

저가형 DSP를 사용하는 FMCW 레이더 신호처리부의 효율적 구현 방안

오우진*

Efficient Implementation of FMCW Radar Signal Processing Parts Using Low Cost DSP

Woojin Oh*

Department of Electronic Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Kumi 39177, Korea

요 약

차량용 능동안전 시스템은 전방충돌방지, 차선이탈 경고, 차선변경 지원 등이 있으며 소형차에 도입될 정도로 대중화되고 있다. 대표적인 능동안전 시스템인 FMCW 레이더는 가격 경쟁력과 성능개선을 위해 전방과 측면용 레이더의 통합과 위상배열이나 다중 안테나의 적용이 연구되고 있다. 본 논문에서는 이러한 차량용 FMCW 레이더 시스템의 신호처리부를 저가의 DSP로 구현하기 위한 효율적인 방안들을 제안한다. PWM기반의 아날로그 변환, 계산량을 줄이는 근사화 기법, 효율적인 벡터연산 등을 제안하고 구현하였다. 구현된 신호처리 보드는 1.4ms의 펄스 반복 간격에서 1024길이의 FFT 처리가 실시간 성능을 보였다. 실제 도로 실험에서 10Hz의 갱신율로 실시간 동작과 성능을 확인하였다.

ABSTRACT

Active driving safety systems for vehicle, such as the front collision avoidance, lane departure warning, and lane change assistance, have been popular to be adopted to the compact car. For improving performance and competitive cost, FMCW radar has been researched to adopt a phased array or a multi-beam antenna, and to integrate the front and the side radar. In this paper we propose several efficient methods to implement the signal processing module of FMCW radar system using low cost DSP. The pulse width modulation (PWM) based analog conversion, the approximation of time-eating functions, and the adoption of vector-based computation, etc. are proposed and implemented. The implemented signal processing board shows the real-time performance of 1.4ms pulse repetition interval (PRI) with 1024pt-FFT. In real road we verify the radar performance under real-time constraints of 10Hz update time

키워드 : FMCW 레이더, 능동차량안전, 저가형 신호처리기, 펄스폭변조 필터

Key word : FMCW radar, Active safety system, Low cost DSP, PWM filter

Received 07 March 2016, Revised 09 March 2016, Accepted 23 March 2016

* Corresponding Author Woojin Oh(E-mail:wjoh@kumoh.ac.kr, Tel:+82-54-478-7485)

Department of Electronic Engineering, Kumoh National Institute of Technology, Kumi 39177, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkice.2016.20.4.707>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서론

최근 능동형 차량안전시스템은 급속히 대중화되어 중소형 승용차에도 장착되고 있다. 능동안전의 기능은 전방차량 충돌방지(Forward Collision Avoidance), 차선이탈 경고(Lane Departure Warning), 차선변경 지원(Lane Change Assist) 등이 있다. 이에 적합한 센서로 RF, 초음파, 영상, 레이저 등이 있으며 RF 방식이 많이 사용되고 있다. RF방식의 레이더는 주변 환경의 영향을 적게 받으면서 원거리 검출 성능이 우수하기 때문이다[1-5].

원거리 성능이 요구되는 전방 및 측후방 장애물 감지에 가장 많이 사용되는 차량용 FMCW (Frequency Modulated Continuous Wave) 레이더는 펄스 방식보다 신호처리 알고리즘이 간단하면서도 거리와 속도를 정확히 측정 가능하다. 또한 77GHz의 고주파를 사용하여 안테나 크기가 작은 장점이 있다.

일반적인 FMCW 레이더의 구조는 그림 1과 같이 신호처리부에서 송신 변조파형을 만들어 DAC를 통해 아날로그 신호로 RF 모듈의 VCO에 전달된다. VCO나 PLL에서는 입력 전압에 비례하는 77GHz 대역의 변조된 고주파를 안테나로 전달하게 된다. 목표물에 반사된 수신파는 시간 지연된 신호가 되며 송신파와 곱해지면 차 주파수 성분이 남게 된다. 이러한 차 주파수를 비트 주파수라 하며 FFT 등으로 장애물과의 거리와 상대 속도 정보를 얻게 된다[2].

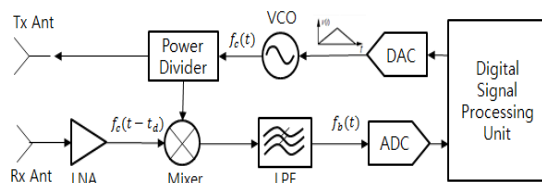


Fig. 1 Block diagram of conventional FMCW radar

최근에는 그림 2와 같은 전방용과 측면용 레이더를 단일 시스템으로 통합하고 장애물의 방위각을 얻을 수 있는 위상 배열, 다중빔 안테나 기법이 도입되고 있다 [3, 4]. 이 레이더는 다수의 송수신 안테나로 구성되어 이전보다 구현이 복잡하고 수신각도 등의 검출 알고리즘이 추가되어 더 많은 계산이 요구된다.

본 논문에서는 차량용 FMCW 레이더 신호처리부의 효율적인 구현 방안을 몇가지 제안하고자 한다. 대부분의 다중 안테나기법의 레이더는 고성능 DSP나 FPGA로 신호처리부를 구현하고 있으나 본 논문에서는 TI사의 F28시리즈와 같은 저가 프로세서로 구현하였다. 2장에서 FMCW 레이더의 기본적인 특징을 살펴보고 3장에서 신호처리부의 요구조건과 적절한 프로세서를 검토한 다음 저 성능 프로세서에 적합한 PWM(Pulse Width Modulation)기반의 DAC와 간략화 방안 등을 논의한다. 4장에서는 구현 결과를 보이고 마지막으로 결론을 맺는다.

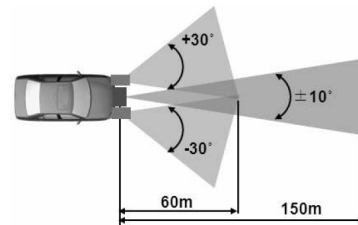


Fig. 2 Range of forward- and side-looking FMCW radar[3]

II. 차량용 FMCW 레이더의 특징

단일 안테나를 사용하는 일반적인 FMCW 레이더는 그림 3과 같이 시간에 따라 선형적으로 주파수가 변하는 FM변조 신호를 송신하게 된다. 장애물에 반사되어 돌아오는 수신 신호는 시간 지연이 된 것이기 때문에 현재의 송신신호와 주파수 차이가 나타나게 될 것이다. 또한 반사체와의 상대 속도에 따라 도플러 주파수 편이도 나타난다. 송수신 신호의 주파수 차를 비트 주파수라 하며 다음과 같이 거리분해능(ΔR)과 상대속도 분해능(ΔV_r)을 결정한다.

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

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

여기서 f_c 는 송신 신호의 중심주파수, B 는 변조대역폭, T 는 유효 펄스 폭 시간이며 ΔF 는 FFT의 주파수

해상도이다. FMCW 레이더의 기본 성능은 FFT의 길이 및 ADC 표본화율, RF부의 변조 대역폭에 따라 결정되는 것이다[2].

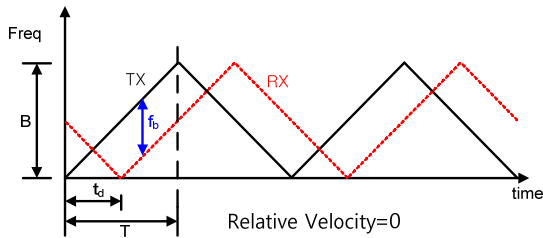


Fig. 3 Typical Tx waveform of FMCW radar

다수의 송수신 안테나를 갖는 1-D 위상 배열 또는 다중 빔 FMCW 레이더는 그림 4와 같은 구조를 갖는다. 송신 안테나는 근거리의 광각 안테나와 원거리의 고지향성 안테나로 구성된 2~3개를 사용한다. 수신 안테나는 장애물의 방위각인 DOA(Direction of Arrival)를 측정하기 위해 배열 구조를 사용하며 차량 충돌방지에 필요한 3~10도 해상도를 얻기 위하여 M=4~16개로 구성된다[3, 4, 6].

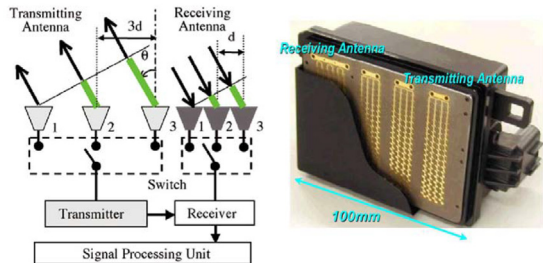


Fig. 4 Phase array multi-beam FMCW radar[5]

III. 신호처리부 구조 설계

효율적인 신호처리부 구현에 적합한 저가 프로세서를 선정하기 위해 요구 기능에 대한 검토가 필요하다. 77GHz 레이더를 100MHz 대역폭, 8개의 수신 안테나를 가정하여 원거리 모드에서 150m까지 1m이하의 거리 분해능과 5Km/s의 속도 정밀도를, 60m의 근거리 모드에서는 0.2m, 1Km/s를 목표로 하였다. 이를 위한 FMCW 파라미터로 $f_s=1\text{MHz}$, $N=1024$, $T=0.5\text{ms}$ 를 선택하였으

며 신호처리부는 다음과 같은 기능이 요구된다.

- I/Q 신호를 동시에 처리하기 위한 ADC 2개
- 최대 8개의 쌍을 선택할 수 있는 ADC 채널
- 10KHz의 삼각파 또는 톱니파용 DAC 2개
- 1024-FFT를 0.5ms 이하로 처리
- 전용 신호처리 연산 기능

위의 요구조건을 충족하면서 주변회로를 최소화하기 위해 마이크로프로세서 계열을 검토하여 TI사의 실시간 MCU 계열인 TMS320F28335를 선택하였다. 주요 특징은 다음과 같다.

- 동작속도: 150MHz, 150MMACS
- 메모리: 68KB RAM과 512KB Flash
- ADC: 16CH 80ns의 단일 12bit ADC
- 기타: 6 고해상도 PWM, 2 CAN, 6 DMA
- 가격: 14\$/1K

16채널의 12비트 단일 ADC를 갖고 있지만 2개의 sample-hold를 내장하여 I/Q 신호에 대한 ADC가 가능하다. DAC 기능은 6개의 고해상도 PWM을 이용하여 간단한 수동소자로 그 기능을 대체할 수 있을 것이다. 차량용 FMCW 레이더 시스템의 주요 기능인 파형발생기(Waveform Generator), FFT, DOA에 대한 구현 방안을 살펴보도록 하겠다.

3.1. PWM을 이용한 파형발생기 설계

파형발생기는 RF부의 VCO에 입력되는 제어전압으로 원하는 주파수 신호로 변조하는 역할을 한다. 일반적으로 프로세서에서 디지털 값을 DAC로 그림 3과 같은 삼각파, 톱니파, 계단파 등을 발생시키는 구조를 사용하고 있다. DAC는 독립적인 DAC나 프로세서 내장형이 가능하며, 요구 채널이 증가하는 경우에 기본적인 구조 변경과 가격 상승이 필요한 단점이 있다.

본 논문에서는 DAC를 사용하지 않고 PWM 신호를 아날로그로 변환하는 방식을 검증하고 구조를 제안한다. 일반적으로 PWM 신호는 적분기를 거쳐 DC로 변환하여 모터제어, 증폭기 이득조정 등에 활용되고 있다. TI의 설계리포트에서는 PWM 신호를 12bit의 해상도로 변환하는 방안을 제시한 바 있다.

선택한 프로세서의 PWM 신호 출력 전압은 3.3V이므로 VCO제어 전압 폭을 1V로 가정하면 PWM 제어 폭은 30%가 된다. TMS320C28335는 150ps단위까지 조절 가능한 고해상도의 HRPWM (High Resolution PWM)을 지원하여 PWM 주파수(f_{PWM})가 2MHz일 때 11.4비트의 해상도를 제공한다[7]. 실제의 12비트 DAC의 최대 전압 폭이 A일 때 LSB의 전압 값(V_{step})은 다음과 같으며

$$V_{step} = \frac{A}{2^{12}} [V] \quad (3)$$

출력영역을 30%만 사용하는 경우로 가정하면 유효 비트(N_{effect})는 다음에서 구할 수 있다.

$$V_{step} 2^{N_{effect}} = 0.3A [V] \quad (4)$$

따라서 유효한 비트는 10.263이 되어 HRPWM이 1비트 이상 더 우수한 결과를 갖는다. 다만 P를 높이면 유효 비트 해상도는 감소하게 되며 본 연구에서는 12비트 DAC의 수준과 유사하도록 f_{PWM} 을 2MHz로 선택하였다.

PWM 출력을 아날로그로 변환하기 위해서는 f_{PWM} 에 의해 발생하는 하모닉 주파수 성분을 제거하도록 필터를 설계해야 한다. 본 논문에서는 참고문헌 [8]에서 사용한 그림 5의 1차 RC 필터를 사용하였다. f_{PWM} 에서 1/10의 이득을 갖도록 차단 주파수를 $f_{PWM}/10$ 인 200KHz로 설계하고 4단으로 직렬 연결하여 -80dB의 감쇄를 얻었다.

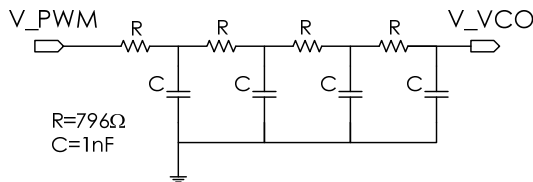


Fig. 5 RC lowpass filter for PWM

그림 3의 송신파형의 주기가 1ms로 가정하면 기본주파수는 1KHz가 되어 푸리에 계수를 200차까지 통과하는 저역통과 필터가 되어 문제가 없을 것이다.

3.2. FFT 처리 부 설계

FFT는 제공되는 라이브러리인 dsplib를 사용하여 구현하였으며 동작 속도는 표 1과 같다. 본 연구에서는 DOA나 빔 포밍을 위해서는 추가적인 FFT가 요구되므로 거리 방향으로는 512pt FFT로 선택하였다.

Table. 1 Real-FFT execution time

FFTSize	Execution Time	
	Cycle	Time (us)
256	5458	36.39
512	10728	71.52
1024	21987	146.58

이는 수신 안테나 수(N)에 따라 512xN의 배열에 대하여 그림 6과 같이 다차원 FFT, 위상보정, 필터링 및 벡터 연산 등이 추가적으로 요구되기 때문이다.

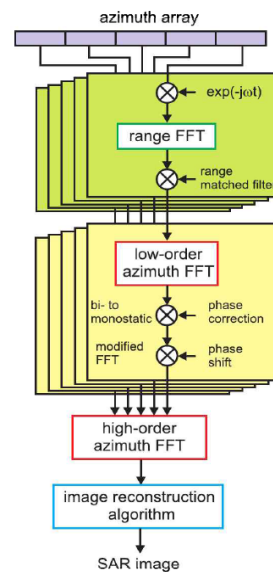


Fig. 6 Block diagram of general DBF[6]

FMCW레이더 거리방향 신호처리로 각 타겟에 대한 (거리, 속도) 쌍이 구해진 후에 각도를 추정하기 위해서 다음과 같은 일반적인 MUSIC 알고리즘을 적용하였다.

$$w(\theta) = \frac{\mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{a}(\theta)}{\mathbf{a}^H(\theta) \mathbf{U}_n \mathbf{U}_n^H \mathbf{a}(\theta)} \quad (5)$$

여기서 $\mathbf{a}(\theta)$ 는 steering 벡터로 안테나 이격 거리와 주파수에 따른 위상차 값이며 \mathbf{U}_n 은 노이즈에 대한 eigenvector로 구성된 단위행렬이다. 많은 계산량이 요구되는 큰 벡터 형식의 알고리즘은 DSP나 마이크로프로세서로 구현할 때 최적화에 따라 성능차이가 크게 나타난다. 다음 절에서 이에 대해 몇개의 방안을 살펴보고 하겠다.

3.3. 기타 알고리즘 구현 방안

FMCW 레이더의 신호처리 알고리즘을 소프트웨어로 구현할 때 sin, sqrt, FFT, matrix 계산 등과 같은 많은 수학적 연산이 요구된다. DSP나 마이크로프로세서를 최적으로 활용하려면 내부 구조를 완벽히 이해한 후 어셈블리어로 구현하는 것이다. 그러나 이 방법은 많은 시간이 소요되어 적용하기 어려우며, 차선의 최적 방법은 제조사에서 제공하는 라이브러리를 최대한 활용하는 것이다. 표준 C언어나 어셈블리의 작성된 알고리즘은 프로세서로 처리하는 과정에서 불필요한 추가 동작이 요구되는 경우가 있기 때문이다.

본 논문에서 사용한 TMS320F28335는 C2000 DSP 계열로 Control Suite라는 관련 라이브러리 모음을 제공하고 있다. 신호처리를 위한 라이브러리가 지원되지 않는 경우에는 C언어로 작성하는 경우 동일한 CPU 성능이라도 더 오랜 시간이 소요되는 경우가 많다. 따라서 사용하는 프로세서에서 제공하는 라이브러리 함수를 충분히 검토해야 한다. 예를 들면 부동소수점 연산을 위한 fastRTS 라이브러리에서 제공된 연산과 관련하여 sqrt()와 isqrt() 함수가 제공되며 각각 28, 25 cycle이 소요된다. 알고리즘에서 루트를 구한 후에 나누는 경우에는 isqrt() 함수를 사용해서 나누기를 제거하는 것이 훨씬 효과적이다. TMS320F28335에서는 곱하기 연산이 1~2cycle에 처리되지만 나누기 연산은 24cycle이 필요하다.

배열에 대한 반복적인 연산은 반드시 벡터연산 함수를 사용해야 한다. 표준의 반복문으로 사용자가 구현하면 인덱스 처리와 메모리 페치를 위한 오버헤드가 필요하므로 최적화된 함수를 사용해야 한다. 예를 들어 식 (6)과 같은 N개의 복소수 배열에 대한 $1/\sqrt{z}$ 를 구하는 과정을 비교해보자. 제공된 함수로는 $25N+13$ cycle이 소요되어 13cycle의 오버헤드만 필요하지만 직접 구현하는 경우에는 4배 이상인 $100N$ 까지 증가한다.

$$Z[i] = \frac{1}{\sqrt{x_{re}[i]^2 + x_{im}[i]^2}} \quad (6)$$

```
#include "fpu_vector.h"
#define SIZE 128U
#pragma DATA_ALIGN(x, 4); // 4byte align
#pragma DATA_ALIGN(z, 4);
complex_float x[SIZE];
float z[SIZE];

main()
{ int i=0;

  iabs_SP_CV(z, x, SIZE); // Optimized code

  do { // User Handy Code
    z[i]=isqrt(x[i].dat[0]*x[i].dat[0]
              + x[i].dat[1]*x[i].dat[1]);
  } while(i++<SIZE);
}
```

여기서 주의할 것은 대부분의 벡터연산 함수는 메모리 정렬이 요구되며 길이가 짝수인 경우에 더 빠른 속도로 처리된다. 이는 컴파일 과정에서 최적화와 규칙성을 확보하여 파이프라인을 극대화하는 과정에서 나타나는 일반적인 현상이다.

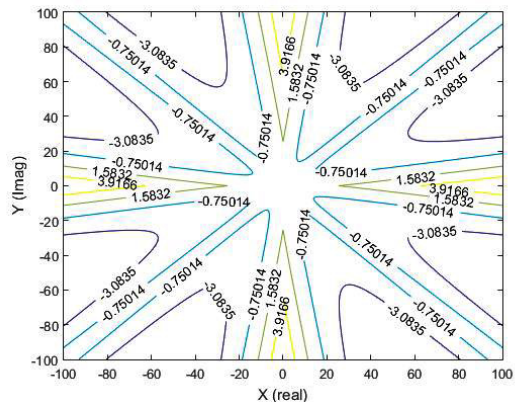


Fig. 7 Approximation error of sqrt function

마지막으로 근사화를 살펴보자. 복소 신호의 크기를 구하는 과정은 sqrt() 함수가 사용되므로 많은 시간이 소요된다. 레이더 신호처리에서는 정확한 크기 값이 필요한 것이 아니라 상대적인 비율을 분석하여 타겟을 검출하는 경우가 많다. 따라서 근사화를 적용하여 계산 시간을 줄일 수 있다. $Z = X + jY$ 라 하면 크

기는 $|Z| = \sqrt{X^2 + Y^2}$ 이 되며 다음과 같이 근사화가 가능하다[9].

$$|Z| \approx \alpha \max(|X|, |Y|) + \beta \min(|X|, |Y|) \quad (7)$$

(α , β)의 조합은 여러 가지가 가능하며 본 연구에서는 (15/16, 15/32)를 사용하였으며 근사화 오차는 실수부와 허수부의 차이가 큰 경우에 커지며 최대 6.25%를 보인다. 그림 7에 X, Y가 [-100, 100]인 경우에 오차를 보였다. 이와 유사한 방법으로 C언어 내장함수나 제공되는 라이브러리 함수를 근사화하는 것도 가능하다. 통상 제공된 수학 함수는 테일러 급수를 일정 차수까지 계산하는 어셈블리어로 구현되어 있다. 정확한 값이 요구되지 않은 경우에는 반복 차수를 조정하여 소요시간을 단축할 수 있다.

IV. 실험 결과

그림 8은 개발된 시스템의 신호처리부 블록도와 보드 사진이다. 8개의 수신 안테나와 2개의 송신 신호를 연결할 수 있도록 설계했으며 다기능 보드로 활용하기 위하여 저가의 FPGA를 추가하였다. 현재 FPGA는 단순히 신호를 통과시키고 있으며 프로세서에 대부분의 기능이 구현되어 있으며 외부 메모리는 256Kx16bit로 데이터 기록을 위한 것으로 본 기능과는 무관하다.

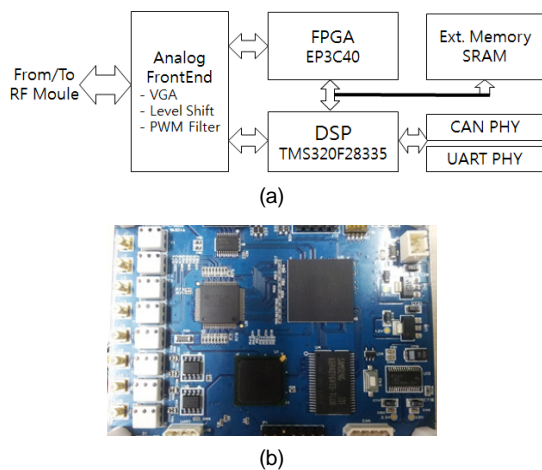


Fig. 8 Proposed System: (a) Block diagram (b) Board

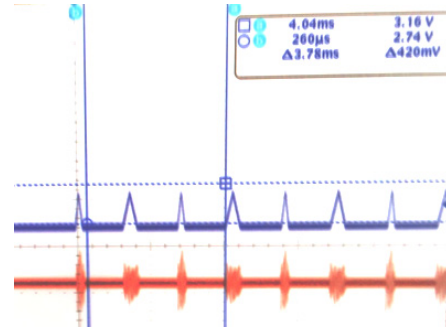


Fig. 9 Measured PWM based DAC signal and received radar signal

그림 9는 고속 PWM기반 DAC로 만든 송신파형으로 VCO를 구동하여 수신된 비트주파수의 FMCW 레이더 신호이다. 송신 파형의 기울기에 따라 거리 해상도가 달라지므로 서로다른 파형을 1개의 쌍으로 구성한 것이다. 송신 전압차는 0.42V이며, 각각의 펄스는 1.4ms의 간격으로 송신된다. 편도 1차전의 도로에서 전방의 차량을 관측한 비트 주파수 신호를 그림 10에 보였다. 근접하는 차량은 레이더와 거리가 가까워지므로 시간에 따라 비트 주파수가 감소하게 되며 멀어지는 차량은 비트 주파수가 증가하는 것으로 관측된다.

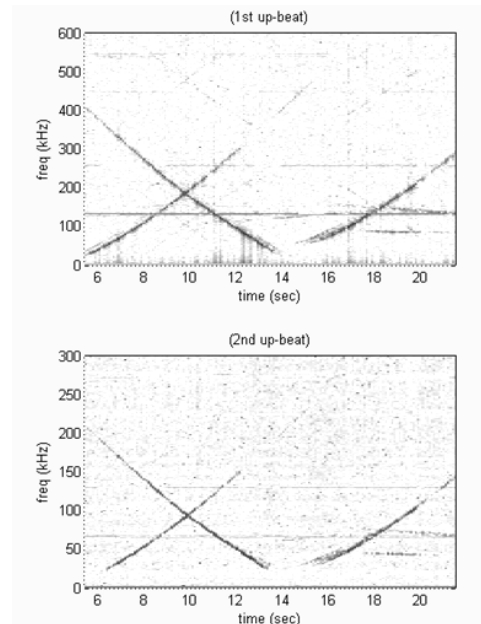


Fig. 10 Detected beat frequency

수평선으로 나타나는 고정된 비트 주파수는 자차의 이동이 없는 경우에 고정 장애물에 의한 것이다. 실제 구현에서는 비트 주파수를 추적하고 위험 구간을 판별하여 운전자에게 경고나 제동을 하게 된다.

구현된 보드의 처리 시간은 수신 길이를 512와 1024로 하여 ADC, FFT, 검출 등 기본 알고리즘을 적용한 경우 각각 285.33us, 589.59us로 측정되었다. 송신파형의 상승 및 하강 구간에서 각각 연산이 필요하므로 펄스 주기를 1.2ms이상으로 설정하면 실시간 동작이 가능할 것이다. 상용 FMCW 레이더 갱신율은 10Hz 수준이므로 충분히 실시간 활용이 가능할 것이다.

다중 안테나에 대한 기능은 RF 모듈을 개발 중에 있어 실제 검증하지 못했다. 그러나 제안된 최적화 및 간략화 방안은 기본 레이더에서 확인하였기 때문에 추가 알고리즘도 동작될 것으로 판단하였다. 다중배열 크기는 소요시간을 고려하여 FFT길이 512, 송신 2개, 수신 4개의 안테나를 갖는 2x4x512 배열로 결정하였다.

V. 결론

최근 차량용 능동안전 시스템은 소형차까지 적용될 정도로 대중화되고 있다. 가격 경쟁력을 확보하고 성능 개선을 위하여 여러 연구에서는 전방용과 측면용 레이더를 통합하고 정확도 개선을 위하여 위상배열, 다중빔안테나 등으로 거리, 속도와 더불어 방위각까지 검출하는 것을 제안하고 있다.

본 논문에서는 이러한 차량용 FMCW 레이더 시스템의 신호처리부를 효율적으로 구현하기 위한 몇가지 방안을 제안하였다. 성능 요구사항을 분석하여 TI사의 저가 프로세서인 F28335를 선정하고 PWM 기반의 DAC를 적용하였으며 근사화 기법과 최적화된 다차원 벡터 연산 방안을 제시하였다. 보드로 구현하여 실험으로 실제 동작을 확인하였다.

마지막으로 본 연구과정에서 TI사는 쿼드코어로 4배 이상의 성능을 갖춘 F2837xD 계열을 발표하였다. 4개의 16bit ADC, 3개의 12bit DAC를 내장하면서도 가격은 동일한 수준이다. 따라서 이 프로세서를 적용하는 것이 더 좋을 것임을 알리는 바이다.

ACKNOWLEDGMENTS

This paper was supported by Research Fund, Kumoh National Institute of Technology

REFERENCES

- [1] M. Skolnik, *Introduction To Radar Systems*, 3rd ed., New York, NY: McGraw-Hill, 2001.
- [2] Rohling, H. "Some radar topics: waveform design, range CFAR and target recognition," in *Advances in Sensing with Security Applications*, Netherlands, Springer, ch. 13, pp. 293-322, 2006.
- [3] S. Jeong, H. Yu, J. Lee, J. Oh, and K. Lee, "A multi-beam and multi-range radar with FMCW and digital beam forming for automotive applications," *Progress In Electromagnetics Research*, Vol. 124, pp. 285-299, Mar. 2012.
- [4] M. Schoor and B. Yang, "High-resolution angle estimation for an automotive FMCW radar sensor," in *Proceeding of International Radar Symposium (IRS)*, Cologne, Germany, pp. 1-5, Sept. 2007.
- [5] M. Schneider, "Automotive radar-status and trends," in *Proceeding of German Microwave Conference (GeMiC 2005)*, Ulm, Germany, pp. 144-147, Apr. 2005.
- [6] A. Ossowska, *Highly Resolved Synthetic Aperture Radar with Beam Steering*, Germany, Ulm, KIT Scientific Publishing, ch. 2, pp. 11-39, 2014.
- [7] Texas Instruments Inc. (2011, October). Reference Guide: TMS320x2833x, 2823x High Resolution Pulse Width Modulator (HRPWM) [Internet]. Available: <http://www.ti.com/lit/ug/sprug02b/sprug02b.pdf>
- [8] A. Kay and A. Wu, Microcontroller PWM to 12bit analog out, Texas Instruments Inc., Dalas, TX, July 2013. Available: <http://www.ti.com/lit/ug/tidu027/tidu027.pdf>
- [9] R. G. Lyons, *Understanding Digital Signal Processing*, 3rd ed., NJ: Prentice Hall, ch. 13, pp. 671-846, 2011.



오우진(Woojin Oh)

1996년: 한국과학기술원 전기및전자공학과 (공학박사)

1996년~1998년: SK 텔레콤 중앙연구원 (선임연구원)

1998년~현재: 금오공과대학교 전자공학부 (교수)

※관심분야: 신호처리, DSP 및 FPGA 시스템 설계 및 구현, 차량용 레이더 신호처리