

고속 Multi-DSP를 이용한 전차 탑재 펄스 도플러 레이더 신호 처리기 개발

Pulse Doppler Radar Signal Processor Development for Main Battle Tank Using High Speed Multi-DSP

박 규 철 · 하 종 수

Gyu-Churl Park · Jong-Soo Ha

요 약

전차 탑재 레이더는 기상에 관계없이 전천후로 대전차 미사일을 탐지하는 능동 방호 장치의 필수적인 센서이다. 본 논문에서는 전차 탑재 미사일 경고 레이더를 소개하고, 주요 핵심 기술로 고속의 멀티 DSP를 이용한 신호 처리기를 설계 및 제작 결과를 제시하였다. 핵심 알고리즘으로는 어댑티브 CFAR, 가중 선형 근사 알고리즘, 소프트웨어 추적, 위협 분석 등을 구현하였으며, 시험 결과를 제시하였다.

Abstract

A missile warning radar is an essential sensor for active protection system to detect antitank missile in all weather environments. This paper introduces missile warning radar for main battle tank and presents the results of the design and implementation of the radar signal processor using high speed multi-DSP. The key algorithms include adaptive CFAR, weighted linear fitting algorithm, S/W tracking capability, and threat decision and present test result.

Key words : Missile Warning Radar, Threat Decision, High Speed Multi-DSP, Doppler FFT

I. 서 론

대전차 미사일, 로켓 등 대전차 무기의 발전으로 관통력이 크게 증가되고 있다. 특히 대전차 미사일은 발전 속도가 빨라서 관통력이 크게 증대되고, 가시선상(line of sight) 유도 방식에서 독자적인 탐색기의 장착으로 사격 후 망각(fire on forget) 방식으로 발전하는 추세이다^[1].

이러한 대전차 위협 수단으로부터 생존을 보장하기 위해서는 미사일의 접근을 조기에 탐지하고 빠른 시간 내에 위협 여부를 판단해야 한다. 공격해 오는 미사일을 가능한 원거리에서부터 탐지하고 탐지된 미사일이 전차에 도달하는 시간(TTI: Time to Impact)

을 계산하여 적절한 시간에 다영역 차장 연막(가시광선, 적외선, mmw 차장 연막)을 미사일의 공격 방향으로 분산 발사한다. 연막 차장으로 미사일의 관측/조준 및 자체 유도를 불가능하게 하면서 전차는 급속으로 회피 기동하여 전차의 생존을 보장하는 방법이 유도교란형 능동 방호 장치이다.

본 논문에서는 전차에 탑재 가능한 레이더를 제작하여 능동형 탐지 센서로 이러한 미사일을 탐지하기 위한 신호 처리기 개발에 관하여 기술하였다. 즉, 고속 멀티 DSP를 이용한 레이더 신호 처리기와 신호 처리 알고리즘을 개발하였고, 알고리즘은 방위각 계산, 위협 판단, 소프트웨어 추적, 임계값 결정과 3/5 탐지 알고리즘 등이 있으며, 알고리즘을 적용한

국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· 논문 번호 : 20090805-080

· 수정완료일자 : 2009년 9월 15일

다양한 시험 결과를 제시하였다.

II. 전차 탑재 레이더 시스템

본 레이더 시스템은 코히어런트 방식의 펄스 도플러 기법을 적용하여 대전차 미사일을 탐지, 추적 및 방위각을 계산하고 위협을 판단하는 기능을 가지고 있으며, 최대 탐지 거리는 X km까지 가능하도록 설계하였다.

표 1은 전차 탑재 레이더 시스템의 주요 사양을 나타낸 것이다.

전차 탑재 레이더 시스템의 개략 구성도는 그림 1과 같다. 전방 180° 방향에 대하여 대전차 미사일을 탐지하기 위해 안테나부 2개, 송수신 신호 처리기, 전원공급기로 구성된다.

표 1. 전차 탑재 레이더 시스템 주요 사양
Table 1. MWR system parameter.

항목	사양
탐지 거리	X km
펄스 폭	2 μ s
탐지 확률	50 % for SW1, RCS 0.05 m ²
오경보 확률	7.96E-8
거리 분해능	240 m
안테나 이득	8.3 dBi
빔 폭	78°(수평)/60°(수직)
스캔 범위	180°(수평)/60°(수직)
탐지 갱신 시간	0.4초
추적 갱신 시간	0.2초

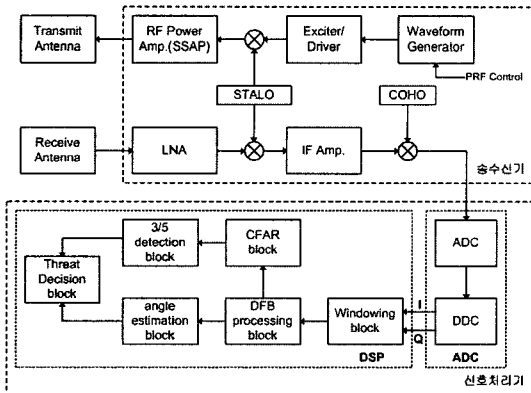


그림 1. 시스템 블럭도
Fig. 1. System block diagram.

III. 레이더 신호 처리부 구성

3-1 레이더 신호 처리기 설계 및 제작

레이더 신호 처리부는 아날로그 수신 신호를 디지털 신호로 변환하여 각종 알고리즘을 통해 표적을 탐지, 추적하여 위협을 판단하는 기능을 수행하며, 제작된 신호 처리부 구성은 그림 2와 같다. 레이더 시스템의 개발 사양 및 목표 성능 요구 조건에 부합되는 신호 처리부의 설계 사양은 표 2와 같다.

레이더 신호 처리기는 수신기에서 5 MHz의 IF 신호를 20 MHz의 샘플링 속도로 디지털 신호로 변환하여 DDC(Digital Down Conversion)에서 기저 대역 신호로 하향 변환하고 4:1 decimation하여 각종 레이더 신호 처리 알고리즘을 수행한다.

레이더 신호 처리부는 DSP(Digital Signal Processing Module), ADCM(Analog to Digital Converter Module), TCM(Timing Control Module)으로 구성되어 있다. DSP은 DFB(Doppler Filter Bank), CFAR 알고리즘, TWS 추적, 위협 판단을 처리하는 핵심 모듈이

표 2. 신호 처리 설계 사양
Table 2. Signal process design parameter.

구분	사양
PRF	39 kHz
거리 셀	8
Dwell 시간	157 ms
도플러 बैं크	1,024
표적 추적	5개(TWS)

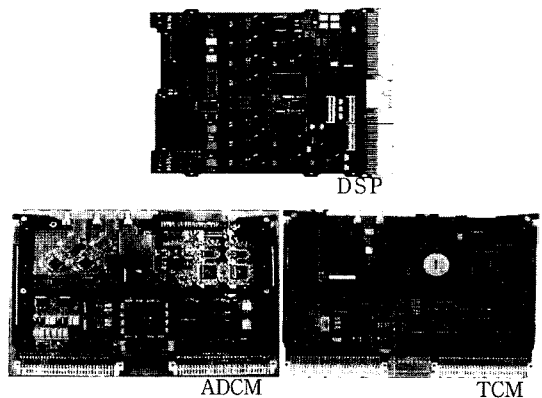


그림 2. 제작된 신호 처리부 모듈
Fig. 2. Signal processing module.

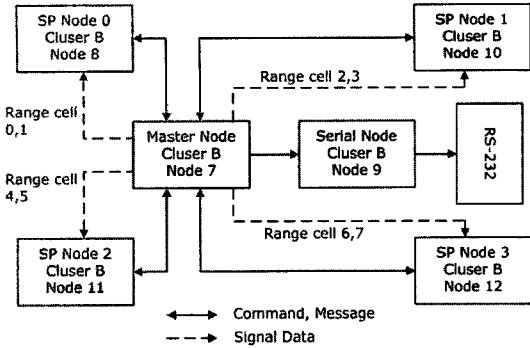


그림 3. 신호 처리 코어 분배
Fig. 3. Signal process task assignment.

며, DSP 칩 ADSP-21060 SHARCs이 탑재된 VME64 버스의 DSP 보드를 선정하여 알고리즘 처리를 담당하게 하였고, 신호 처리 알고리즘에 대한 코어의 분배는 그림 3에 보였다^[2].

ADCM은 아날로그-디지털 신호 변환기로 신호를 샘플링하여 VME 버스를 통해 DSP 보드로 데이터 전송하는 기능을 수행하고 그림 4에 ADCM 모듈 기능을 나타내었다^[3].

TCM은 신호 처리부의 각종 타이밍과 인터페이스를 제어하는 기능을 수행하고, 그림 5에 TCM 모듈 기능을 나타내었다.

3-2 레이더 신호 처리 알고리즘

본 레이더의 신호 처리 구성은 그림 6과 같고, 개발된 신호 처리 핵심 알고리즘은 방위각 계산, 위협

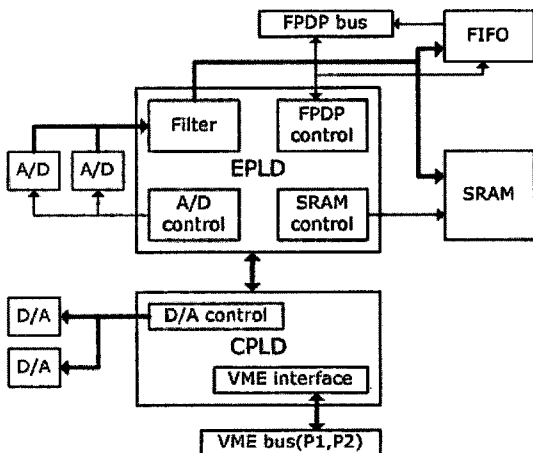


그림 4. ADCM 모듈 기능도
Fig. 4. ADCM function block.

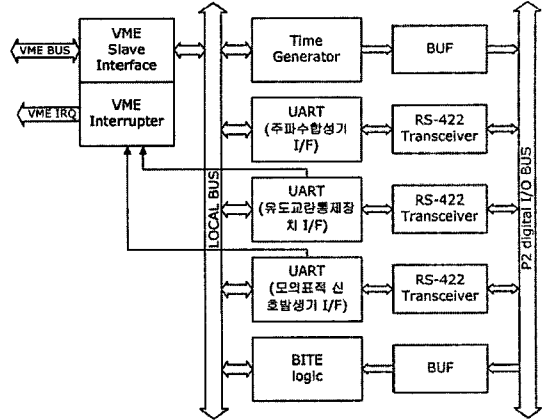


그림 5. TCM 모듈 기능도
Fig. 5. TCM function block.

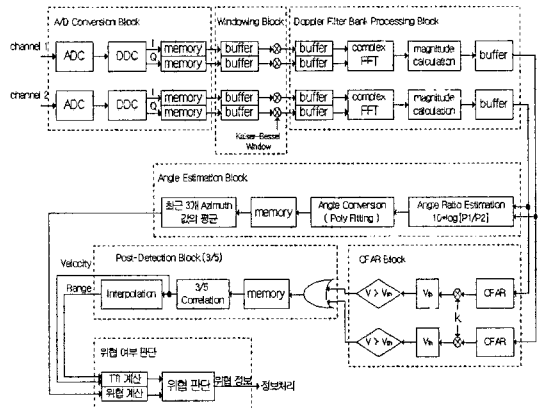


그림 6. 레이더 신호 처리 구성
Fig. 6. Block diagram of radar signal processing.

판단, TWS 추적, 임계값 결정, 3/5 탐지 알고리즘 등이 있다.

3-2-1 방위각 계산 알고리즘

방위각은 안테나 좌우 채널의 수신 전력을 비교하여 계산하며, 다음 식으로부터 얻을 수 있다^[4].

$$\phi_i = \sum_{j=0}^3 a_j (P_{Li} - P_{Ri} - P_{Lcal} + P_{Rcal})^j \quad (1)$$

여기서 $a_3 = -0.0013$, $a_2 = -0.0007$, $a_1 = -3.8267$, $a_0 = 3.3311$ 이고, 이들 계수는 그림 7로부터 얻을 수 있다. P_{Li} 는 왼쪽 채널로 수신되는 전력, P_{Ri} 는 오른쪽 채널로 수신되는 전력, P_{Lcal} 은 왼쪽 채널에 인가된 기준 전력, P_{Rcal} 은 오른쪽 채널에 인가된 기준 전력이다.

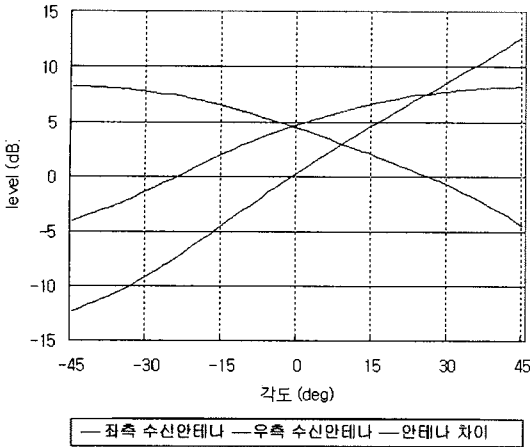


그림 7. 안테나의 각도별 이득
Fig. 7. The antenna gain of radar.

방위각 계산 알고리즘은 클러스터 내의 값들을 신호대 잡음비에 따라 가장 평균을 취하여 식 (1)의 P_{Li} 과 P_{Ri} 를 구하는 방식의 알고리즘을 적용하였다.

3-2-2 위험 판단 알고리즘

측정된 방위각을 이용하여 가중치 w_i 를 반영한 방위각 변화율 $\dot{\phi}$ 은 다음 식으로 구할 수 있다^[5].

$$\dot{\phi} = \frac{\overline{T \cdot \Phi} - \overline{T} \cdot \overline{\Phi}}{T^2 - (\overline{T})^2}$$

$$w_i = \frac{1}{\sigma_i^2}, \quad \overline{T} = \frac{\sum w_i t_i}{\sum w_i}, \quad \overline{T^2} = \frac{\sum w_i t_i^2}{\sum w_i},$$

$$\overline{\Phi} = \frac{\sum w_i \phi_i}{\sum w_i}, \quad \overline{T \cdot \Phi} = \frac{\sum w_i t_i \phi_i}{\sum w_i}, \quad (2)$$

ϕ_i 는 표적의 방위각 정보, $\dot{\phi}$ 는 방위각 변화율, t_i 는 TTI이고, σ_i 는 방위각 오차이며, 이는 표적의 신호대 잡음비 함수이고 식 (3)과 같다^[6].

$$\sigma_i = \frac{\theta_{BW}}{k_m \sqrt{2SNR}} \quad (3)$$

θ_{BW} 는 안테나의 3 dB 빔 폭이며, k_m 은 정규화된 모노 펄스의 기울기이다.

3-2-3 TWS 추적 알고리즘

추적 필터는 α - β 추적기를 사용하고, 일반적인 α - β 추적기는 속도와 거리 정보를 사용하나, 미사

일 경고 레이더는 속도 정보가 거리 정보보다 훨씬 정확하므로 속도와 가속도의 정보를 이용하여 추적 필터를 동작시킨다^[7].

$$x_p(k) = x_s(k-1) + v_s(k-1)T + a_s(k-1)T/2$$

$$v_p(k) = v_s(k-1) + a_s(k-1)T$$

$$x_s(k) = x_p(k) + \alpha[x_m(k) - x_p(k)]$$

$$v_s(k) = v_p(k) + \alpha[v_m(k) - v_p(k)]$$

$$a_s(k) = a_s(k-1) + \beta v[v_m(k) - v_p(k)]/T \quad (4)$$

$x_s(k)$ 는 smoothed 위치, $v_s(k)$ 는 smoothed 속도, $x_p(k)$ 는 예측된 위치, $x_m(k)$ 는 측정된 위치, $v_p(k)$ 는 예측된 속도, $v_m(k)$ 는 측정된 속도이다.

α, β 값은 다음과 같이 적용한다. $k=1$ 이면 $\alpha=1, \beta=0$ 이고 $k=2$ 이면 $\alpha=\frac{1}{2}, \beta=0$ 이고 $k=3$ 이면 $\alpha=\frac{1}{3}, \beta=0$ 이고 $3 < k < 13$ 이면 $\alpha=\frac{4}{k+9}, \beta=\frac{\alpha^2}{2-\alpha}$ 이고, $13 \leq k$ 이면 $\alpha=\frac{4}{22}, \beta=\frac{\alpha^2}{2-\alpha}$ 이다.

3-2-4 임계값 결정 알고리즘

임계값은 과대응률과 미대응률의 결과에 따라 결정되며, 과대응률 p_o 와 미대응률 p_m 은 식 (5)와 같다^[5].

$$p_o = 1 - \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{\bar{\phi}_T - m_2}{\sqrt{2}\sigma_2}\right) + \frac{1}{2} \operatorname{erfc}\left(\frac{-\bar{\phi}_T - m_2}{\sqrt{2}\sigma_2}\right)$$

$$p_m = \operatorname{erfc}\left(\frac{\bar{\phi}_T - m_1}{\sqrt{2}\sigma_1}\right) = 1 - \operatorname{erf}\left(\frac{\bar{\phi}_T - m_1}{\sqrt{2}\sigma_1}\right) \quad (5)$$

임계값 $\bar{\phi}_T$ 는 식 (5)로부터 식 (6)으로 구할 수 있다.

$$\bar{\phi}_T = \operatorname{erf}^{-1}(1 - p_m) \cdot \sqrt{2}\sigma_1 + m_1 \quad (6)$$

3-2-5 3/5 탐지 알고리즘

작은 레벨의 표적 신호를 FFT 처리에 의해 탐지 레벨까지 끌어 올리려면, 드웰 타임 동안 많은 펄스들을 누적해야 한다. 또한 탐지 확률을 높이기 위해 2,048개의 펄스들의 묶음 3개를 2:1 decimation을 수행하고 그림 8과 같이 윈도우 특성에서 데이터 적용

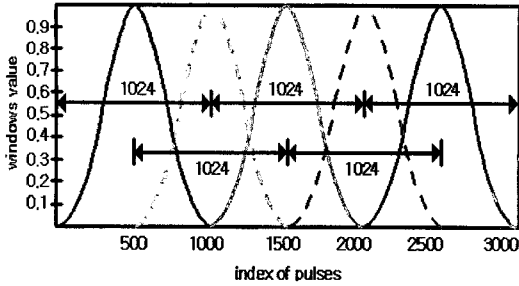


그림 8. DFB의 샘플 프레임 구성 윈도우
Fig. 8. DFB frame window structure.

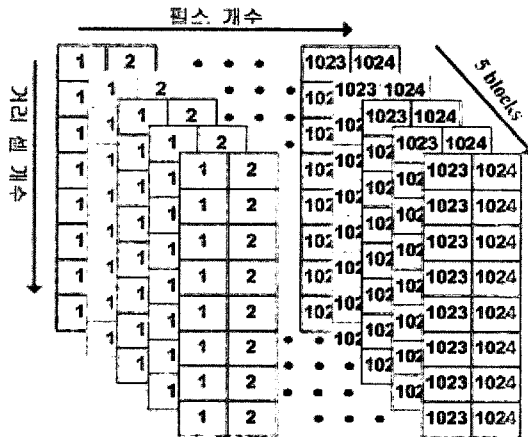


그림 9. 3/5 탐지 알고리즘 프레임 구조
Fig. 9. 3/5 detection algorithm frame structure.

율이 낮은 점선 부분의 2개 영역을 추가하여 5개로 확장하여 그림 9와 같이 프레임 구조를 구성하였다.

하나의 버스트에 대한 탐지 확률 P_{d1} 를 구하는 공식은 다음과 같다^[8].

$$P_{d1} = P_{fa} \frac{1}{1 + \frac{SNR}{2}} \quad (7)$$

이렇게 구한 1 버스트에 대한 탐지 확률 P_{d1} 을 이용하여 3/5 탐지 알고리즘의 탐지 확률 $P_{3/5}$ 는 식 (8)과 같이 구할 수 있다.

$$P_{3/5} = P_{d1}^5 + {}_5C_1 P_{d1}^4 (1 - P_{d1}) + {}_5C_2 P_{d1}^3 (1 - P_{d1})^2 \quad (8)$$

탐지 확률을 높이기 위하여 OR 연산시 탐지 확률 P_d 는 식 (10)으로 구할 수 있다.

$$P_d = 1 - (1 - P_{3/5})^2 \quad (9)$$

3-3 레이더 시험 결과

대전차 미사일 토우의 RCS를 만족하도록 155 mm 곡사포의 탄을 이용하여 시험탄을 제작하였다. 이 시험탄을 이용하여 포 사격 시험장에서 레이더 탐지 및 위협 판단 시험을 수행하였다. 시험 결과, 정면으로 발사된 모든 탄에 대하여 위협 판단을 하였으나, 200 m 이상 이격된 위치로 발사된 탄들에 대해서도 일부 위협 판단을 하여 과대응률이 37.5 %가 되었다.

그림 10에 레이더 탐지 시험 장소를 나타내었고^[9], 그림 11에 정면으로 발사된 시험탄에 대한 탐지 궤적을 나타내었으며, 방위각이 좌우로 많이 흔들렸지만 정면을 향한 것을 알 수 있고 양호한 위협 판단 결과를 얻었다. 그림 12에 200 m 이격된 위치로 발사된 시험탄에 대한 결과로 방위각이 좌우로 흔들리기는 하지만 일정한 방향성을 갖고 있다. 50 %의 확률로 위협을 판단하였다. 그림 13에 300 m 이격된 위치로 발사된 시험탄에 대한 결과로 방위각이 매우 많이 좌우로 흔들렸지만 100 %의 확률로 비위협으로 판단하였다. 그림 14에 400 m 이격된 위치로 발사된 시험탄에 대한 탐지 궤적을 나타내었고, 방위각이 좌우로 많이 흔들렸지만 50 %의 확률로 위협을 판단하였다. 그림 15에 정면으로 발사된 대전차 미사일 메티스 엠에 대한 탐지 궤적을 나타내었고, 시험탄에 비해 레이더 반사 단면적이 7 dB 이상 적

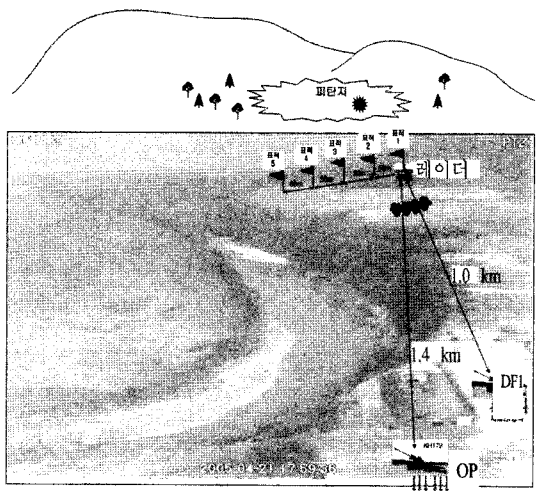


그림 10. 레이더 탐지 시험
Fig. 10. The detection test of radar.

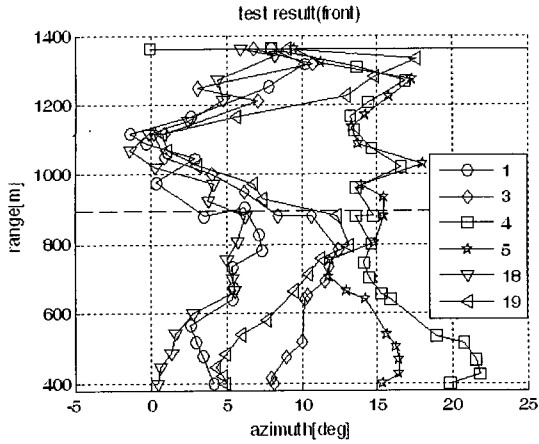


그림 11. 시험탄 표적 탐지 궤적 - 정면
Fig. 11. Target detection track - front.

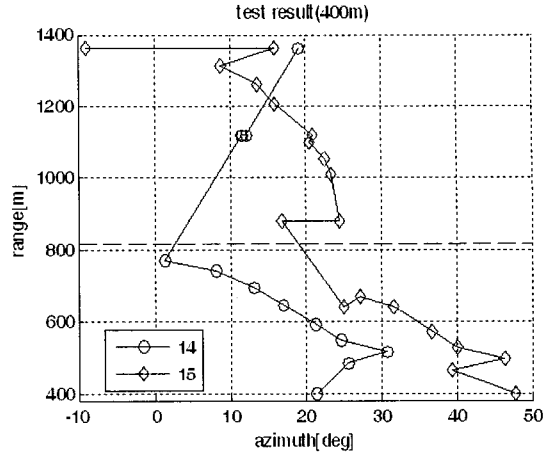


그림 14. 시험탄 표적 탐지 궤적 - 400 m
Fig. 14. Target detection track - 400 m.

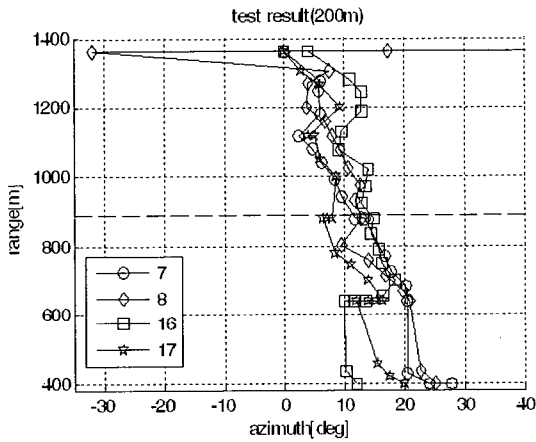


그림 12. 시험탄 표적 탐지 궤적 - 200 m
Fig. 12. Target detection track - 200 m.

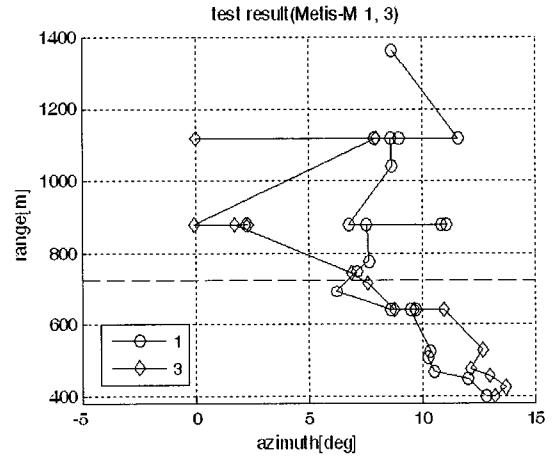


그림 15. 메티스 엠 표적 탐지 궤적 - 정면
Fig. 15. Metis-M target detection track - front.

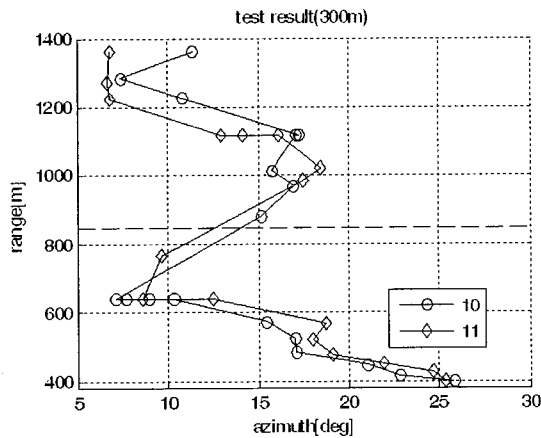


그림 13. 시험탄 표적 탐지 궤적 - 300 m
Fig. 13. Target detection track - 300 m.

지만 100 % 전부 위협으로 판단하였다.

표 3에 각 시험 조건에서 위협이 판단된 TTI를 나타내었고, 실제 능동 방호 장치는 TTI 3.5~3.0초 사이에 위협으로 판단하면 연막 차장 및 회피 기동 등 대응 수단이 작동 가능하다.

IV. 결 론

개발된 미사일 경고 레이더 시스템의 신호 처리기를 설계 및 제작하고, 실험실 시험과 야외시험을 통하여 시스템 설계 사양을 만족함을 확인하였다. 또한 다양한 레이더의 기능 시험과 능동 방호 장치

표 3. 위협 판단 결과

Table 3. Threat decision result.

이격 거리	정면	200 m	300 m	400 m
시험탄	(1) 3.3	(7) x	(10) 2.9	(14) x
	(3) 3.3	(8) x	(11) 2.9	(15) 3.3
	(4) 3.3	(16) 3.3		
	(5) 3.3	(17) 3.3		
	(18) 3.5			
	(19) 3.1			
매티스 엠	(M1) 3.3			
	(M3) 3.3			
대응 확률	100 %	50 %	0 %	50 %

통합 시험을 통하여 신호 처리 알고리즘의 성능을 확인하였다.

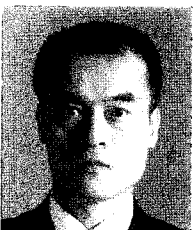
참 고 문 헌

[1] 박규철, 하중수, 이종민, "방호용레이더 기본시제 시스템 설계", 국방과학연구소 연구보고서, 2006년 6월.
 [2] 박규철, 하중수, "방호용레이더 ADC 보드 설계

및 분석", 국방과학연구소 연구보고서, 2009년 2월.

[3] 박규철, 하중수, 이정수, "흑표 방호용레이더의 하드웨어 설계", 국방과학연구소 연구보고서, 2007년 11월.
 [4] 박규철, 이종민, "고속/소형 표적 탐지 센서의 소프트웨어 구조 및 설계", 국방과학연구소 연구보고서, 2003년 6월.
 [5] 박규철, 홍성용, "확률 모델을 이용한 미사일 경고 레이더의 효과도 분석", 한국전자과학회논문지, 20(6), pp. 544-550, 2009년 6월.
 [6] Samuel M. Sherman, *Monopulse Principles and Techniques*, Artech House, 1984.
 [7] 하중수, 박규철, 이정수, "흑표 방호용레이더의 소프트웨어 설계", 국방과학연구소 연구보고서, 2007년 11월.
 [8] 하중수, 박규철, "방호용레이더 정확도 분석", 국방과학연구소 연구보고서, 2006년 8월.
 [9] 박규철, 하중수, "전차 탑재 L-밴드 펄스 도플러 레이더 설계 및 제작", 한국전자과학회논문지, 20(6), pp. 580-588, 2009년 6월.

박 규 철



1989년 2월: 단국대학교 전자공학과 (공학사)
 1991년 2월: 단국대학교 전자공학과 (공학석사)
 1991년 2월~현재: 국방과학연구소 선임연구원
 [주 관심분야] 근거리 레이더 시스템 설계, Tx/Rx 모듈 설계

하 중 수



2001년 2월: 고려대학교 전자공학과 (공학사)
 2003년 2월: 고려대학교 전자공학과 (공학석사)
 2003년 3월~현재: 국방과학연구소 연구원
 [주 관심분야] 레이더 신호 처리, 센서 및 성능분석 M&S