of ICSPAT vol 1*, Sep. 1997.
- [5] M. E. Russell, "Millimeter-Wave Radar Sensor for Automotive Intelligent Cruise Control(ICC)," *IEEE Trans Microwave Theory Tech.* vol 45, Dec. 1997.
- [6] 정만영, 밀리미터파 공학, 보성문화사, 1999.
- [7] 백종현, FMCW 레이더를 이용한 차량 충돌 경보 시스템의 신호 처리 기술, 석사 논문, 광주과학기술, 1996.
- [8] M.Vossiek, "Signal Processing Methods for Millimeterwave FMCW Radar with High Distance and Doppler Resolution," *Proc. of the 27th European Microwave Vol 2*, Sep. 1997.
- [9] D. R. "Microwave and Millimeterwave Applications in Automotive Electronics-Trends," *Journal of the Franklin Institute*, Jan. 1998.
- [10] TMS320C31 USER GUIDE, TI, 1993.