

논문 2004-41TC-12-10

FMCW방식의 자동차 레이더 신호처리부 설계 및 구현

(Design and Implementation of DSP module for Automotive Radar System using FMCW)

오 우 진*

(Woo-Jin, OH)

요 약

ITS를 위한 차량 충돌 방지 시스템인 FMCW 방식의 자동차 레이더를 분석하고 이에 적합한 신호처리부를 설계하고 구현하였다. 77GHz 대역의 FMCW 레이더에 대하여 성능 파라미터를 거리와 속도 해상도가 각각 0.4m, 0.67Km/h이 되도록 설계하였으며, 다중 물체의 검출을 위한 다수의 비트주파수를 조합하는 방법에 대하여 검토했다. 또한 거리 주파수인 f_r 과 속도 주파수 f_d 의 범위를 다르게 설정하여 다중 물체의 처리가 훨씬 간단해지는 것을 보였다.

다중 물체들의 거리차로 인한 감쇄를 보정하도록 미분기를 전처리단에 사용하여 ADC 비트수를 8bit로도 충분히 검출할 수 있음을 보였다. 제안한 방법과 설계한 파라미터 값들을 사용하여 Matlab으로 모의실험으로 검증하고 DSP와 마이크로프로세서를 이용하여 구현하였다.

Abstract

We design and implement the DSP module for automotive radar using FMCW. The designed parameters are based on 77GHz FMCW radar, and show the resolution of 0.4m and 0.67km/h in distance and velocity, respectively. For detecting multiple targets, we discuss the relationship between f_b 's and targets. In addition, we show that the detection of multiple targets is very simple when the range of f_r is sufficiently larger than that of f_b .

In the front of ADC, the 2nd order differentiator is applied for reducing the effects of path-loss so that the ADC bits are reduced to 8 bits. The designed block is simulated in Matlab and implemented with DSP and micro-processor.

Keywords : FMCW, Automotive Radar, ITS

I. 서 론

전방 차량 충돌방지 시스템은 지능형 교통 시스템(ITS: Intelligent Transportation System)의 한 분야인 AVHS(Advanced Vehicle and Highway System)로 분류하여 선진 각국에서 다양하게 연구되고 있다^{[1]-[10]}. 충돌방지 시스템은 자동차에 장애물 감지 센서를 장착하여 전방 및 측방의 장애물을 인식하고 거리 및 상대속도를 측정하여 충돌을 방지하는 것을 목적으로 하고 있

다.

장애물 감지센서로는 최대 탐지 거리, 거리 해상도, 물체 판별, 기후, 온도 변화, 비용 등을 고려해서 초음파, 레이저, 영상 카메라, 밀리미터파 레이더 등이 거론되고 있다. 초음파는 후방 감지센서에 많이 사용되었으나 감쇄로 인한 탐지 거리문제로 사용이 어렵고, 레이저 센서는 직진성이 우수하나 안개, 우천 등의 환경에 따라 성능 저하가 나타나고 다중 물체를 인식하기 위해서는 복잡한 스캐닝(scanning) 구조가 필요하다. 영상 카메라는 기술적인 접근이 용이하여 최근의 일부 고급 자동차에 적용되고 있으나 야간, 날씨의 영향을 많이 받으며 거리 측정을 위한 추가 장치가 요구된다. 밀리미터파 레이더는 초고주파를 사용하므로 방사파의 빔 폭이 적정하고, 거리 및 속도 해상도가 높으며 소형화

* 정회원, 금오공과대학교 전자공학부
(Dept. of Electronics Engineering, Kumoh National Institute of Technology)
※ 본 연구는 금오공과대학교 학술연구비 지원에 의하여 연구된 논문입니다.
접수일자: 2004년6월28일, 수정완료일: 2004년11월11일

가 용이한 장점이 있다^{[1]-[2]}. 따라서 본 논문에서는 정방향 충돌방지 시스템에 적합한 밀리미터파 레이더를 이용하여 파라미터 설계 및 신호처리부를 구현하는 방안에 대하여 제시하고자 한다.

밀리미터파 레이더를 이용한 전방 충돌 방지 시스템은 대부분 FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave) 기술을 이용하고 있다. 이 방식은 선형적으로 주파수가 변하는 FM 신호를 송신하여 장애물로부터 반사된 수신 신호와의 주파수 차로부터 거리 정보를 얻는 비교적 간단한 방식으로 구현이 가능하다^[11]. 전방의 물체로부터 반사된 수신신호를 송신신호와 곱하면, 거리에 비례하여 시간 지연이 나타나므로 특정 주파수 성분이 검출되고 이를 비트 주파수(beat frequency)라 한다. FMCW 레이더는 23~139GHz의 초고주파를 사용하므로 직진성이 우수하고 전방 100m에서 1m이내의 빔폭으로 송신이 가능하고 소형화가 가능한 장점이 있다. 현재 거리 해상도를 높이기 위하여 광대역의 선형 변조를 구현하고 저가화 방안에 대하여 많은 연구가 진행중에 있다^{[2]-[10]}.

FMCW 레이더의 성능은 변조 대역폭 및 단위 시간당 주파수 변화, 즉 기울기 등과 같은 RF부의 파라미터에 의해 결정된다. 본 논문에서는 각 파라미터들의 연관성을 살펴보고 일반적인 자동차의 운전환경을 고려하여 100m 내외의 거리 측정이 가능하고, 0.5m 및 5km/h 이내의 거리 및 속도 해상도(resolution)를 갖는 FMCW 레이더의 파라미터를 설계하고자 한다.

FMCW 레이더에서 다중 물체가 존재하는 경우에는 다수의 비트 주파수가 수신되며, 이를 처리하기 위해 기존에는 거리 구간별로 나누어 처리하거나, phase 변화를 이용, 또는 CFAR 방법 등이 제안되어 있다^{[3]-[5]}. 본 논문에서는 다중 물체로 인한 다수의 수신 신호들간에 상호 연관성을 분석하고 여러 조합 중에서 올바른 조합은 하나만 존재한다는 것을 관찰하여 간단히 다중 물체를 분리하는 방안을 제안한다. 이때 적절한 파라미

터 설계가 이루어지면 거리와 속도의 주파수 조합이 훨씬 간단해지는 것을 보이겠다. 또한 거리 차에 따른 수신 신호들 간의 크기 차를 보상하는 미분기를 도입하면 구현이 더 효율적이 될 것이다.

마지막으로 제안된 파라미터에 의한 신호처리부를 Matlab을 통한 모의실험과 TMS320C31 DSP와 마이크로프로세서로 구현한 결과를 제시한다.

본 논문의 구성은 II장에서 FMCW 레이더의 원리 및 설계 파라미터들에 대하여 살펴보고, III장에서는 다중 물체에 대한 신호 검출 방법 및 전 처리 방법에 대하여 제안한다. IV장에서는 제안한 파라미터에 의해 Matlab으로 모의실험 및 DSP로 구현한 결과를 제시하고, V장에서는 결론을 맺도록 하겠다.

II. FMCW 레이더의 동작

FMCW레이더의 기본 블록도는 그림 1과 같다. 시간에 따라 주파수가 선형적으로 변하는 FM 신호를 송신하고 전방의 물체에 반사된 수신 신호에 송신 신호를 곱한다. 저역통과 필터 후에 두 주파수의 합 성분이 제거되고 두 주파수의 차 성분, 즉 비트 주파수 f_b 를 얻을 수 있다. 비트 주파수는 시간 지연에 따라 선형 값이 되므로 거리를 추정할 수 있는 것이다. 이때 송신 신호의 주파수 변화가 그림 2(a)와 같은 경우에는 f_b 로부터 거리뿐만 아니라 상대속도까지 구할 수 있다^[4].

장애물과 송신기 간의 상대 속도가 0인 경우에는 장애물과의 거리에 따른 지연 t_d 가 발생하여 그림 2(a)와 같이 f_b 는 거리 차에 의한 주파수 값인 f_r 이 된다. 그러나 f_b 는 푸리에 변환과 같은 주파수 변환으로 추정하므로 음의 주파수를 구분할 수 없어 $f_b=|f_r|$ 이 될 것이다. 따라서 거리 R과 f_r 의 관계는 다음과 같아진다.

$$f_r = \frac{t_d B}{T} \tag{1}$$

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

여기서 c는 전파의 속도, T는 sweep 시간, B는 변조 대역폭이다.

상대 속도가 0이 아닌 경우에는 도플러 효과에 의한 주파수 편이 f_d 가 발생하게 되며 그림 2(b)과 같이 근접할 때와 (c)의 멀어지는 경우로 나눌 수 있다. 그림에서 살펴보면 각 구간에서의 f_b 는

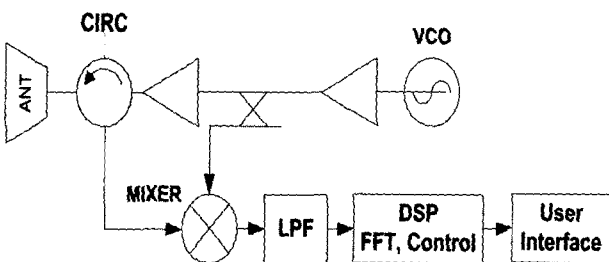


그림 1. FMCW 레이더의 블록도
Fig. 1. Block diagram of FMCW Radar.

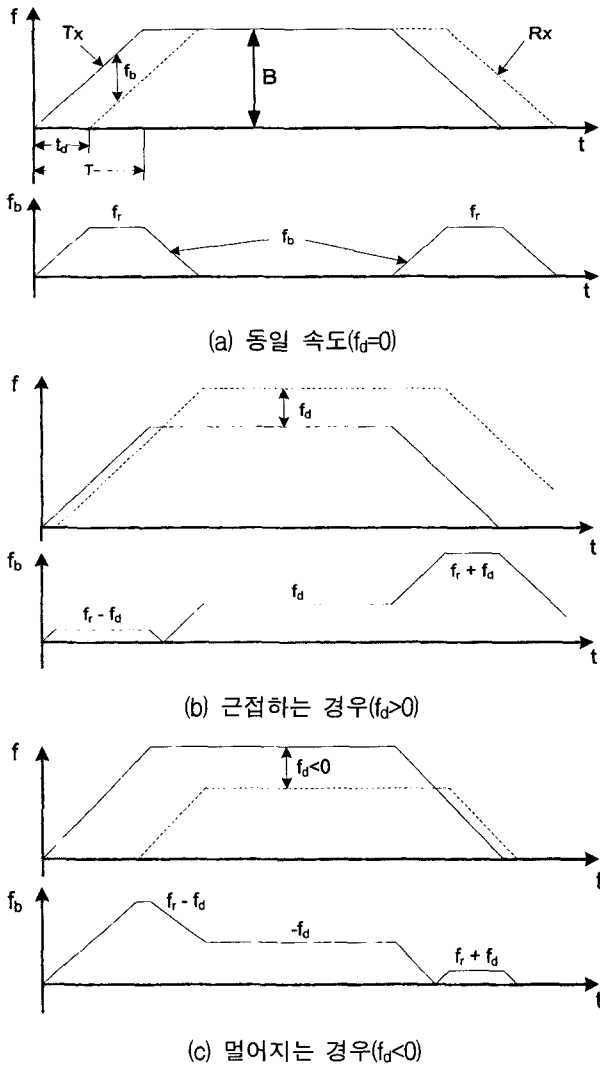


그림 2. 전방 장애물에 따른 fb의 변화
Fig. 2. Variation of fb according to the target.

$$\begin{aligned}
 f_{b,up} &= |f_r - f_d| \\
 f_{b,flat} &= |f_d| \\
 f_{b,down} &= |-f_r - f_d| = |f_r + f_d|
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

이 된다. 이때 $f_r > f_d$ 로 가정하면 f_d 와 f_r 은 다음과 같이 표현된다.

$$f_r = \frac{f_{b,down} + f_{b,up}}{2}
 \tag{3-1}$$

$$f_d = f_{b,flat} = \frac{f_{b,down} - f_{b,up}}{2}
 \tag{3-2}$$

이때 상대속도는

$$V_r = \frac{c \cdot f_d}{2 \cdot f_c}
 \tag{4}$$

이며, 여기서 f_c 는 레이더의 주파수이다. $f_r < f_d$ 인 경우는 도플러 주파수 편이의 작은 오차에 의해서도 거리 추정이 어려워지기 때문에 아래의 레이더 파라미터 설계 시에 $f_r > f_d$ 이 되도록 할 것이다.

식 (1)과 (4)는 거리와 속도 해상도를 나타내며, 그 인자로는 중심 주파수 f_c , 변조 대역폭 B, sweep 시간 T, 비트 주파수의 분해능 등을 들 수 있다. 여기서 FMCW 레이더는 차량에 장착되어 전방 차량과 충돌을 방지한다는 용도를 고려하면 탐지 거리는 100미터 내외, 상대속도는 300Km/h, 0.5m 정도의 거리 구분, 5km/h의 속도 해상도가 적정할 것으로 판단된다. 따라서 이에 적합하도록 파라미터를 설계해보겠다.

FMCW 레이더의 중심 주파수는 대기에 대한 감쇠 특성, 직진성 및 기술적 구현 가능성 등을 고려하여 24~139GHz의 다양한 대역을 연구 중에 있으나, 최근에는 유럽, 미국, 일본 등의 대부분의 나라에서 77GHz 주파수대로 단일화되는 추세이다. 국내에서도 77GHz를 사용할 것으로 예상되어 본 연구에서는 이를 기준으로 설계 및 모의실험 하였다.

변조대역폭은 거리 해상도와 비례하므로 넓은 대역으로 변조하는 것이 유리하지만, 송신회로의 선형 대역폭을 광대역으로 구현하기 위해서는 많은 비용이 요구된다. 그러므로 다른 시스템과 유사하게 300MHz를 사용하는 것을 가정하였다^[10].

Sweep 시간과 f_b 의 분해능은 FFT의 표본 간격과 표본 수에 밀접한 관련이 있다. 거리해상도 Δf_r 을 높이기 위해서는 FFT의 표본 수를 늘려야 하지만, 전체 표본을 얻기 위한 시간이 길어져 오히려 해상도가 저하된다. 표본 주파수를 높이면 데이터 획득 시간은 짧아지지만 FFT후의 Δf 가 커져 해상도가 저하될 것이다. 또한 표본 주파수를 낮추면 sweep 시간이 길어져 역시 해상도가 저하되게 된다.

주파수 해상도를 결정하는 표본화 주파수는 입력 신호의 최대 주파수보다 두 배 이상이 되어야 하므로

$$f_s > 2f_{b,max} = 2(f_{r,max} + f_{d,max})$$

를 만족해야 한다. 본 논문에서는 표 1과 같이 파라미터를 설계하였다. 거리와 속도에 따른 $f_{r,max}$ 와 $f_{d,max}$ 는 각각 390.6KHz, 42.7KHz가 되므로 표본화 주파수는

표 1. 제안된 레이더 파라미터
Table 1. The proposed paramters.

파라미터	설정값	
	상승/하강구간	평탄구간
중심 주파수(F_c)	77GHz	
주파수 대역폭(BW)	300MHz	
거리 해상도	0.4m	-
속도 해상도	13.8Km/h	0.67Km/h
Sweep 시간(T)	>0.512ms	>8.192ms
샘플링 주파수(f_s)	2MHz	200KHz
FFT 길이	1024	4096

표 2. 두 물체가 존재하는 경우의 f_b 조합
Table 2. Combination of f_b for two objects.

조합	$f_{b,up}$		$f_{b,flat}$		$f_{b,down}$	
case I	f_{d1}, f_{d2}	$f_{r1}-f_{d1}$ $f_{r2}-f_{d2}$	f_{d1} f_{d2}	$f_{r1}+f_{d1}$ $f_{r2}+f_{d2}$		
case II	$f_{d1}, -f_{d2}$	$f_{r1}-f_{d1}$ $f_{r2}+f_{d2}$	f_{d1} f_{d2}	$f_{r1}+f_{d1}$ $f_{r2}-f_{d2}$		
case III	$-f_{d1}, -f_{d2}$	$f_{r1}+f_{d1}$ $f_{r2}+f_{d2}$	f_{d1} f_{d2}	$f_{r1}-f_{d1}$ $f_{r2}-f_{d2}$		

표 3. 표 2의 Case I
Table 3. Case I of Table 2.

경우	조합	성립조건
1	a	$ (f_{r1}+f_{d1})-(f_{r1}-f_{d1}) =2f_{d1}$
	b	$ (f_{r2}+f_{d2})-(f_{r2}-f_{d2}) =2f_{d2}$
2	a	$ (f_{r1}+f_{d1})-(f_{r1}-f_{d1}) =2f_{d2}$
	b	$ (f_{r2}+f_{d2})-(f_{r2}-f_{d2}) =2f_{d1}$
3	a	$ (f_{r2}+f_{d2})-(f_{r1}-f_{d1}) =2f_{d1}$
	b	$ (f_{r1}+f_{d1})-(f_{r2}-f_{d2}) =2f_{d2}$
4	a	$ (f_{r2}+f_{d2})-(f_{r1}-f_{d1}) =2f_{d2}$
	b	$ (f_{r1}+f_{d1})-(f_{r2}-f_{d2}) =2f_{d1}$

781.2KHz 이상으로 설계해야 한다. 실제로는 앨리어싱(aliasing)을 방지하기 위하여 2MHz의 표본화 주파수를 사용했으며 데이터 획득시간은 1024 FFT를 사용하는 경우 약 0.5ms가 소요되어 sweep 시간 내에 획득이 가능하다. 이때의 주파수 해상도는 약 976.6Hz가 되며, 거리와 속도 해상도는 약 0.4m, 13.8km/h가 된다. 여기서 속도의 검출 해상도를 높이기 위하여 상대 속도에 의한 f_d 만 존재하는 평탄 구간에서는 표본 주파수를 200KHz, 표본의 개수를 4096개로 설정하였다. 이때의 속도 해상도는 $100KHz/4096=24.4Hz$, 즉 0.67Km/h로 개선된다. 평탄 구간의 경우에는 sweep 시간과 주파수 변위가 존재하지 않는 구간이므로 긴 시간 동안 데이터의 획득이 가능할 것이다. 여기서 설계 규격보다 훨씬 긴 FFT 길이를 사용한 이유는 다음 장에서 설명할 다중 물체의 검출을 용이하게 하기 위함이다.

표 4. 표 2의 Case II
Table 4. Case II of Table 2.

경우	조합	성립조건
1	a	$ (f_{r1}+f_{d1})-(f_{r1}-f_{d1}) =2f_{d1}$
	b	$ (f_{r2}-f_{d2})-(f_{r2}+f_{d2}) =2f_{d2}$
2	a	$ (f_{r1}+f_{d1})-(f_{r1}-f_{d1}) =2f_{d2}$
	b	$ (f_{r2}-f_{d2})-(f_{r2}+f_{d2}) =2f_{d1}$
3	a	$ (f_{r2}-f_{d2})-(f_{r1}-f_{d1}) =2f_{d1}$
	b	$ (f_{r1}+f_{d1})-(f_{r2}+f_{d2}) =2f_{d2}$
4	a	$ (f_{r2}-f_{d2})-(f_{r1}-f_{d1}) =2f_{d2}$
	b	$ (f_{r1}+f_{d1})-(f_{r2}+f_{d2}) =2f_{d1}$

표 5. 표 2의 Case III
Table 5. Case III of Table 2.

경우	조합	성립조건
1	a	$ (f_{r1}-f_{d1})-(f_{r1}+f_{d1}) =2f_{d1}$
	b	$ (f_{r2}-f_{d2})-(f_{r2}+f_{d2}) =2f_{d2}$
2	a	$ (f_{r1}-f_{d1})-(f_{r1}+f_{d1}) =2f_{d2}$
	b	$ (f_{r2}-f_{d2})-(f_{r2}+f_{d2}) =2f_{d1}$
3	a	$ (f_{r2}-f_{d2})-(f_{r1}+f_{d1}) =2f_{d1}$
	b	$ (f_{r1}-f_{d1})-(f_{r2}+f_{d2}) =2f_{d2}$
4	a	$ (f_{r2}-f_{d2})-(f_{r1}+f_{d1}) =2f_{d2}$
	b	$ (f_{r1}-f_{d1})-(f_{r2}+f_{d2}) =2f_{d1}$

앞에서 식 (3)을 $f_r > f_d$ 로 가정하고 각 구간별 비트 주파수로부터 f_r 과 f_d 를 구했었다. 이는 시간에 따른 송신 신호의 주파수변화, 즉 기울기가 크다면, $f_r < f_d$ 인 경우는 거의 발생하지 않으며, 표 1의 파라미터를 사용하는 경우에는 다음과 같아진다.

$$f_r = \frac{2B}{cT}R > f_d = \frac{2f_c}{c}V_r \tag{5}$$

$$28.05 \cdot R > V_r$$

여기서 R의 단위는 m이고, V_r 은 Km/h이다. 이 식이 만족하지 않는 경우는 차량 충돌 방지 시스템에서 일어나면 안 되는 매우 위험한 상황으로, 예를 들면 10m의 거리에 있는 선행차량이 시속 280km/h 이상의 상대속도를 가질 때이다. 일반적인 자동차의 제동거리와 운전 상황을 고려할 때 이 상황이 발생하기 이전에 경고 신호를 발생하게 되는 위험구간으로 인식 될 것이다. 따라서 $f_r < f_d$ 인 경우를 고려하지 않아도 타당하다.

III. 다중 물체의 신호처리

다중물체의 인식을 위해서 기존의 FMCW 레이더에 서는 다수의 FFT 처리부를 두어 거리구간 별, 즉 다수

의 비트주파수 대역으로 나누어 처리하는 방법을 사용하거나, 다소 복잡한 phase 관찰 또는 OS CAR 기법을 제안하고 있다^{[3]-[6]}. 본 논문에서는 신호처리 기법만으로 전방 차량 감지의 환경에서 발생할 수 있는 다중 물체를 인식하는 방법에 대하여 제안하고자 한다.

1. 다중 물체의 속도 및 거리 검출

다중 물체가 존재하는 경우에는 상승/평탄/하강 구간에서 다수의 비트주파수가 나타나게 될 것이다. 이들 중에서 올바른 조합을 선택해야 각각의 장애물에 대한 위치 및 속도를 검출 할 수 있을 것이다. 먼저 두 개의 장애물이 존재하는 경우를 살펴보자. 그 장애물이 서로 다른 위치에 있는 경우 수신한 f_b 는 상승/평탄/하강의 각 구간에서 두개씩 나타날 것이다. 평탄 구간의 f_b 인 f_d 는 장애물이 접근하는 경우와 멀어지는 경우에 따라서 각각 0보다 크거나 작게 되며 그 조합은 표 2와 같이 3가지가 된다. 이때 f_{d1} , f_{d2} 는 음과 양의 주파수를 구분할 수 없으므로 양의 값만 관측 할 수 있다. 여기서 각 구간의 f_b 들 중에서 올바른 조합과 잘못된 조합을 구분할 수 있는 방법에 대하여 알아보자.

case I (모두 근접하는 경우): 가능한 조합은 표 3과 같이 4가지가 있다. 1번 조합은 올바른 것이며 잘못 조합된 경우인 2~4를 살펴보자. 2번 조합이 성립한다면 $f_{d1}=f_{d2}$ 가 되며 평탄 구간에서의 f_b 가 1개만 존재해야 한다. 따라서 두 개의 $f_{b,flat}$ 이 나타날 수 없는 모순이 생긴다. 3번 조합에서는 $f_2 > f_{r1}$ 이면, 조건식 a에 의해 $f_{b,down1}=f_{b,down2}$ 되어야 하므로 하강 구간에서 두 개의 값이 존재할 수 없다. 또한 $f_2 < f_{r1}$ 인 경우도 조건식 b에 의해 하강구간에서 1개의 값만 나타나야한다. 이때 안전영역인 $f_d < f_r$ 만 고려하였다. 4번 조합에서도 3번과 마찬가지로 f_{r1} , f_{r2} 의 관계에 따라 조건식이 성립하려면 $f_{b,up1}=f_{b,up2}$ 이어야 하므로 잘못된 조합이 될 것이다 따라서 1의 경우만 올바른 것이 된다.

case II (각각 접근 및 멀어지는 경우): 표 4와 같이 가능한 4개의 조합 중에서 1번은 올바른 것이며, 나머지만 살펴보도록 하겠다. 2번의 경우는 case I와 동일하므로 생략한다. 3의 경우는 $f_2 > f_{r1}$ 일 때 조건식 a에 따라 $f_{b,down1}=f_{b,down2}$ 가 되어 하강 구간에 1개의 f_b 가 검출되어야 할 것이다. $f_2 < f_{r1}$ 일 때는 조건식 b의 조합에 대해 동일한 조건이 필요해진다. 4번의 경우에는 동일한 방식으로 상승구간에 1개의 f_b 만 검출되어야 한다. 따라서 1번을 제외한

다른 조합은 발생 할 수 가 없다.

case III (모두 멀어지는 경우): 위와 동일한 방법으로 표 5에 보인 바와 같이 성립 조건이 얻어지며, 역시 1번의 조합만 가능하며, 나머지 경우에 대해서는 생략한다.

이상에서 살펴본 바와 같이 두 개의 물체로부터 수신된 FMCW 신호 파형이 상승/평탄/하강의 각 구간에서 2개씩 검출된 경우는

$$|f_{b,up} - f_{b,down}| = 2f_{b,flat}$$

의 조건을 만족시키는 조합은 유일한 올바른 조합이 될 것이다.

한 구간이라도 1개의 f_b 만 검출된 경우에는 조합이 훨씬 단순해진다. 먼저 상승 또는 하강구간에 1개의 비트 주파수만 있는 경우는 한 개의 조합만이 가능하므로 어려움이 없다. 평탄 구간에 1개만 있는 경우에는 f_d 가 동일하다는 의미이므로 두개의 조합 중에서 식 (3-2)에 의해 f_d 를 갖는 조합을 선택할 수 있을 것이다.

3개의 물체에 대한 경우의 수는 (f_{d1}, f_{d2}, f_{d3}) , $(f_{d1}, f_{d2}, -f_{d3})$, $(f_{d1}, -f_{d2}, -f_{d3})$, $(-f_{d1}, -f_{d2}, -f_{d3})$ 로 4가지이다. 이 경우도 앞서와 마찬가지로 다양한 조합에 대해 살펴보면 위의 식 (3)의 조합을 만족하는 경우는 1가지만 존재한다는 것이다. 조합을 확인한 결과 일치하는 경우는 올바른 조합에서만 나타나고, 잘못된 조합에서는 일치하는 경우는 나타나지 않음을 확인할 수 있었다.

본 논문에서는 다중 물체로 인해 다수의 비트 주파수들이 존재하는 경우에 올바른 조합을 쉽게 선택할 수 있도록 FMCW의 파라미터를 $f_r \gg f_d$ 이 되도록 설계하였다. 이러한 경우 f_d 가 f_r 보다 훨씬 작은 값을 가지므로 대부분의 경우에 비트 주파수의 조합은 간단히 상승과 하강구간에서 크기 순서대로 선택할 수 있게 된다.

2. 다중 물체 인식을 위한 전처리

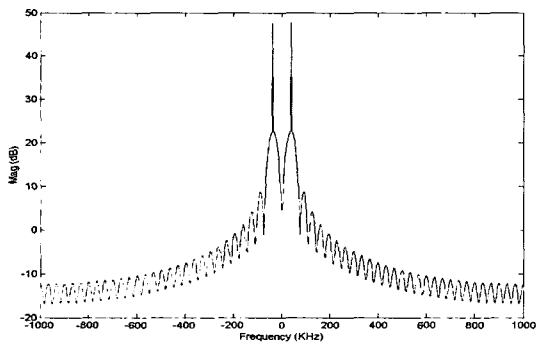
레이더의 송신신호가 전방 장애물로부터 반사되어 수신된 신호의 전력 P_r 은 거리 R에 따라 다음의 관계를 갖는다^[11].

$$P_r \propto \frac{1}{R^n}$$

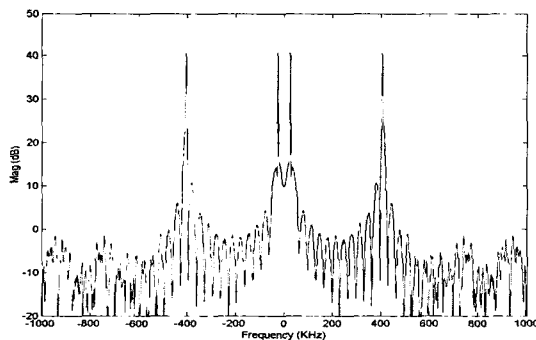
여기서 n은 자유공간에서 2이며 장애물이 있는 경우에는 4내외의 값을 갖는다. 본 논문에서는 차량 감지 레이더 신호가 장애물이 없는 공간상에서 동작하므로 n=2로 가정하였다. 서로 다른 거리에 두 물체가 존재하

는 경우에 거리 차에 따라 수신된 신호의 크기의 변화가 커지게 되는데, 예를 들면 1m와 100m에 각각 장애물이 있는 경우 두 물체로부터 반사된 수신 전력은 약 40dB의 차이가 나게 된다. 이렇게 수신신호의 차가 크면 디지털 처리를 위한 A/D 변환 시에 작은 신호를 검출하기 위해서는 ADC의 비트 수가 크게 늘어나야 한다.

FMCW 레이더의 비트 주파수는 f_r 에 비례하므로 낮은 주파수의 신호는 가까운 거리에서 반사된 큰 신호가, 높은 주파수에서는 먼 거리에서 반사된 작은 신호가 수신된다. 따라서 먼 거리의 신호를 증폭하기 위하여 본 논문에서는 구현이 간단한 미분기를 사용하였다. 이때 거리가 두 배될 때마다 12dB의 감쇄가 있으므로 이를 보상할 수 있도록 2차 미분기를 적용하였다.



(a)거리보상이 없는 경우(16비트 ADC)



(b) 거리보상이 있는 경우(8비트 ADC)

그림 3. Path-loss 보상의 영향
Fig. 3. The effect of path-loss compensation.

그림 3에는 거리보상 필터를 적용한 경우에 검출된 다중 물체의 예를 보였다. (a)의 경우는 거리보상이 없는 경우에 16비트로 ADC한 것으로 다중물체의 신호가 보이지 않는다. 반면에 거리보상을 한 (b)에서는 8비트로 ADC하여도 다중물체의 신호가 검출되었다.

평탄구간에서는 거리에 따라 주파수가 비례하지 않으므로 위의 방법을 사용할 수 없다. 따라서 평탄 구간에서 적은 전력의 특정 주파수 성분을 검출하기 위해서는 비트수를 증가시키거나 주파수 해상도를 높여서 단위 주파수당 에너지의 차이가 구분이 가능하게 해야 할 것이다. 본 논문에서는 주파수 해상도를 높여 이를 검출할 수 있게 하였다. 다만 상승 및 하강 구간의 처리를 위한 미분기를 on, off하는 회로를 구현하지 않고 평탄 구간에서도 그대로 사용하였다. 거리가 먼 경우에는 상대속도가 작은 값일 경우 증폭되지 못하므로 검출이 어려워 질 수 있음을 의미한다. 그러나 이 경우는 안전한 경우이므로 안전도에 문제가 없을 것으로 판단된다.

IV. FMCW 신호처리부의 모의실험 및 구현

본 연구에서는 FMCW 레이더를 표 1의 파라미터로 설정하여 모의실험을 수행하고 DSP 등을 이용하여 신호처리부를 구현하였다. FMCW 신호는 Matlab을 이용하여 단일 및 다중 물체에 대한 수신 신호를 만들어 임의의 파형발생기로 합성하여 사용하였다. 이 신호는 미분기를 통과하면서 거리에 의한 영향이 감소되며, 12bit A/D변환 후에 DSP에서 속도와 거리를 추정하게 된다. 그림 4는 모의실험 및 시스템 구현의 블록도이다.

실험 환경은 자기차량의 속도가 80km/h로 정속 주행을 하고 선행 차량이 한 대인 경우와 두 대인 경우를 아래와 같이 설정하였다.

- 1) 선행차량: $d=50m$, $v=80Km/h$ 에서 10초 동안 선형적으로 60km/h로 감속.
- 2) 선행차량 1: $d=10m$, $v=90Km/h$ 에서 10초 동안 선형적으로 120km/h로 가속.

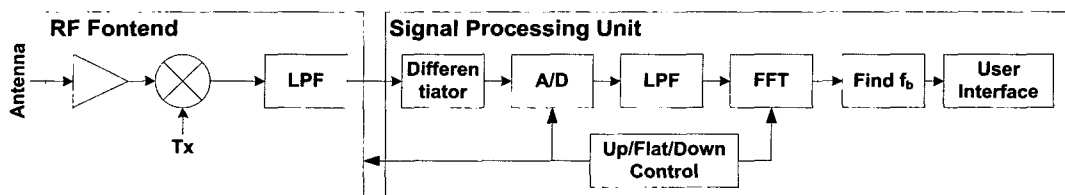


그림 4. 신호처리부의 구조
Fig. 4. The structure of DSP module.

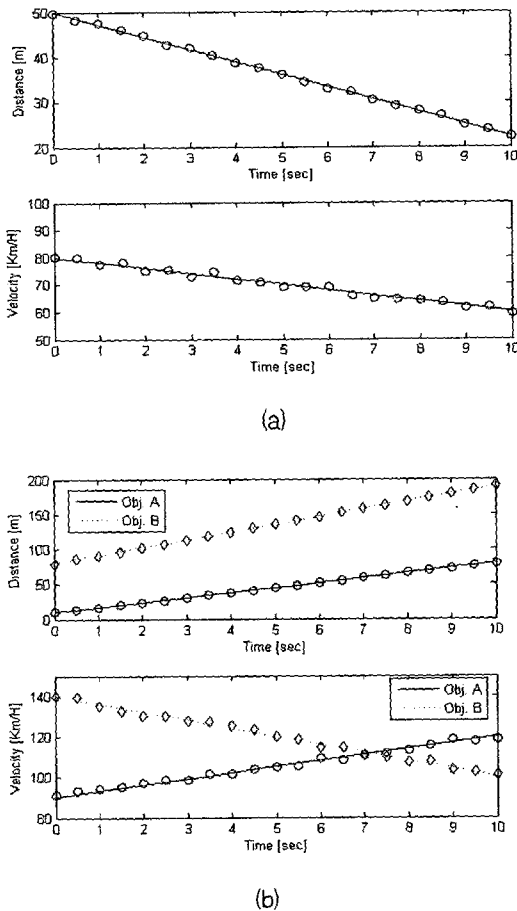


그림 5. 선행 차량이 (a)한 대와 (b) 두 대인 경우의 모의실험 결과
 Fig. 5. Simulation results for (a) 1 and (b) 2 forward vehicles.

선행차량 2: $d=80m$, $v=140Km/h$ 에서 10초 동안 선형적으로 $100km/h$ 로 감속.

그림 5에 모의실험 결과를 보였으며, 거리 및 속도에 대한 검출이 실제와 동일하게 얻어짐을 알 수 있다. 다중 물체의 경우도 실제 값과 동일하게 얻을 수 있었다.

신호처리부의 구현은 다음과 같다. FMCW 레이더에 수신된 신호가 송신신호와 곱한 것이 신호처리부에서 입력되는 것으로 가정하였다. 이 신호를 2MHz ADC와 4Kx16bit의 FIFO를 통하여 TMS320C31 DSP에 전달된다. 이때 FIFO에는 송신 신호의 상승/평탄/하강 구간에 동기를 맞추어 각각의 표본화 율로 AD변환된 신호가 저장된다. DSP는 이 데이터를 상승과 하강 구간에서는 $f_s=2MHz$, 1024 FFT를, 평탄 구간에서는 $f_s=200KHz$, 4096 FFT를 수행하여 각 구간의 f_b 들을 검출하여 속도와 거리를 추정하게 된다. 검출된 전방 장애물의 거리와 속도는 8051 마이크로프로세서로 전달되어 그래픽 LCD에 표시하고, 속도와 거리의 정보를 이용하여 알람

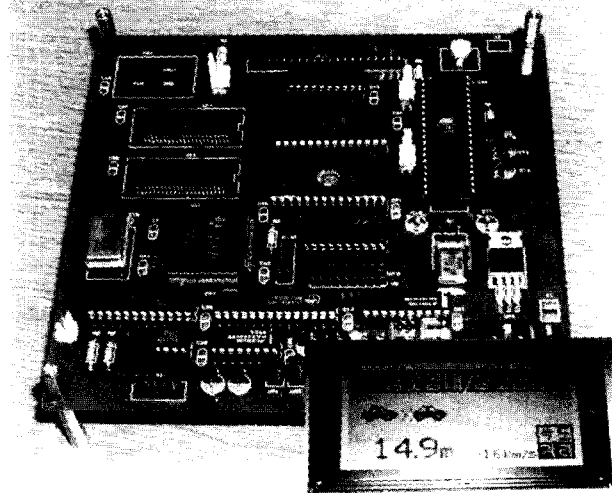


그림 6. 구현된 시스템
 Fig. 6. Picture of the proposed system.

등의 경고신호를 발생한다. 이들 동작은 초당 5~10회의 Update를 가정하면 FFT 등의 실시간 처리는 저가형 DSP칩에서도 가능할 것으로 판단된다. 그림 6은 실제 구현된 FMCW레이더의 신호처리부 및 화면 표시장치를 보인 것이다.

V. 결 론

본 논문에서는 ITS기술 중의 하나인 전방 장애물 및 차량 충돌 방지 시스템으로 FMCW 방식의 레이더를 분석하고 이에 적합한 신호처리부를 설계 구현하였다. 가장 많이 사용되고 있는 77GHz 대역의 FMCW 레이더를 기준으로 관련된 파라미터 값들을 설계하여 거리와 속도를 각각 0.4m, 0.67Km/h의 해상도로 검출할 수 있음을 보였다. 이때 다중 물체의 인식이 간단해지도록 거리 주파수인 f_r 과 속도 주파수인 f_b 의 범위를 다르게 나타나도록 설계 하였다.

FMCW 레이더의 문제점인 다중 물체의 인식을 위하여 다수의 비트주파수가 존재하는 환경에서 올바른 조합을 선택하는 방법에 대하여 검토해보았다. 제안된 파라미터로 설계 시에는 다중 물체로 인한 비트 주파수들을 단지 주파수 크기에 따른 조합으로 간단해지게 된다.

다중 물체로부터 반사된 신호들은 거리 차에 의한 감쇄가 다르기 때문에 이를 처리하기 위해서는 요구되는 AD변환 비트 수가 늘어나야 한다. 이를 위하여 전처리단에 미분기를 사용하여 8bit로도 충분히 검출할 수 있음을 보였다. 다만 평탄 구간에서의 f_b 는 거리에 따라

주파수가 비례하지 않기 때문에 작은 신호를 검출하기 위해서는 FFT의 길이를 증가 시켜야 한다.

제안한 방법과 설계한 파라미터 값들을 사용하여 Matlab으로 모의실험하고, TI사의 TMS320C31 DSP와 Atmel의 AT89C51을 이용하여 검증 및 구현하였다.

참 고 문 헌

- [1] 손흥민, "밀리미터파 자동차 레이더의 개발 동향 및 기술적 과제", 한국전자과학회지-한국전자과학기술, Vol. 9, No 4, 1998,
- [2] S. Tokoro, "Automotive application systems of a millimeter-wave radar", IEEE Conference on Intelligent Vehicles Symposium, Sept. 1996.
- [3] Multi-target detection in FMCW radar Hua Suchong; Zhou Zhengou; Wang Yue; Zhou Siyong; Radar, 1996. Proceedings., CIE International Conference of , 8-10 Oct. 1996.
- [4] R. Stolle and B. Schiek, "Multiple target FMCW ranging by evaluation of the impulse response phase", Conference on Precision Electromagnetic Measurements Digest, June 1996.
- [5] H. Rohling and R. Mende, "OS CFAR performance in a 77 GHz radar sensor for car application", CIE International Conference of Radar, Oct. 1996.
- [6] J. Zhang, G. Liu, and W. Su, "Signal processing of Automotive Collision Warning Radar", 5th International Conference on Signal Processing Proceedings, Vol. 3, Aug. 2000.
- [7] M. Vossiek, T. v. Kerksenbrock, and P. Heide, "Signal Processing Methods For Millimetrewave Fmcw Radar With High Distance And Doppler Resolution", 27th European Microwave Conference and Exhibition, Vol. 2, Sep. 1997.
- [8] D. Richardson, "An FMCW radar sensor for collision avoidance", IEEE Conference on Intelligent Transportation System (ITSC97), Nov. 1997.
- [9] S. Tokoro, K. Kuroda, A. Kawakubo, K. Fujita, and H. Fujinam, "Electronically scanned millimeter-wave radar for pre-crash safety and adaptive cruise control system", IEEE Conference on Intelligent Vehicles Symposium, June 2003.
- [10] M. E. Russell, A. Crain, A. Curran, R. A. Campbell, C. A. Drubin, and W. F. Miccioli, "Millimeter-Wave Radar Sensor for Automotive Intelligent Cruise Control(ICC)," IEEE Trans. Microwave Theory Tech. vol 45, Dec. 1997.
- [11] N. C. Currie and C. E. Brown, Principles and Applications of MILLIMETER WAVE RADAR, Artech House, 1987.
- [12] Texas Instrument, TMS320C31 USER GUIDE.

저 자 소 개



오 우 진(정회원)

1989년 한양대학교 전자공학과 학사.

1991년 한국과학기술원 전자공학과 석사.

1996년 한국과학기술원 전자공학과 박사.

1996년 2월~1998년 7월 SK텔레콤 중앙연구원 선임연구원

1998년 8월~현재 금오공과대학교 조교수

<주관심분야: 이동통신, 디지털 통신시스템 설계, 신호처리>