

논문 2010-47SC-6-5

FMCW 차량용 레이더의 이동타겟 탐지 알고리즘 제안

(Moving Target Detection Algorithm for FMCW Automotive Radar)

현 유 진*, 오 우 진**, 이 중 훈*

(Eugin Hyun, Woojin Oh, and Jong-Hun Lee)

요 약

오늘날 FMCW 레이더 시스템은 차량의 능동 안전 시스템에 널리 활용되어지고 있다. 레이더 시스템에서 탐지확률을 높이고 오경보율을 줄이기 위해서는 정지타겟을 포함한 클러터 성분을 제거하고 관심 있는 이동타겟을 효과적으로 탐지하기 위한 알고리즘이 필요하다. 본 논문에서는 이동타겟 탐지 및 클러터 제거 알고리즘을 제안한다. 먼저 제안된 이동타겟 비트주파수 검출 필터를 이용하여 클러터를 제거한다. 검출된 이동타겟 비트주파수들을 이용하여 데이터-결합 한 후, 제로-도플러 제거 알고리즘을 이용하여 남아있는 클러터를 제거한다. 이 알고리즘을 검증하기 위해 실제 FMCW 레이더를 이용하여 도로 상에서 실험하였다.

Abstract

77GHz FMCW(Frequency Modulation Continuous Wave) radar system has been used for automotive active safety systems. In typical automotive radar, the moving target detection and clutter cancellation including stationary targets are very important signal processing algorithms. This paper proposed the moving target detection algorithm which improve the detection probability and reduce the false alarm rate. First, the proposed moving target beat-frequency extraction filter is used in order to suppress clutter, and then the data association is applied by using the extracted moving target beat-frequency. Then, the zero-Doppler target is eliminated to remove the rest of clutter.

Keywords : FMCW 레이더, 탐지 알고리즘, 이동타겟 탐지

I. 서 론

오늘날 레이더 기반의 운전자 안전 시스템의 활용 범위는 계속 넓어지고 있다. 특히 77GHz FMCW 방식의 레이더는 비교적 외부 환경에 강인하고 구현이 간단하다는 장점에 의해 ACC (Adaptive Cruise Control), CWS (Collision Warning System), CAS(Collision Avoidance System)와 같은 차량용 능동 안전 시스템에 적용되어 진다^[1~2].

FMCW(Frequency Modulation Continuous Wave) 레이더는 선형적 주파수 변조된 신호를 송신한 후 타겟과의 거리에 따른 지연 시간을 주파수 차이로 측정하는 방식이다. 이때 주파수 차이를 비트주파수(Beat frequency)라 하며 정지타겟인 경우에는 오직 거리 정보를 나타낸다. 하지만 이동 타겟인 경우에는 지연 시간에 의한 거리 주파수 값과 상대 속도에 의한 도플러 주파수 값의 조합으로 이루어진다. 따라서 비트주파수로부터 효과적으로 거리-속도를 동시 탐지하기 위한 방법이 요구된다^[3~4].

일반적인 FMCW 레이더 송신 파형 및 수신 알고리즘은 크게 두 가지로 나누어진다^[5].

첫 번째는 2D FFT(Fast Fourier Transform)를 이용하는 방법으로 그림 1과 같은 아주 짧은 톱니파 모양으로 변조된 칩(Chirp) 형태의 FMCW 신호를 사용하는

* 정회원, 대구경북과학기술원 (DGIST)

** 정회원, 금오공과대학교 (Kumho National Institute of Technology)

※ 본 논문은 교육과학기술부 중점연구과제의 연구결과입니다.

접수일자: 2010년7월15일, 수정완료일: 2010년11월15일

것이다. 이때 칩의 PRI(Pulse Repetition Interval)인 T 는 수십 μs 로 아주 짧으며, 속도 해상도를 위해 수십개 이상의 연속된 칩을 전송해야 한다. 이때 첫 번째 FFT를 통해 거리-비트주파수를 검출하고, 두 번째 FFT를 이용하여 도플러 주파수를 구하는 방법이다.

2D FFT를 이용하는 방법은 클러스터를 포함한 정지타겟들은 도플러 주파수가 0으로 탐지되기 때문에, 이 값들을 모두 제거하면 원하는 이동 타겟을 탐지 할 수 있다. 그러나 이 방법에서는 많은 개수의 칩 신호를 전송해야 하므로 신호처리에서 많은 계산량이 요구된다. 또한 도플러 주파수를 검출하기 위해선 비트 신호들의 위상 변화량이 필요하기 때문에 정확한 속도 측정을 위해 위상 잡음을 고려해야 한다.

이 방식의 단점은 정확한 성능을 얻기 위하여 선형성이 우수한 FMCW 송수신기가 요구된다는 것이다. 또한 전송 칩의 PRI가 짧기 때문에 일반적으로 FMCW 레이더에서 사용하는 간단한 VCO(Voltage Controlled Oscillator)와 PLL(Phase Lock Loop)로 구현할 수 없어 DDS(Direct Digital Synthesizer)와 같은 복잡한 회로가 요구된다.

두 번째 방법은 기울기가 다른 삼각파 변조 형태의 레이더 신호를 전송하여 거리-속도를 탐지하는 것으로 그림 2에 나타내었다^[6].

주파수 변조방식이 다른 4개의 칩에서는 거리-속도로 조합된 4개의 비트주파수가 각각 검출된다. 여기서

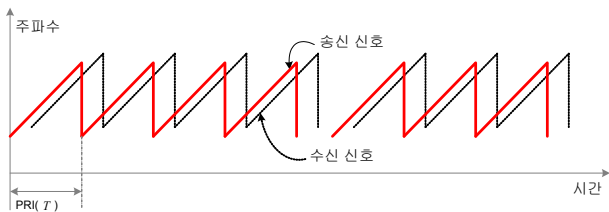


그림 1. 2D FFT를 이용하기 위한 고속 송신 칩 파형 모양
Fig. 1. Fast chirp generation for 2D FFT.

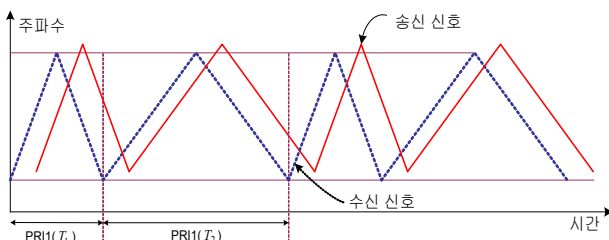


그림 2. 서로 다른 기울기를 가지는 저속 송신 칩 파형 모양
Fig. 2. Slow chirp generation with different slopes.

각 비트주파수를 1st 업-비트주파수, 1st 다운-비트주파수, 2nd 업-비트주파수, 그리고 2nd 다운-비트주파수라고 한다. 타겟의 거리-속도는 검출된 각각의 업 및 다운 비트주파수들을 데이터-결합(Data association)함으로써 구할 수 있다. 이 방법에서는 거리 정밀도를 위해 수 ms의 아주 느린 칩 PRI를 선택하기 때문에 앞선 방법에 비해 계산량이 아주 작을 뿐 아니라, 선형적 주파수 변조 생성을 위한 PLL과 같은 비교적 간단한 회로만이 필요하다.

그러나 이 방법은 검출된 비트주파수가 많이 존재하는 경우, 거리-속도 검출 과정에서 고스트 타겟(Ghost Target)이 발생될 확률이 존재한다^[7]. 따라서 탐지된 거리-속도 정보를 이용하여 클러스터를 포함한 정지타겟을 제거시키는 방법으로는 정확한 탐지를 하는데 한계가 있다. 따라서 4개의 비트주파수의 데이터-결합 연산과정 전에 이동 타겟의 비트주파수만 추출할 수 있는 알고리즘이 별도로 필요하다^[8].

따라서 본 논문에서는 정지타겟을 포함한 클러스터 환경에서 이동 타겟을 효과적으로 검출하기 위한 알고리즘을 제안한다.

먼저 II장에서 제안된 이동타겟 탐지 알고리즘에 대해 설명하고, III장에서는 실제 레이더를 이용한 이동 차량 탐지 결과를 보여주며, V장을 통해 결론짓고자 한다.

II. 제안된 이동타겟 탐지 알고리즘

차량용 레이더의 관심 타겟은 이동타겟으로 이를 효과적으로 탐지하기 위해서는 각종 정지타겟을 포함한 불필요한 클러스터 성분을 제거해야 한다.

일반적인 FMCW 레이더의 거리-속도 탐지를 위한 신호처리 순서는 그림 3과 같다. 여기서 사용된 파형이

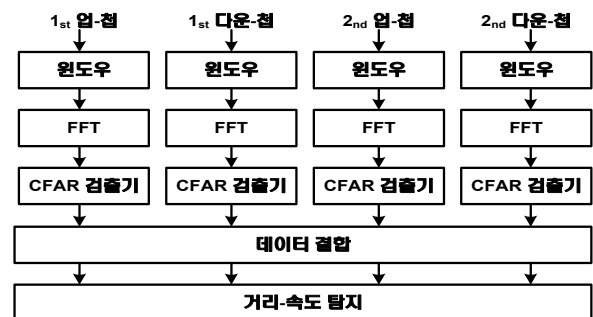


그림 3. 일반적인 FMCW 레이더의 신호처리 순서
Fig. 3. Typical FMCW radar signal processing scheme.

그림 2와 같은 경우이다.

먼저 윈도우와 FFT를 통해 주파수 스펙트럼을 추출하고 CFAR(Constant False Alarm) 검출기를 통해 타겟으로 가정 할 수 있는 비트주파수들을 검출한 후, 데이터-결합을 통해 거리-속도를 탐지된다.

앞서 설명하였듯이, 비트주파수들의 데이터-결합 과정에서 고스트 타겟들이 생성 될 수 있고, 이는 탐지된 비트주파수의 개수가 많을수록 더욱 그러하다. 만약 클러스터의 비트주파수들을 제거 할 수 있다면 데이터-결합 과정에서 고스트 타겟이 발생할 수 있는 확률을 훨씬 줄일 수 있다.

이를 위해 본 논문에서는 그림 4와 같은 FMCW 레이다 신호처리 순서를 제안하였다. 먼저 이동타겟 비트주파수 검출기에서 FFT로부터 추출된 주파수 스펙트럼으로부터 정지타겟을 포함한 클러스터 성분을 제거하고 이동 타겟에 해당하는 비트주파수만 추출 한다. 이를 통해 데이터-결합 과정에서 클러스터 및 고스트 타겟을 상당 부분 제거할 수 있다. 또한 데이터-결합을 통해 검출된 거리-비트주파수와 도플러 주파수에서 제로 도플러 성분을 제거함으로써 최종 클러스터 성분을 제거한다. 이 방식은 추출된 비트주파수와 직전 SRI(Signal Repetition Interval)에서 추출된 비트주파수 값의 차이를 이용하여 이동타겟을 탐지하는 방법으로 사용된 파형을 그림 5에 나타내었다.

일반적으로 레이다에서는 송신 신호를 계속 전송하는 것이 아니라 그림 1 또는 2와 같은 송신 신호를 한번 전송 후 탐지 알고리즘이 동작하는 동안은 송신을

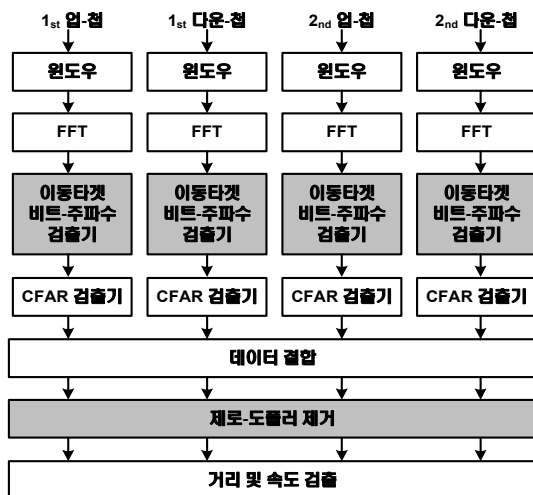


그림 4. 제안된 FMCW 레이다의 신호처리 순서
Fig. 4. Proposed FMCW radar signal processing scheme.

멈추고 타겟 탐지가 완료되면 다시 FMCW 신호를 송신한다. 이때 한번 송신 후 다시 송신하는데 까지 요구되는 시간이 SRI이라 하며, 그 구간 내에 수신 신호처리를 모두 완료하므로 이는 탐지 주기가 된다.

SRI 간에는 시간차가 존재하므로 이동 타겟의 경우 비트주파수 성분이 변할 것이다. 이상적인 경우에는 두개의 SRI에서 동일한 타겟으로부터 추출된 신호의 크기는 거의 같다. 하지만 잡음 또는 타겟 움직임으로 인해 실제 상황에서는 차이가 발생한다. 따라서 단순히 두개의 SRI에서 추출된 신호 크기만으로는 고정 타겟

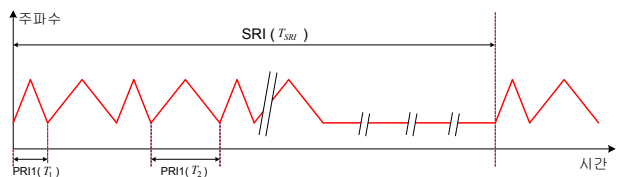


그림 5. 제안된 이동타겟 탐지 알고리즘을 위한 송신 칩 파형 모양
Fig. 5. FMCW radar waveform for the proposed moving target detection algorithm.

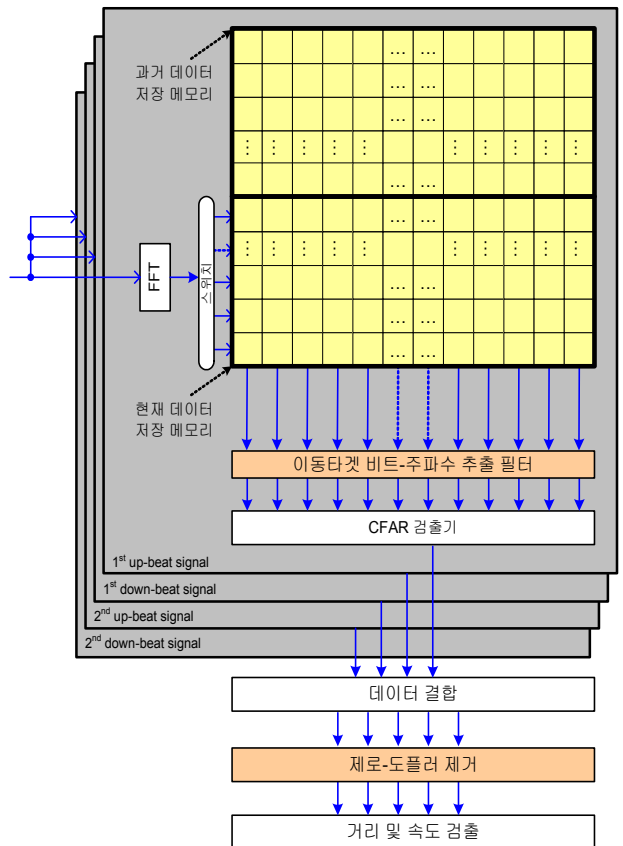


그림 6. 제안된 이동타겟 탐지 알고리즘의 개념도
Fig. 6. The concept of signal processing for the proposed moving target detection algorithm.

과 이동타겟을 구별하는데 어려움이 있다. 이러한 성분을 제거하기 위해 제안된 이동타겟 탐지 알고리즘에서는 하나의 SRI 내에 그림 2와 같은 파형을 여러 번 전송하도록 설계하였다. 그리고 하나의 SRI 내에 수신된 비트주파수 스펙트럼을 평균을 취함으로써 잡음 성분을 제거하였다.

즉, SRI에 비해 칩 신호가 전송되는 구간은 짧으므로 타겟의 움직임은 거의 없다고 볼 수 있다. 하지만 지난 SRI과 현재 SRI 사이에는 타겟이 움직이게 되고 이로 인해 비트주파수가 변화하게 된다.

그림 6은 제안된 이동타겟 탐지 알고리즘의 개념도이다. 수신된 비트 신호는 FFT를 통해 주파수 스펙트럼이 구해지고, 그 결과는 ‘현재 데이터 저장 메모리’에 저장된다. 즉, 수신된 비트 신호는 FFT 처리 후 메모리 첫 번째 가로 라인으로 저장되고 다음으로 두 번째 수신된 비트 신호는 역시 FFT 처리 후 두 번째 가로 라인 공간에 저장되며, 이는 SRI 동안 내에 모든 수신비트 신호를 저장할 때 까지 반복된다. 또한 직전 SRI 동안 저장된 데이터는 ‘과거 데이터 저장 메모리’에 그대로 유지된다. 이렇게 저장된 데이터들은 ‘이동타겟 비트주파수 추출 필터’를 적용 하면 이동타겟만 검출된다. 먼저 전체 메모리의 세로 라인의 데이터들에 DC 필터를 적용시킨다. 이 경우 정지타겟의 경우 주파수 위치 변화가 없으므로 제거 될 수 있다. 이때 DC 필터는 전체 메모리의 세로 라인 데이터의 평균을 취하고 이를 다시 원래 데이터와 차이를 구함으로써 구현된다.

이때 DC 필터에서 비록 데이터들의 평균을 취함으로써 어느 정도 잡음 성분 등을 제거되지만, 남아 있는 잡음 성분으로 인해 고주파 잡음이 발생한다. 이를 제거하기 위해 저역필터(LPF, Low Pass Filter)를 이용하여 최종 이동타겟 비트주파수 스펙트럼을 추출한다.

추출된 주파수 스펙트럼은 CFAR 검출기를 통해 타겟에 해당하는 비트주파수가 검출되고, 이로부터 데이터-결합을 통해 거리-비트주파수와 도플러 주파수 조합으로 구한다. 이때 도플러 주파수가 0인 타겟을 제거함으로써 최종 클러스터를 제거할 수 있다.

III. 실험 결과

제안된 이동타겟 탐지 알고리즘은 실제 주행 시험을 통해 검증 하였으며 사용된 FMCW 레이더 센서의 제원 파라미터(Parameter)는 표 1과 같다. 송신 신호는 그

표 1. 송신 파형 파라미터
Table 1. Waveform parameters.

파라미터	값
중심주파수	76.5GHz
칩의 수	10 set
칩 주기, PRI1 (T ₁)	1ms
칩 주기, PRI2 (T ₂)	2ms
탐지 주기, SRI (T _{SRI})	100ms

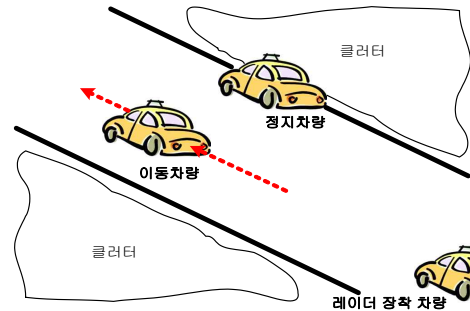


그림 7. 이동타겟 탐지를 위한 실험 환경
Fig. 7. The scenario for moving target detection.

림 2의 칩을 SRI 구간 동안 10번 전송하였다.

시험 환경은 그림 7과 같이 도로에서 레이더가 장착된 차량을 이용하여 정지차량 및 이동차량으로 구성하였다. 도로상에 정지차량과 클러스터가 존재하며 이동타겟이 레이더로부터 멀어지는 상황이다.

그림 8은 전방으로부터 수신된 비트 신호를 FFT 및 CFAR 알고리즘을 적용하여 4개의 비트주파수를 검출한 결과이다. 여기서 가로축은 시간(sec)이고, 세로축은 주파수(kHz)이다. 정지타겟을 포함한 클러스터가 시간이 지나도 동일 주파수 위치에 거의 나타나는 반면, 이동타겟은 시간에 따라 주파수가 증가함을 알 수 있다.

그림 9는 FFT의 결과인 주파수 스펙트럼에 그림 6의 제안된 이동타겟 탐지 알고리즘을 적용시킨 후 CFAR 검출기를 통해 비트주파수를 검출한 결과이다. 정지타겟 비트주파수가 상당히 제거되고 이동타겟 비트주파수가 남아 있음을 알 수 있다. 여기서 가로축은 시간(sec)이고, 세로축은 첫 번째 주파수(kHz)이다.

그림 9에서 검출된 4개의 비트주파수 성분들을 이용하여 데이터-결합 알고리즘을 적용하여 거리값을 추출한 결과가 그림 10에 나타나있다. 여기서 가로축은 시간(sec)이고, 세로축은 거리(m)이다.

먼저 그림 10(a)는 데이터-결합을 통해 얻어진 거리값이다. 여전히 클러스터 성분들이 약 44개로 다소 남아 있음을 알 수 있다.

이렇게 탐지된 타겟 성분들 중에서 도플러 주파수가

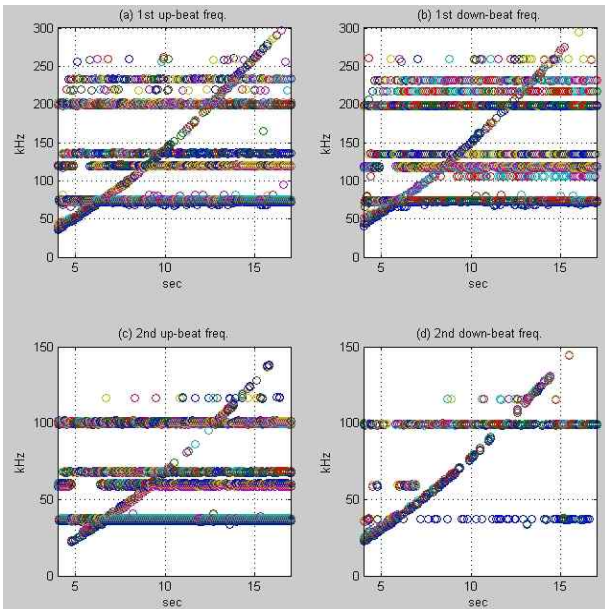


그림 8. CFAR 검출에 따른 주파수 프로파일, (a) 1st 업-비트주파수, (b) 1st 다운-비트주파수, (c) 2nd 업-비트주파수, (d) 2nd 다운-비트주파수

Fig. 8. Frequency profile using CFAR detector, (a) 1st up-beat frequency, (b) 1st down-beat frequency, (c) 2nd up-beat frequency, (d) 2nd down-beat frequency.

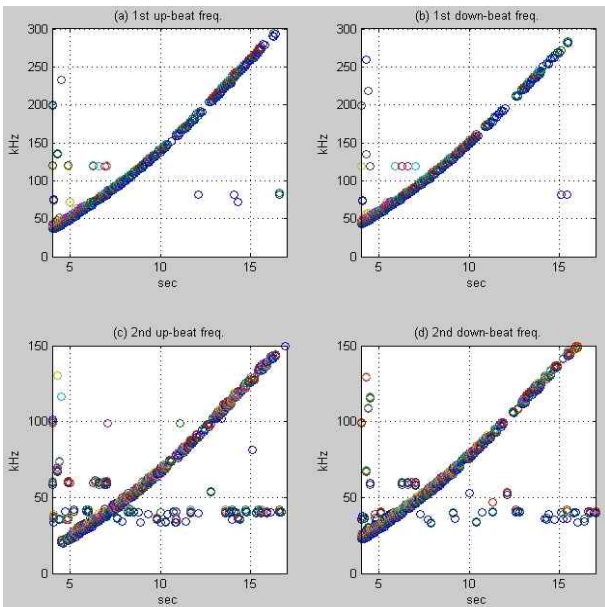


그림 9. 제안된 이동타겟 탐지 알고리즘이 적용된 주파수 프로파일, (a) 1st 업-비트주파수, (b) 1st 다운-비트주파수, (c) 2nd 업-비트주파수, (d) 2nd 다운-비트주파수

Fig. 9. Frequency profile using moving target detection algorithm, (a) 1st up-beat frequency, (b) 1st down-beat frequency, (c) 2nd up-beat frequency, (d) 2nd down-beat frequency.

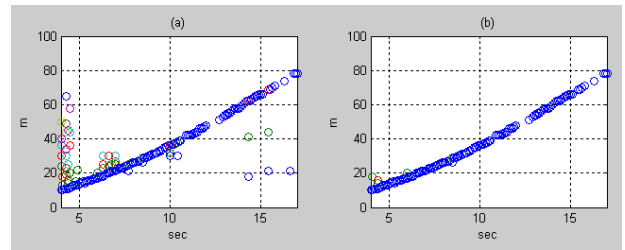


그림 10. 탐지된 거리 정보를 추출한 결과, (a) 제로-도플러 제거 전, (b) 제로-도플러 제거 후

Fig. 10. The range detection result, (a) before and (b) after zero-Doppler cancellation.

제로인 성분들을 제거하면 그림 10(b)와 같은 결과를 얻을 수 있다. 실험 결과에서 클러스터 성분들이 5개 이하로 약 89%가 제거되어 졌음을 알 수 있다.

IV. 결론 및 향후 연구방향

본 논문에서는 정지타겟을 포함한 클러스터 성분이 존재하는 실제 도로환경에서 이동타겟을 탐지하기 위한 알고리즘을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 이동타겟 비트주파수 검출 단계와 제로-도플러 타겟 제거 단계로 나누어진다. 이동타겟 비트주파수 검출 단계에서는 DC 필터를 통하여 정지타겟의 비트주파수를 먼저 제거시키고, 지역필터를 이용하여 남아있는 고주파 잡음을 제거하였다. 다음으로 제로-도플러 타겟 제거 단계에서는 비트주파수의 데이터-결합 이후 나타나는 클러스터를 제거하는 단계이다. 즉, 도플러 주파수가 제로인 성분을 제거함으로써 FMCW 오경보율을 낮춤으로써 레이더 탐지 성능을 향상시킬 수 있다.

향후 제안된 알고리즘은 다양한 도로 테스트를 통해 다중 타겟 탐지 등에 적용하고, 실제 임베디드 시스템에 적용할 예정이다.

참고 문헌

[1] F. Folster, H. Rohling, U. Lubbert, "An automotive radar network based on 77 GHz FMCW sensors," Radar Conference 2005, pp. 871-876, Arlington, U.S.A., May, 2005.
 [2] H. Rohling, C. Moller, "Radar waveform for automotive radar systems and applications," Radar Conference 2008, pp. 1-4, Rome, Italy, May, 2008.
 [3] 현유진, 오우진, 이종훈, "차량용 FMCW 레이더의

다중 타겟 검출을 위한 신호처리부 구조 제안,” 대한입베디드공학회 논문지, 제5권, 제2호, 93-101쪽, 2010년 6월

[4] 현유진, 이종훈, “FMCW 레이더의 거리 및 속도 오차 향상을 위한 신호처리부 하드웨어 구조 제안,” 한국자동차공학회 논문지, 제18권, 제4호, 54-61쪽, 2010년 7월

[5] Volker Winkler, “Range Doppler Detection for automotive FMCW Radar,” Proceedings of the 4th IEEE European Radar Conference, pp. 166-169, Munich, Germany, Oct., 2007.

[6] H. Rohling, M. Meinecke, “Waveform design principles for automotive radar systems,” Radar, 2001 CIE International Conference on, Proceedings, pp. 1-4, Beijing, China, Oct., 2001.

[7] Eugin Hyun, Jong-Hun Lee, “A Method for Multi-target Range and Velocity Detection in Automotive FMCW Radar,” Proceedings of the 12th International IEEE Conference on Intelligent Transportation Systems, pp. 7-11, St. Louis, U.S.A, Oct. 2009.

[8] 현유진, 오우진, 이종훈, “77GHz FMCW 레이더 이동 차량 검출 기법,” 대한전자공학회 제6회 국방 정보 및 제어기술 학술대회, 112쪽-114쪽, 영주, 대한민국, 2010년 7월

저 자 소 개



현 유 진(정회원)
 1999년 영남대학교 전자공학과 학사졸업.
 2001년 영남대학교 전자공학과 석사졸업.
 2005년 영남대학교 전자공학과 박사 졸업.

2005년~현재 대구경북과학기술원 선임연구원.
 2007년~현재 영남대학교 대학원 전자공학과 겸임교수.
 <주관심분야 : 레이더 디지털신호처리, FPGA 구현, 차량용레이더>



오 우 진(정회원)
 1989년 한양대학교 전자공학과 학사졸업.
 1991년 한국과학기술원 전기및 전자공학과 석사졸업.
 1996년 한국과학기술원 전기및 전자공학과 박사졸업.

1996년~1998년 SK텔레콤 선임연구원.
 1998년~현재 금오공과대학교 전자공학부 교수.
 2010년~현재 대구경북과학기술원 겸임연구원
 <주관심분야 : 디지털신호처리, 통신신호처리>



이 종 훈(정회원)
 1996년 성균관대학교 전자공학과 학사졸업.
 1998년 성균관대학교 전기전자 컴퓨터공학과 석사졸업.
 2002년 성균관대학교 전기전자 컴퓨터공학과 박사졸업.

2002년~2005년 삼성전자 통신연구소 책임연구원.
 2005년~현재 대구경북과학기술원 과제책임자/선임연구원.
 2007년~현재 영남대학교 정보전자공학부 겸임교수.
 <주관심분야 : 레이더/비전 융합신호처리, 차량용레이더>