

TMS320C6701 DSP를 이용한 실시간 W-대역 FMCW 거리측정장치

Real Time W-band FMCW Distance Measuring Devices Using TMS320C6701 DSP

이창원*

Lee, Chang-Won

ABSTRACT

This paper presents a real time distance measuring device using a W-band linear frequency modulated continuous wave(FMCW) radar and TMS320C6701 digital signal processor(DSP).

We used FFT operation for measuring distance with the beat signals and the results of FFT could be converted to distance with ease. We presented how to implement a real time miniaturized hardware system including network protocols using a single DSP core. Also how to control the modulation signal of FMCW system to compensate the VCO nonlinearity using the Time Gating control of DSP is presented. We have shown that the proposed system has good performances for measuring distance in real time via outdoor environment experiments.

주요기술용어(주제어) : FMCW(주파수 변조 연속파), DSP(디지털 신호처리기), FFT(Fast Fourier Transform)

1. 서론

최근 FMCW(Frequency Modulated Continuous Wave) 방식의 레이더는 차량의 충돌방지 센서나 거리측정용 소형 센서 등 다양한 산업 분야에 있어 개발이 이루어지고 있다. FMCW 레이더는 목표물에 전송한 신호와 반사되어 들어오는 신호의 주파수 차를 이용하여 거리를 측정하며 송신신호는 변조신호에 의해 선형적으로 변화한다. 수신된 신호는 $\tau_d = 2R/c$ 의 시간차를 갖으며, 송신된 신호와 혼합된다. 이 때,

시간차는 두 신호간의 주파수 차이로 대체된다. 그림 1에 나타낸 바와 같이 송신신호와 수신신호의 차인 비트주파수는 표적과의 거리에 비례한 값을 가지므로, 비트주파수를 거리 측정에 이용할 수 있다.

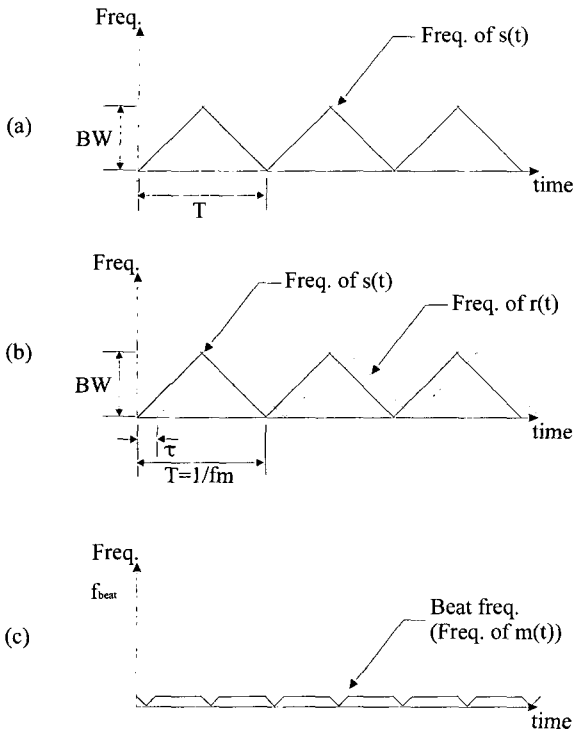
여기서, $s(t)$ 는 송신신호이고, $r(t)$ 는 수신신호이며, f_m 은 변조주파수이고 B 는 VCO의 sweep 대역폭이다. $\tau_d = 2R/c$ 의 시간차에 의해 비트신호 $m(t)$ 의 스펙트럼은 $4Bf_mR/c$ 로 표현되므로 비트스펙트럼에서 거리를 계산할 수 있다.

거리 측정을 위해 비트신호는 A/D를 거쳐 DMA를 통해 빠르게 DSP로 전송되며, FFT를 통해 얻어진 비트스펙트럼에서 최대값을 찾아 거리로 환산한다. 필수적인 연산은 송신신호와 수신신호의 차 주파수 값을 구해내는 것과 더불어 FMCW 레이더 센서

† 2005년 10월 21일 접수~2006년 3월 17일 게재승인

* 국방과학연구소(ADD) 기술연구본부 3부 4팀

주저자 이메일 : changwon@add.re.kr



[그림 1] FMCW 레이더의 원리

의 선형성이 우수한 구간 선택이며 이 시간이 짧을수록 실시간 거리 측정장치의 빠른 응답속도를 얻어낼 수 있다. 이를 위해서는 고속의 FFT연산이 가능한 DSP를 사용하는 것이 필요하다.

DSP는 TI(Texas Instrument)사의 고속 DSP인 TMS320C6000계열 중에서 부동 소수점 연산에 적합한 TMS320C6701을 사용하였으며 PC등에서 실시간으로 측정된 거리의 관찰을 가능하게 하기 위한 이더넷 통신 파트가 같이 탑재되도록 설계하였다. 즉, 매 순간마다 측정된 센서와 목표물과의 거리는 실시간으로 계산되어 그 결과 값이 사용자의 PC로 전송된다.

이상적인 FMCW 레이더는 VCO(Voltage Controlled Oscillator)의 Sweep 대역폭을 크게 할수록 거리 해상도가 개선된다^[4]. 그러나 변조된 VCO의 출력 주파수는 비선형 특성을 갖기 때문에 각 방식에 적합한 선형화 방법이 개발되지 않으면 필요한 거리 해상도를 만족시킬 수 없다. 그러나 W대역 FMCW 레이더의 VCO 비선형 특성을 보상하기 위한 장치는 복잡한 구성과 고가의 비용이 든다^[4,14]. 본 논문에서는

DSP를 이용하여 간단한 Time Gating 방법을 사용함으로써 VCO의 비선형 보상 회로가 없는 FMCW 레이더로 실시간으로 거리를 측정하는 DSP(Digital Signal Processor) 신호처리장치 설계 방법을 다룬다.

본 논문은 서론에 이어 2장에서 DSP를 이용한 실시간 거리측정장치 설계에 대해 기술하고, 3장에서 FMCW 방식에 대한 VCO의 선형구간 선택을 다룬다. 4장에서는 실시간 거리측정을 위한 DSP의 프로세스를 기술하고, 5장에서 제작된 거리측정장치로 실험한 결과를 기술하며 6장에서 결론을 맺는다.

2. DSP를 이용한 실시간 거리측정장치 설계

실시간 거리 측정과 각종 제어를 위해서 프로세서는 기본적으로 A/D(Analog to Digital Converter)제어, Time Gating을 위한 변조부 제어, 외부 메모리 액세스(External Memory Access), FFT(Fast Fourier Transform), 이더넷 통신 등 다양한 기능을 갖추어야 한다. 또한 소형화 설계를 위해 프로세서는 단일 코어로 사용하는 것이 바람직하다.

본 논문에서 제시하는 실시간 동작의 측면에서 고속의 연산에 가장 중점을 두어 이에 적합한 TI사의 고속 부동 소수점 연산 DSP인 TMS320C6701을 실시간 거리측정장치의 프로세서로 사용하였다.

TMS320C6701은 150MHz의 클럭으로 동작하며 독립적인 8개의 Functional Units를 가지고 있어서, 8개의 명령을 한 사이클에 수행할 있어 최대 900MFLOPS (Mega Floating Operations per Sec)의 빠른 연산 속도를 갖는다^[5]. TMS320C6701의 자세한 사양은 TI사에서 제공하므로 따로 언급하지 않기로 한다.

제어 신호들 및 데이터 버스, 이더넷 물리계층의 제어 등에는 많은 I/O가 필요하지만 DSP는 사용할 수 있는 외부 주소 버스와 데이터 버스가 제한되어 있다. 따라서 부족한 I/O 해소를 위해 Altera사의 EPLD인 Flex10K를 사용하였다. 비트 주파수의 데이터 획득을 위해 최대 25Msps까지 가능한 A/D를 사용하였다. 디지털로 변환된 신호는 외부 메모리인 FIFO를 거쳐 TMS320C6701의 DMA(Direct Memory Access)를 통해 빠르게 DSP 내부 메모리로 입력되

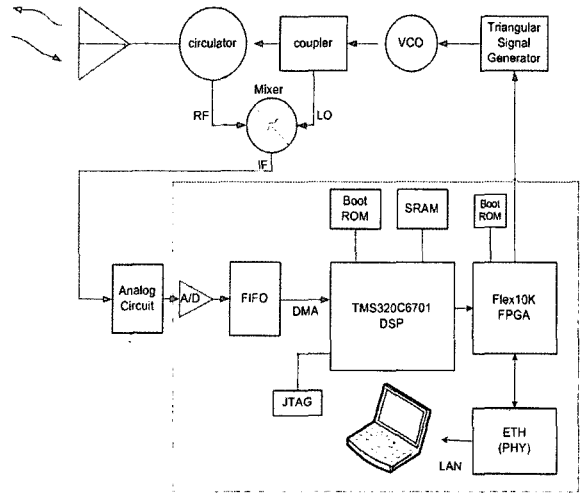
어진다.

거리 정보의 실시간 확인을 위해 DSP와 PC간에 빠른 데이터 전송 속도가 요구되는데 일반적인 시리얼 케이블 통신이나 JTAG을 이용하여 데이터를 전송하여 관찰하기엔 그 속도가 매우 느리다. 따라서 빠른 데이터 전송에 적합하도록 구성하기 위해 이더넷 통신을 선택하였다. 그에 따라 이더넷의 물리계층은 Cirrus Logic의 CS8900a를 사용하였으며 DSP에서 직접 제어한다. CS8900a는 사용 초기에 많은 레지스터들을 초기화시켜야 해서 별도의 EPROM 등으로 초기화를 수행할 수 있다. 그러나 본 설계에서는 소형화 목적에 맞게 CS8900의 초기화 작업 역시 DSP에서 직접 담당하도록 설계되었고 초기화 루틴을 코딩하였다.

또한 네트워크 상위계층인 MAC부터 TCP까지 DSP와 PC와의 통신에 필요한 네트워크 계층들을 단일 DSP내에 구현하여 데이터 통신이 이루어질 수 있도록 하였다. 전원이 인가되었을 때 DSP는 Stand Alone 동작을 하여야 하므로 Bootloader를 이용한 프로그램 다운로드 방식을 위해 Booting ROM을 사용하였다.

TMS320C6701에는 64KByte의 내부 메모리인 내부 프로그램 메모리와 내부 데이터 메모리가 각각 한 개씩 있다. 프로그램이 DSP의 내부 메모리에서 동작할 때 가장 빠른 속도를 낼 수 있지만 내부 메모리의 용량이 제한되어 있기 때문에 DSP의 내부 메모리 확장을 위해 SRAM을 별도로 사용하여 원활한 기능을 하도록 구성하였다. 또한 사용한 SRAM은 DSP I/O의 사용전원과 같은 전원을 쓰기 때문에 손쉽게 연결하여 이용할 수 있다. 그림 2에 실시간 거리측정장치의 간단한 블록도를 나타내었다. 사용된 VCO의 선형성이 우수한 구간을 선택하기 위하여 DSP는 삼각파 발생부를 제어함으로써 Time Gating 구간 선택을 하여 선택된 구간에서 A/D를 수행하여 비트 신호를 얻는다.

DSP는 고속 연산이 주목적이지만 소형화를 위해 거리 측정에 관련된 모든 제어와 연산과 거리결과 관찰을 위한 데이터 통신 모두 단일 DSP가 처리하도록 하드웨어를 설계하였기 때문에 이러한 구조에서는 단일 DSP에서 처리해야 할 연산들이 상당히 많아서 펌



[그림 2] 실시간 거리 측정장치의 블록도

[표 1] DSP 각 파트의 사양

Parts	사양	비고
DSP 처리속도	150MHz	8 pipelines 900MFLOPS
EPLD 처리속도	50MHz	I/O
A/D	6MHz	최대 25MHz
저장장치	SRAM, FIFO, FLASH	-
출력	Ethernet	LAN cable사용
디버깅	JTAG	Emulator

웨어 작업량과 복잡도가 크게 증가하게 된다.

표 1에는 간략하게 현재 구성된 DSP부의 각 파트의 사양을 나타내었고, 표 2에는 구현된 DSP의 메모리 맵을 나타내었다. DSP가 리셋된 직후에 ROM 영역의 코드를 Address 0 영역으로 이동시키기 위해서는 ROM을 CE1 영역에 위치시켜야 하므로 Booting ROM은 CE1 영역에, 외부 메모리는 CE0 영역에 위치시켰으며 CE2를 I/O 영역으로 사용한다.

사용할 수 있는 메모리 영역 중에서 실제로 연결한 물리적 메모리의 용량을 표시하였고 I/O 영역은 사용되는 I/O에 따라서 표시된 영역을 모두 사용할 수 있다.

[표 2] 구현된 DSP의 메모리 맵

주소 영역	주소 공간	물리적 메모리	실제 용량
0000 0000 - 0000 FFFF	.	Internal Program Memory	64 kbytes
0040 0000 - 0041 FFFF	CE0	External SRAM	128 kbytes
0140 0000 - 0140 FFFF	CE1	Booting ROM	64 kbytes
0200 0000 - 02FF FFFF	CE2	IO peripheral	
8000 0000 - 8000 FFFF	.	Internal Data Memory	64 kbytes

변조신호로는 삼각파를 사용하였으므로 적용되는 전압 v 는 다음과 같이 표현된다.

$$t = \frac{T_m}{2V_0}v, \quad 0 \leq t \leq T_m/2 \quad (2)$$

여기서 V_0 와 T_m 은 각각 삼각파의 진폭과 변조주기이다. 관찰시간 T_s 동안의 비트 스펙트럼은 대역폭 $B_s = 1/T_s$ 를 갖는 이상적인 비트 스펙트럼과 비선형 오차 성분과의 컨볼루션이므로 식 (1)의 푸리에 변환과 k_{rf} 를 사용하면 거리 해상도를 구할 수 있다^[4].

$$\delta R_{bs} \approx \frac{1}{k_{rf}} \sqrt{\delta f_b^2 + \left(\frac{1}{T_s}\right)^2} \quad (3)$$

여기서 $\overline{\delta f_b^2} = \frac{1}{T_s} \int_{t_0 - T_s/2}^{t_0 + T_s/2} (e_{vco}(t) - e_{vco}(t - \tau_d))^2 dt$ 는 비트 주파수 오차의 분산이고 t_0 는 Time Gating의 위치이며 $e_{vco}(t)$ 는 VCO의 주파수 비선형성 오차이다. 이제 적절한 T_s 와 δR_{bs} 를 최소화하는 적분 위치 t_0 를 택할 수가 있는데, T_s 가 작을수록 선형성을 확보할 수 있지만 너무 작으면 거리 해상도가 제한된다.

$T_s = T_m/2$ 인 구간에 대해 구현된 FMCW 레이더로 간단한 시뮬레이션을 수행하여 비트 주파수의 오차를 계산하면 오차가 최소화되는 지점, 즉 Time Gating의 위치와 거리 해상도가 가장 좋아지는 구간을 구할 수 있다.

3. FMCW 방식에 대한 VCO의 선형구간 선택

사용된 W밴드의 FMCW 레이더는 삼각파로 VCO를 변조시켜 송신된 신호와 수신된 신호의 차인 비트 신호의 주파수를 거리 정보로 이용한다.

VCO의 비선형 특성이 있는 FMCW 레이더의 송신 신호와 수신 신호를 각각 혼합기에 입력시키면 차 주파수에 해당하는 비트주파수(Beat Frequency)를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

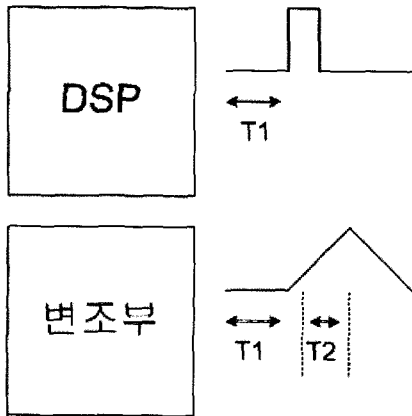
$$\begin{aligned} f_b(t) &= f_{Tx}(t) - f_{Rx}(t - \tau_d) \\ &= f_{bi} + \delta f_b(t) \\ &= k_{rf}R + \delta f_b(t) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 $f_{Tx}(t)$ 는 송신기의 출력주파수, $f_{Rx}(t)$ 는 수신신호이며, $\tau_d = 2R/c$ 는 시간차에 해당된다. f_{bi} 는 이상적인 경우의 비트주파수, $\delta f_b(t)$ 는 VCO 비선형성에 의해 발생하는 비트주파수 오차 성분이고, k_{rf} 는 거리를 비트주파수로 변환하는 상수이다.

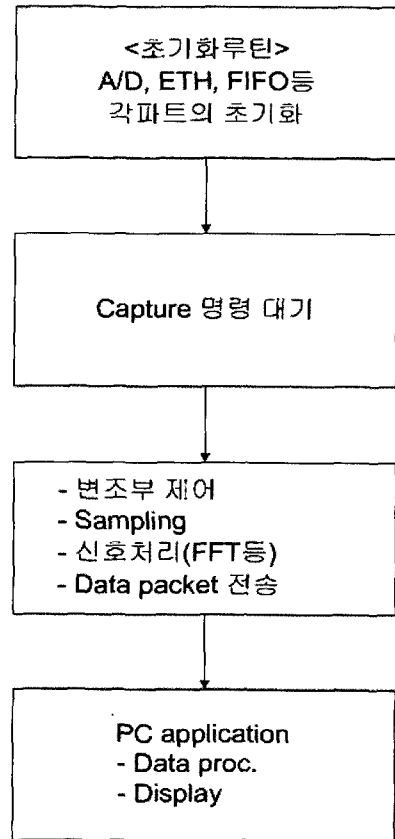
4. 실시간 거리측정을 위한 DSP의 프로세스

현재 설계된 DSP 신호처리장치 하드웨어는 전원이 인가되면 가장 먼저 DSP의 주변 장치들을 모두 초기화한다. 초기화하지 않으면 동작을 하지 않는 장치들이 있기 때문에 필수적인 절차이다. 이더넷 물리계층 장치, A/D변환기, FIFO등의 순서로 초기화를 수행한다.

초기화가 종료된 후의 실제 거리 측정에는 크게 데이



[그림 3] 변조부 제어



[그림 4] DSP의 동작순서도

터 획득 명령 대기, 데이터 획득과 신호처리 및 데이터 전송, PC로 거리정보 확인의 3가지로 동작을 나눌 수 있다.

먼저 사용자의 PC가 Host가 되어 네트워크를 통해 DSP에 거리 측정 명령을 전달하면 그 명령을 받아 펌웨어가 동작하도록 구현되어 있다. 거리 측정 명령을 받으면 Time Gating을 위해 변조부를 제어한다. 그림 3에 변조부 제어 및 샘플링 시작시점에 대하여 나타내었다.

먼저 임의의 시간 T_1 (현재 $T_1 = 0\mu s$) 후에 변조 시작펄스를 발생시켜 변조부에서 변조를 시작하도록 동작을 시키고, 선형성이 가장 좋은 구간을 선택하기 위해 계산된 시간만큼 지연을 시키다가 정확한 시점에서 신호를 획득하기 위해 A/D를 시작하여 Gating 구간이 끝나는 시점까지 비트 신호 데이터를 획득한다. 즉 T_2 구간만큼 데이터를 획득하는 것이다. 변환된 데이터는 바로 FIFO 메모리에 저장되며, 저장이 끝나면 EPLD는 FIFO의 플래그 신호를 받아 DSP에 DMA 인터럽트를 인가하게 되고 DSP는 DMA를 통해 FIFO에 저장된 데이터를 빠르게 내부 메모리로 이동시키고 DMA를 종료한다. 전송된 데이터는 우선 실제 전압 값에 해당하는 실수로 변환되어야 한다. 변환과정이 끝나면 바로 FFT(Radix2, Bit Reversing)를 수행하여 비트 스펙트럼으로 나타낸 뒤 거리 정보에 해당하는 비트 주파수인 FFT결과의 최대치에 거리변환상수를 적용하여 거리 값으로 변환시킨다.

사용자의 거리 정보 확인을 돕기 위해 비트 스펙트럼과 거리로 환산된 값을 이더넷으로 전송하며 PC의 화면에 두 종류의 데이터가 표시된다. DSP에서 이더넷을 통해 데이터를 효율적으로 보내기 위해 데이터 여러 패킷으로 나누어 전송하는 루틴이 포함되어 있다.

사용자 PC의 프로그램은 거리 정보를 모두 정상적으로 전송받았으면 다음 거리 측정을 위한 명령을 다시 DSP로 보내게 되고 위의 동작이 계속 반복된다. 물론 중간에 DSP의 동작을 새롭게 다시 시작시키고 싶을 때는 전원을 끄고 켤 필요 없이 Reset 버튼을 한번만 눌러주면 된다.

그림 4에 DSP의 실시간 거리측정을 위한 프로세스의 이해를 돕기 위해 순서도를 나타내었다.

Boot ROM을 통해 Stand Alone으로 모든 동작이 이루어지므로 사용자가 별도의 작업을 할 필요가 없

다. 전원만 인가하면 자동적으로 DSP가 부팅되어 그림 2의 순서도와 같이 작동하게 된다. 동작절차에 수정이나 변경을 필요로 할 때는 변경을 원하는 부분의 코드를 수정하여 다시 컴파일하고 빌드한 후 새롭게 생성된 실행 파일을 Boot ROM에 다시 구워 넣으면 된다. 사용한 Boot ROM은 Flash 타입이기 때문에 반영구적으로 사용할 수 있다.

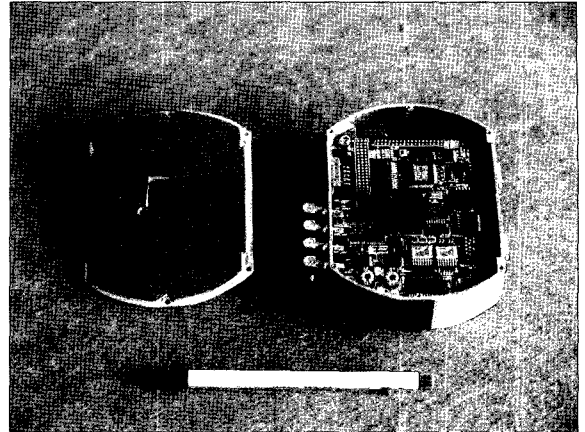
5. 시험 및 결과분석

제작한 실시간 FMCW 거리측정장치에 대해 거리 측정능력 시험을 수행하였고 표적으로는 금속성이 있는 승용차를 선택하였다.

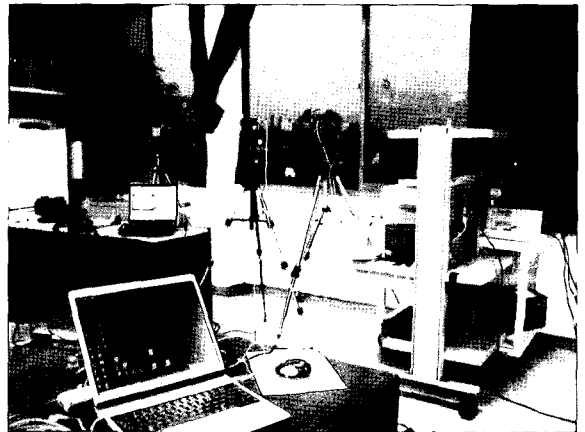
그림 5에는 제작한 거리측정장치의 전체 모습을 나타내었고, 그림 6에는 DSP 신호처리장치의 모습을 나타내었다.

거리측정장치의 레이더 센서의 출력은 DSP 신호처리부의 SMA 커넥터를 통해 연결되고, DSP 신호처리부와 PC의 통신은 DSP 신호처리부의 상단에 제작된 LAN 포트에 일반적으로 사용하는 Cross Cable을 이용하여 연결한다. 실제 시험을 위한 세팅 장면을 그림 7에 나타내었다.

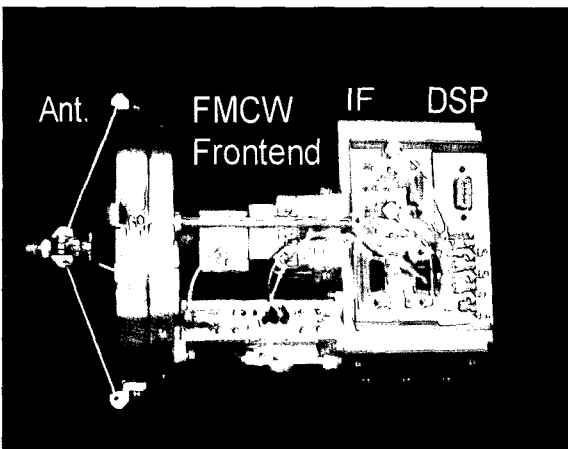
그림 8에는 거리측정용 표적으로 사용한 승용차의 모습을 나타내었다. 그림 9에는 100m 거리의 승용차에 대해 오실로스코프로 측정된 비트신호의 파형과



[그림 6] DSP 신호처리장치



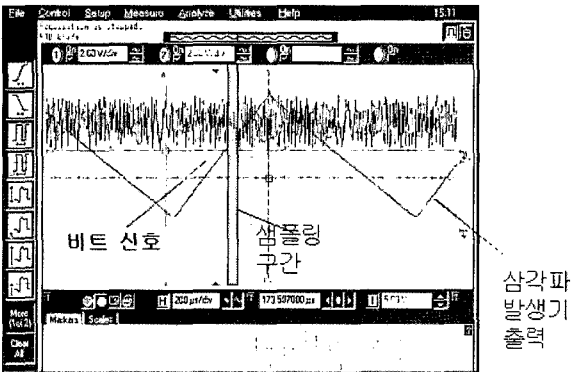
[그림 7] 시험세팅 장면



[그림 5] 제작된 거리측정장치



[그림 8] 표적으로 사용한 승용차



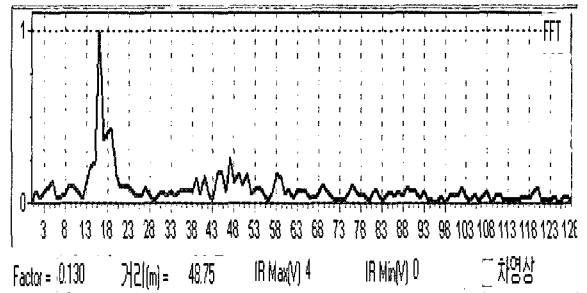
[그림 9] 비트신호의 파형과 샘플링 구간

함께 실제 DSP에서 신호를 수집하는 구간을 나타내었다. 50m, 100m, 200m의 50m 이격거리의 승용차 표적에 대해 시험을 수행하였으며 그 결과를 그림 10에 나타내었다. 거리 측정 시험 결과는 각 거리별로 수신된 비트주파수를 FFT하여 거리 값으로 환산한 결과를 나타내었다. 결과화면은 실시간으로 실험상황을 보여주기 때문에 저장을 하였다가 원하는 부분을 확인할 수 있도록 하는 녹화/재생 기능이 갖추어져 있다.

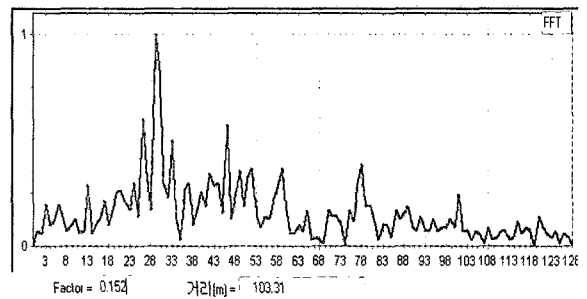
현재 구성된 시스템에서는 선형 구간 선택을 하기 때문에 비트 신호를 6Msps로 샘플링하는 A/D의 포인트 수가 그 구간만큼 제한을 받게 되며, 현재 256 Point를 사용하였다. 이렇게 제한되어 있는 샘플링 포인트 수는 거리 해상도에 영향을 주게 된다. 이를 거리 해상도로 환산하면 최대 3m 정도의 오차가 생길 수 있다.

측정 결과를 살펴보면 50m 거리에서는 48.75m, 100m에서는 103.31m, 200m에서는 201.19m로 매우 양호한 결과를 나타내었고, 모두 오차 범위 내에서 정상 동작함을 확인할 수 있다.

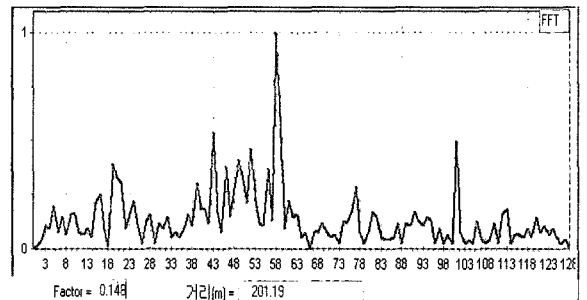
거리 측정의 실시간 측면에 있어서 연산속도를 알기 위해 주요연산에 소요되는 시간을 합계하는데 A/D 변환에 걸리는 시간과 그 데이터가 DSP로 이동하는 시간, A/D범위에 맞는 부동소수점으로서의 데이터 형 변환 시간, FFT연산 시간, 거리로의 환산 시간이 있다. 현재 제작된 DSP 신호처리부의 A/D는 6Msps, 256 Point이므로 샘플링에 43 μ s, DSP의 DMA transfer 40 μ s, 데이터 변환 50 μ s, 256 Point에 대한



(a) 50m FFT 거리환산



(b) 100m FFT 거리환산



(c) 200m FFT 거리환산

[그림 10] 거리별 측정 결과

FFT 연산 50 μ s, 거리 환산 10 μ s으로 총 200 μ s정도의 시간에 거리측정결과가 계산된다. 또한 DSP와 PC간의 실시간 정보 전달이 매우 원활하게 이루어졌음을 확인하였다.

6. 결론

본 연구에서는 DSP를 이용하여 실시간으로 거리를 측정하는 장치를 설계/제작하고 시험한 결과를 수록

하였다. 거리 측정 방식은 DSP를 이용하여 W대역의 FMCW 레이더 센서의 비트주파수에 FFT를 수행하여 그 결과를 거리로 환산하며, 이때 선형화기를 쓰는 대신에 선형성이 우수한 구간을 택하는 방법을 채택하여 DSP에서 VCO 변조부를 직접 제어하는 방식을 구현하였다.

거리측정용 프로세서는 DSP 단일 프로세서를 사용하였으며 사용된 DSP는 TI사의 부동소수점 연산에 적합한 TMS320C6701을 사용하였다. 실시간 데이터 전송을 위해 이더넷의 물리계층(PHY)장치만 하나의 칩을 사용하고 MAC과 TCP/IP등을 모두 DSP에 탑재시켰다.

레이더 센서의 선형구간에 대한 모든 제어는 DSP를 통해 이루어지고, A/D 뿐만 아니라 PC와 통신 모두 DSP에서 담당한다. FFT를 비롯한 각종 연산과 제어, 네트워크 프로토콜의 탑재 등의 모든 기능을 단일 프로세서 상에 구현하였다.

거리측정에 필요한 연산은 200 μ s 내에 DSP에서 모두 이루어져 실시간 거리측정에 충분한 연산 속도를 갖는다.

거리 측정을 위해 제작된 W대역 FMCW방식의 레이더 센서와 TMS320C6701 DSP 신호처리장치를 이용하여 실제 거리를 실시간으로 측정하는 시험을 수행하였으며, 시험에 사용된 표적은 일반 승용차를 사용하였고 거리 측정 능력 시험을 위해 50m, 100m, 200m에 대해 각각 시험을 하였다. DSP에서 LAN Cable을 통해 실시간으로 PC로 전송하여 거리측정정보를 관찰한 결과 모두 계산된 오차 범위 내에서 정상 동작함을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] Texas Instruments, TMS320C6000 CPU and Instruction Set Reference Guide, 1999. 3.

[2] DSP 신호처리기 기본설계 및 제작(다중센서융합에 의한 장갑표적감지센서), TEDC-509-041069, 국방과학연구소, 기술보고서, 2004. 11.

[3] Texas Instruments, TMS320C6000 Peripherals Reference Guide, 1999. 4.

[4] J. D. Park, W. J. Kim, C. W. Lee, "A Novel Method for Beat Frequency Error Correction for a Low Cost FMCW Radar Using VCO Sweep Characteristics", European Radar Conference, Paris, October, 2005.

[5] Texas Instruments, TMS320C6701 FLOATING POINT DIGITAL SIGNAL PROCESSOR, 2000. 5.

[6] Texas Instruments, TMS320C62x/67x Programmer's Guide, 1999. 5.

[7] Gilber Held, "Ethernet Networks, Design, Implementation, Organization & Management, Forth Edition, Fully revised to cover wireless Ethernet, Security & evolving Gigabit standards", Wiley.

[8] Cirrus Logic, CS8900A product data sheet, 2001. 4.

[9] Texas Instruments, TMS320C6x Peripheral Support Library Programmer's Guide, 1998. 7.

[10] Texas Instruments, TMS320C6000 Optimizing C Compiler User's Guide, 1999. 2.

[11] Texas Instruments, TMS320 DSP/BIOS User's Guide 2001. 11.

[12] Oppenheim, Schafer, "Discrete-Time Signal Processing", Prentice Hall, 1989.

[13] 박현철, "VHDL 회로설계와 응용", 한성출판사, 1998. 8.

[14] 박정동, 지면 클러스터 환경에서 금속표적감지를 위한 W-대역 FMCW 레이더의 설계 및 제작, 군사과학기술학회지, 2004.