

# 전차 탑재 L-밴드 펄스 도플러 레이더 설계 및 제작

## L-band Pulsed Doppler Radar Development for Main Battle Tank

박 규 철 · 하 중 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 레이더의 설계, 제작 및 시험 결과를 제시한다. 레이더 시스템은 안테나부, 송수신부, 신호처리부의 3개의 LRU로 구성되며, 개발 기술은 패치 안테나, SSPA 송신기, coherent I/Q detector, DSP 기반 도플러 FFT 필터, 적응 CFAR, TWS 추적기 및 위협 판단을 포함한다. 개발된 레이더 시스템의 설계 성능은 고정 및 기동 시험을 통하여 확인하였다.

### Abstract

A Missile Warning Radar is an essential sensor for active protection system to detect antitank missile in all weather environments. This paper presents the design, development, and test results of L-band pulsed Doppler radar system for main battle tank. This radar system consists of 3 LRUs, which include antenna unit, transmitter and receiver unit and radar signal & data processing unit. The developed core technologies include the patch antenna, SSPA transmitter, coherent I/Q detector, DSP based Doppler FFT filter, adaptive CFAR, S/W tracking capability, and threat decision. The design performance of the developed radar system is verified through various ground fixed and moving vehicle test.

Key words : Missile Warning Radar, Threat Decision, SSPA, Doppler FFT, Radar Test, Radar System Design

### I. 서 론

최근 대전차 미사일, 로켓, 포 등 대전차 무기의 발전으로 관통력이 크게 증가되고 있다. 특히 대전차 미사일은 발진 속도가 빨라서 관통력이 크게 증대됨은 물론 유도 방식의 경우, 종전의 가시선상 유도 방식에서 독자적인 탐색기(seeker) 장착으로 사격 후 망각 방식으로 발전하는 추세이다. 탐색기의 형태는 신호를 송신하여 그 반사 신호를 수신하는 능동형에서 표적의 신호를 수신하는 수동형으로 바뀌는 등 은밀성과 명중률이 크게 향상되고 있으며, 사거리도 증대되고 있다.

대전차 위협 수단으로부터 생존을 보장하기 위해서는 미사일의 접근을 조기에 탐지해야 하고, 또한

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, IR, mmw 차장 연막)을 미사일의 공격 방향으로 분산 발사하여 미사일의 관측/조준 및 자체 유도 기능을 불가능하게 하면서 전차는 급속으로 회피 기동을 하여 전차의 생존성을 보장하는 방법이 유도 교란형 능동 방호 장치이다<sup>[1],[2]</sup>.

여기서 미사일의 눈이라 할 수 있는 탐색기는 종류가 다양하기 때문에 밀리미터파 수신기로는 밀리미터파 탐색기를 장착한 미사일의 탐지만 가능하다. 따라서 탐색기에서 능동적으로 발생하는 빔을 탐색하는 체계는 대전차 미사일 탐색기의 종류만큼 많은

국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· 논문 번호 : 20090515-049

· 수정완료일자 : 2009년 6월 11일

수신 장치를 설치해야 하며 이러한 경우도 토우 (TOW)와 같은 유선 유도 수동형 미사일은 탐지할 수 없다. 따라서 전차에 탑재 가능한 레이더를 제작하여 능동형 탐지 센서로 이러한 미사일들을 탐지해야 한다.

또한, 전차 탑재 레이더는 지상 고정 레이더와 달리 레이더 플랫폼의 이동과 표적에 대한 스캔 빔 각도 때문에 지면 클러터의 퍼짐 현상이 발생하게 된다<sup>[3]-[6]</sup>. 전차 탑재 레이더의 지면 클러터 모델은 안테나 빔이 지면 클러터와 이루는 grazing 각도가 적고, 안테나 높이가 낮으며 펄스의 폭이 제한되어 있다. 또한 안테나 빔 폭에 영사된 영역보다 거리 셀의 크기가 작다고 가정하면, 지면 클러터는 아래와 같은 식 (1)을 만족한다<sup>[7]</sup>.

$$\sigma_c = A_c \times \sigma^0$$

$$A_c = \frac{R_c \theta_{az}}{L_p} \frac{\tau c}{2} \sec \varphi$$

$$\sigma^0 = \gamma \sin \varphi \tag{1}$$

여기서  $\sigma_c$ 는 지면 클러터의 크기,  $R_c$ 는 클러터까지의 거리[m],  $\theta_{az}$ 는 안테나의 방위각 빔 폭,  $L_p$ 는 빔 shape 손실[dB],  $\tau$ 는 펄스 폭[sec],  $\varphi$ 는 grazing angle,  $c$ 는 광속[m/s]이다.

그림 1에 지상 클러터 모델을 나타내었다.

본 논문에서는 L-밴드의 코히어런트 방식의 전차 탑재 펄스 도플러 레이더의 설계, 제작 및 시험 결과를 제시하고, 지상 고정 시험, 차량 이동 시험 등의 다양한 시험 시나리오를 수행하여 위협 분석 결과를 제시하였다.

## II. 레이더 시스템 설계

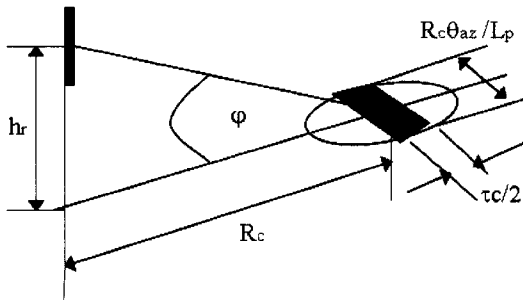


그림 1. 지상 클러터 모델  
Fig. 1. The ground clutter geometry.

전차 탑재 레이더 시스템의 설계는 헬기에 탑재한 미사일 탐지 레이더의 표적 획득 정보를 이용하여 설계 사양을 도출하였다. 본 레이더 시스템은 코히어런트 방식의 펄스 도플러 기법을 적용하여 대전차 미사일을 탐지/추적하고 위협 판단하는 기능을 가지고 있으며, 최대 탐지 거리는 X km까지 가능하도록 설계하였다.

레이더 주파수는 L-밴드를 사용하며, 단위 펄스 신호 대역폭은 5 MHz 간격으로 13개의 채널이 가능하도록 구현하였다. 안테나는 패치 안테나를 적용하고 탐색 범위는 방위각 방향으로 90도, 고각 방향으로 60도가 가능하도록 설계하였다. 또한, 방위각 방향으로 180도를 커버하기 위하여 안테나부 2개를 좌우로 배치 설계하였다. 송신기는 100 W급 SSPA(Solid State Power Amplifier)를 사용하고, 수신기는 슈퍼헤테로다인 방식을 사용하였다. 정밀한 위상의 연속성을 갖는 주파수를 제공하기 위해 주파수 합성기는 디지털 제어 방식을 사용하였다. 레이더 신호처리는 도플러 필터 बैं크, CFAR(Constant False Alarm Rate) 탐지기, TWS 추적 기능과 위협 판단 기능을 가지고 있으며, 6,144개의 펄스를 누적하여 2,048개씩 3개로 나누고 윈도우 특성에서 사용 빈도가 낮은 3개 사이에 있는 2개를 추가하여 5개에 대해 FFT를 수행하여 표적을 탐지한다. 전차 탑재 레이더 시스템의 주요 설계 사양은 다음 표 1과 같다.

전차 탑재 레이더 시스템은 소형, 경량, 저전력,

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

항 목	사 양
동작 주파수	L-밴드
탐지 거리	X km
대상 표적	대전차 미사일
PRF	39 kHz
펄스 폭	2 $\mu$ s
탐지 확률	89 % for SW1, RCS 0.05 m <sup>2</sup>
거리 분해능	240 m
안테나 이득	8.3 dBi
빔 폭	90°(수평)/60°(수직)
스캔 범위	180°(수평)/60°(수직)
스캔 속도	150 rpm

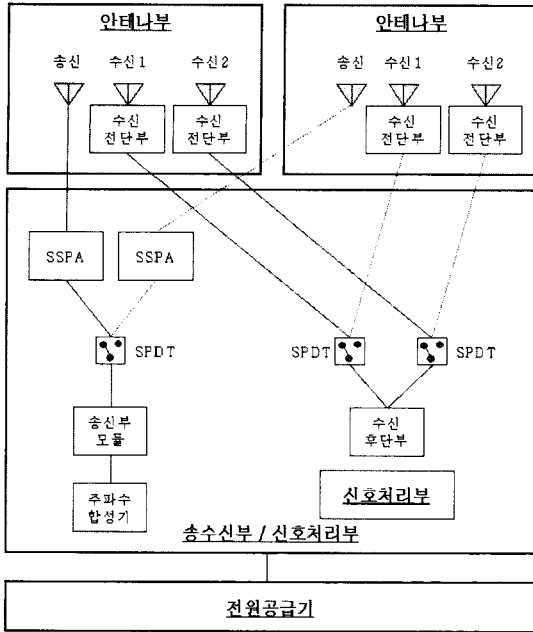


그림 2. 시스템 블럭도  
Fig. 2. System block diagram.

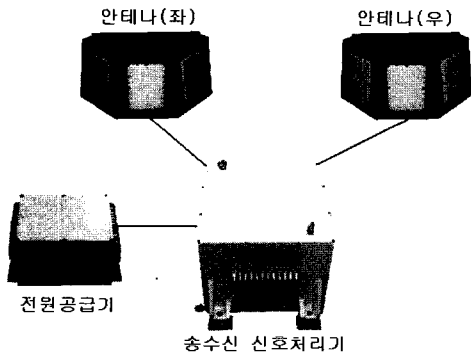


그림 3. 시스템 제작 구성도  
Fig. 3. System structure.

저비용 개념으로 설계하였으며, 탑재 공간 활용의 용이성과 고장 수리가 용이하도록 4개의 LRU(Line Replacement Unit)로 구성되었다. 안테나부 2개, 송수신 신호 처리기, 전원 공급기로 구성되고, 구성된 각각의 장치에는 부 체계별 조립체와 모듈로 구성된다. 전차 탑재 레이더 시스템의 개략 구성도는 그림 2와 같고, 제작된 구성도는 그림 3과 같다<sup>[8]</sup>.

### III. 레이더 부체계 구성품 제작

#### 3-1 안테나 설계 및 제작

표 2. 안테나 설계 사양

Table 2. Antenna design parameter.

안테나 형태	Cavity-Backed 마이크로스트립 안테나
공진 주파수	L-밴드
대역폭(VSWR<2.0)	60 MHz 이상
3 dB 빔폭(°)	Az.: 90±5, El: 60±5
이득	8.3 dBi 이상

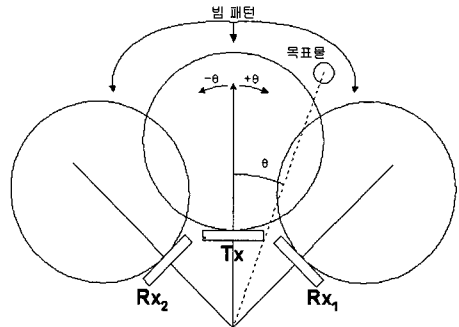


그림 4. 송수신 안테나 모듈  
Fig. 4. TR antenna module.

안테나부는 안테나 조립체와 수신 전단기로 구성되어 있다. 수신 전단기와 수신 후단기 사이의 케이블 길이는 3 m 정도로 케이블 손실에 의해 잡음지수가 상당히 증가할 수 있기 때문에 수신기의 잡음 지수를 최대한 줄이기 위해 수신 전단기를 안테나부에 위치시켰다. 안테나의 설계 사양은 표 2와 같다.

안테나부의 제작 구성은 그림 4와 같이 송신 모듈 1개와 수신 모듈 2개로 구성되고, 송신 모듈을 중심으로 좌우 45도, 수신 안테나 사이는 90도 차이가 나도록 배열하였다. 안테나 제작 패턴 측정 결과는 그림 5, 6과 같이 고각 빔은 60도, 방위각 빔은 86도의 빔 폭을 확인할 수 있으며, 부엽 레벨은 수평 -11 dBc, 수직 -8 dBc로 측정되었다. 그림 7에 제작된 안테나 패치와 패치를 보호하기 위하여 레이더를 씌운 안테나를 나타내었다.

#### 3-2 송수신기 설계 및 제작

송수신부는 상향 변환하여 생성한 L-밴드 대역의 레이더 송신 신호를 고출력 증폭하여 안테나를 통해 송신하고, 수신된 신호는 하향 변환 및 복조의 이단수퍼 헤테로다인 방식을 적용한 후 신호처리기로 전

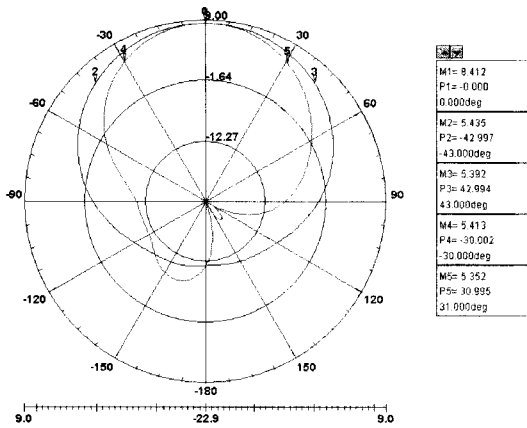


그림 5. 공진 주파수에서의 빔 패턴 결과  
Fig. 5. Beam pattern in resonance frequency.

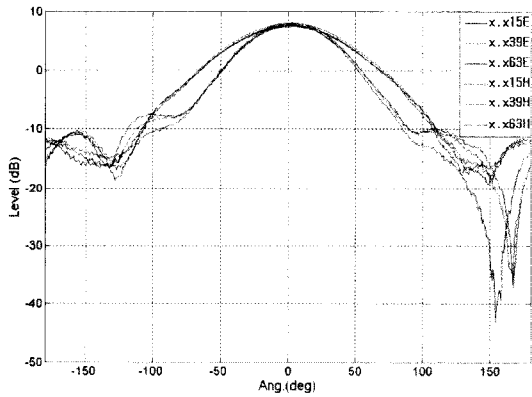


그림 6. 안테나 패턴 측정 결과  
Fig. 6. Measured antenna pattern.

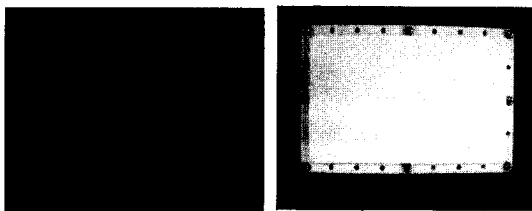


그림 7. 제작된 안테나 패치와 레이돔의 외형  
Fig. 7. Antenna patch and radome.

송한다. 송수신부는 송신기, 발진기, 수신 전단기, 수신 후단기, 고출력 증폭부의 세부 모듈별로 구성되며, 제작된 모듈들은 그림 8과 같고, 송수신기 조립체의 설계 제작 사양은 표 3과 같다.

LNA에서 저잡음 증폭된 수신 신호를 입력으로 IF 신호로 하향 변환하여 ADC에서 디지털 신호로 변

표 3. 송수신기 설계 사양  
Table 3. MWR system design parameter.

구분	사양
송신기 형태	수퍼 헤테로다인
송신 출력	50 dBm(duty 20 %)
주파수 대역	L-밴드
송신기 형태	SSPA
송신 펄스폭	2 $\mu$ s
송신기 대역	60 MHz
송신 주기	25.6 $\mu$ s
채널 수	13개, 5 MHz step
수신기 형태	2중 변환 수퍼 헤테로다인
수신 잡음 대역폭	0.25 MHz
수신 잡음 지수	4.5 dB 이하
수신기 이득	45 dB
수신 동적 범위	60 dB
STC 범위	30 dB
전원	DC 5 V, 15 V

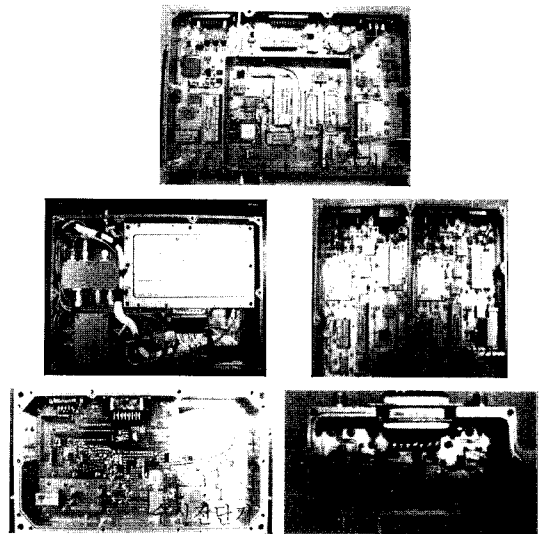


그림 8. 제작된 송수신부 모듈  
Fig. 8. Transmitter & receiver module.

환된다. 이 변환된 신호를 DDC(Digital Down Conversion)에서 I/Q 신호로 복조한다. 고출력부의 SSPA는 L-밴드의 송신 신호를 높은 이득과 출력으로 증폭하여 안테나로 전송한다. 안테나로 수신된 신호는 수신 전단기의 리미터를 통과 후 저잡음 증폭기를 통해 증폭되어 수신 후단기로 전송된다.

주파수 합성기 모듈은 기준 주파수로 OCXO(Oven-Controlled Crystal Oscillator)에서 발생하는 주파수를 이용하여 채배 및 분주하여 사용한다. 레이더 시스템을 동기시키는 주파수는 10 MHz 기준 클럭을 이용하여 채배한 40 MHz, COHO는 5 MHz, 1차 LO는 100 MHz, 2차 LO는 L-밴드를 사용한다. 위상 잡음 성능은 매우 우수하며, 100 Hz에서 -110 dBc/Hz이며, 1 kHz에서 -130 dBc/Hz이고, 10 kHz에서 -140 dBc/Hz이다. L-밴드에서는 100 Hz에서 -100 dBc/Hz이며, 1 kHz에서 -120 dBc/Hz이고, 10 kHz에서 -130 dBc/Hz이며, 주파수 안정도는 1 ppm이다.

3-3 신호처리기 설계 및 제작

레이더 신호 처리부는 아날로그 수신 신호를 디지털 신호로 변환하여 알고리즘들을 통해 표적을 탐지, 추적하며 위협을 판단하는 기능을 수행하고, 레이더 신호처리 구성은 그림 9와 같다. 레이더 시스템 사양 및 목표 성능 요구 조건에 부합되는 신호처리부의 설계 사양은 표 4와 같다<sup>9)</sup>.

레이더 신호처리기는 수신기에서 5 MHz의 IF 신호를 20 MHz의 샘플링 속도로 디지털 신호로 변환한다. 이 신호를 DDC에서 기저 대역 신호로 하향 변환하고 4:1 decimation하여 레이더 신호 처리 알고리즘들을 통해 표적을 탐지, 추적하고 위협 판단 기능을 수행한다.

레이더 신호처리부는 그림 10과 같이 DSPM(Digital Signal Processing Module), ADCM(Analog to Digital Converter Module), TCM(Timing Control Module)

표 4. 신호처리 설계 사양  
Table 4. Signal process design parameter.

구분	사양
PRF	39 kHz
펄스 폭	2 $\mu$ s
탐지 거리	X km
거리 분해능	240 m
거리 셀	9
Dwell 시간	157 ms
도플러 बैं크	1,024
오경보율	7.96E-8
표적 추적	5개(TWS)

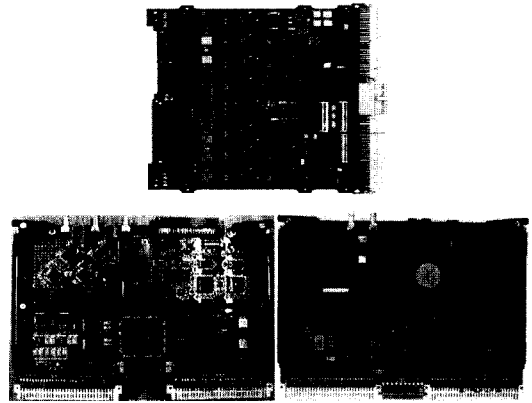


그림 10. 제작된 신호처리부 모듈  
Fig. 10. Signal processing module.

으로 구성되어 있다. DSPM은 DFB(Doppler Filter Bank), CFAR 알고리즘, 3/5 탐지 알고리즘, TWS 추적, 위협 판단을 처리하는 핵심 모듈이다. DSP 칩 ADSP-21060 SHARCs이 탑재된 VME64 버스의 DSP 보드를 선정했으며, 신호처리 알고리즘들을 담당하고, 신호처리 알고리즘에 대한 코어의 분배는 그림 11에 보였다.

ADCM은 아날로그-디지털 신호 변환기로 샘플링 및 변환된 신호를 VME 버스를 통해 DSP 보드로 데이터를 전송한다. TCM은 신호처리부의 각종 타이밍과 인터페이스를 제어한다.

3-4 레이더 신호 발생 및 자료 수집 분석 장치

레이더 시스템의 기능/성능 확인과 다양한 시험에 대한 시험 데이터 분석을 위하여 레이더 모의신호

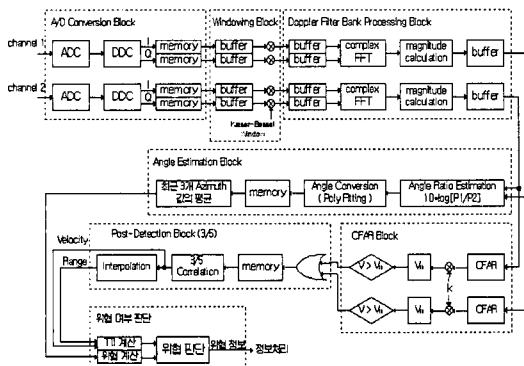


그림 9. 레이더 신호처리 구성  
Fig. 9. Radar signal process block diagram.

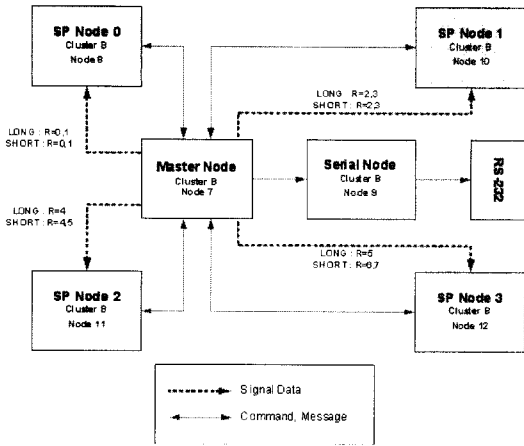


그림 11. 신호처리 코어 분배  
Fig. 11. Signal process task assignment.

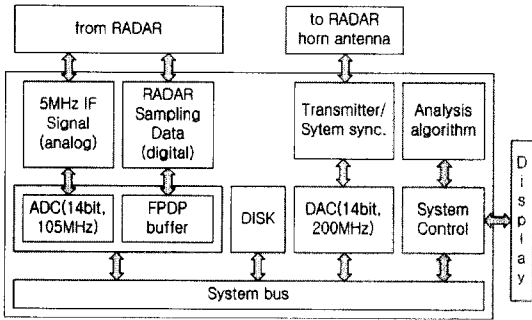


그림 12. 레이더 신호 수집 및 분석 장치 구성도  
Fig. 12. Radar data acquisition system(RDAQ).

발생, 실시간 레이더 신호 수집 저장 및 분석 장치 (RDAQ)를 개발하였다. RDAQ의 구성도는 그림 12와 같다.

실시간 모의 신호를 발생하는 장치는 다양한 표적과 클러터 신호에 대해 거리, 속도를 프로그램으로 가변 생성할 수 있도록 설계하였다. 디지털 신호로 발생한 파형은 실시간 DAC를 이용하여 중간 주파수 신호로 변환한다. 개발 프로그램은 시뮬레이션 환경이 좋은 lab view 소프트웨어를 사용하였다. 모의 신호 발생 장치를 이용하여 레이더 신호 처리 알고리즘들을 단계별로 검증하고, 이 알고리즘들을 실제 DSP 프로세서에 적용하였다.

레이더 신호 수집 및 분석 장치는 고속의 아날로그 레이더 신호를 RDAQ에서 실시간으로 샘플링하여 저장하는 방식과 레이더에서 샘플링한 디지털 데이터를 대용량 디지털 저장 장치에 실시간으로 저장

하는 방식으로 개발하였다. 신호 발생 및 분석 장치의 구성은 ADC 모듈, DAC 모듈, Disk 모듈, 시스템 제어 모듈로 구성되어 있다.

#### IV. 레이더 시험 및 성능 분석

##### 4-1 클러터 추정 및 억제

전차 탑재 레이더에서 클러터 스펙트럼의 추정은 표적 신호의 레벨이  $-135 \text{ dBm}$  근처까지 내려가기 때문에 표적 탐지를 위하여 매우 중요하다. 그림 13에 거리별 클러터를 포함한 표적 신호와 노이즈 전력 레벨의 추정 결과를 나타내었고, 이 클러터 레벨을 억제하기 위하여 그림 14에 보인 것과 같이 STC 레벨을 결정하였다. 그림 15에 STC를 적용한 후, 거리별 클러터, 노이즈, 표적 신호의 추정 결과를 나타내었다.

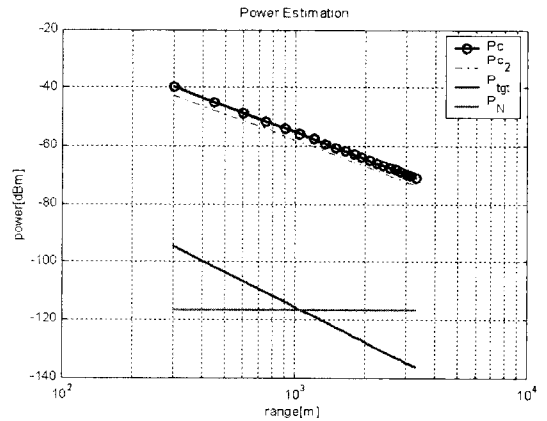


그림 13. 거리별 수신 전력 레벨  
Fig. 13. Receive level, before STC.

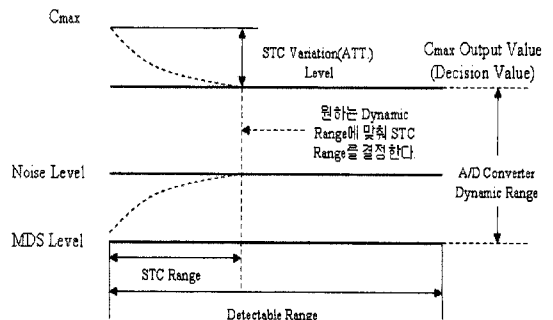


그림 14. STC 레벨 결정  
Fig. 14. STC level determination.

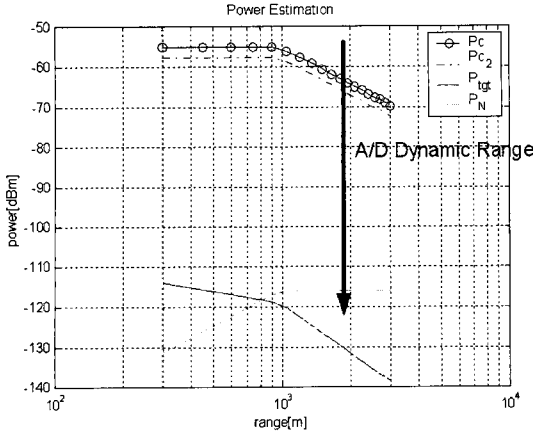


그림 15. STC 적용 후 거리별 수신 전력  
Fig. 15. Receive level, after STC.

4-2 레이더 시험 및 성능 분석

레이더 제작 후 기본 동작 시험을 거친 후 3단계로 나누어 성능 시험을 수행하였다. 그림 16에 K2 전차에 장착된 모습을 보였고, 레이더 단독 시험, APS 연동 시험, 이동 시험 등을 단계적으로 수행하였다. 시험에서 수집된 레이더 신호는 시험장 및 실험실에서 분석하여 레이더의 성능을 확인하였다.

시험 표적은 두 가지로 대전차 미사일인 토우의 RCS 크기로 제작된 155 mm 시험탄과 대전차 미사일인 메티스 엠이다. 그림 17은 RDAQ와 레이더를 연결한 시험 구성도이며, 그림 18은 시험탄과 메티스 엠을 이용하여 사격 시험을 수행한 다락대 시험장의 시험 설정 모습이다.

이동 시험은 실제 전차를 향해 사격 시험을 할 수 없으므로 레일 위에 그림 19와 같은 시험 구조물에



그림 16. K2 전차에 장착된 모습  
Fig. 16. The radar for K2 tank.

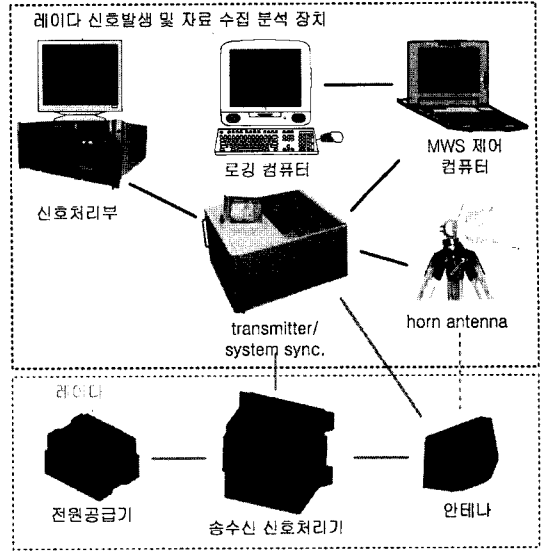


그림 17. 레이더와 RDAQ 연결 시험 구성도  
Fig. 17. Radar and RDAQ test structure.

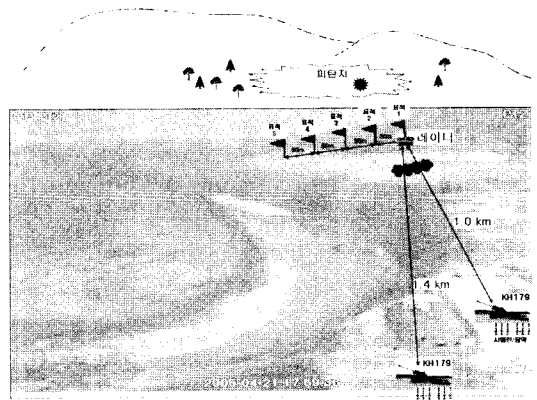


그림 18. 사격 시험 장소  
Fig. 18. Ground test site.

올려 레이더가 위협을 판단하여 회피 기동 명령이 발생하면 전차가 이 구조물을 끄는 방법으로 시험을 진행하였다.

그림 20은 표적 신호가 없는 상태에서 주변 클러터 및 노이즈 신호를 수신하여 신호처리한 결과를 보여준다.

그림 21은 1.4 km에서 발사한 155 mm 시험탄을 이용하여 탐지, 추적 및 위협 판단 등 신호처리 알고리즘들을 수행하여 얻은 결과를 나타내었고, 그림 22는 1.4 km에서 발사한 대전차 미사일 메티스 엠을 이용하여 탐지, 추적 및 위협 판단 등 신호처리 알고

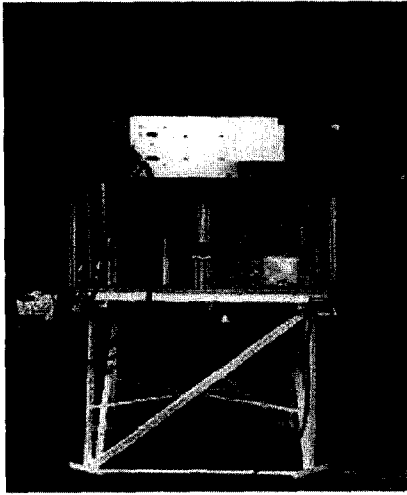


그림 19. 능동 방호 장치 시험 구조물  
Fig. 19. APS test structure.

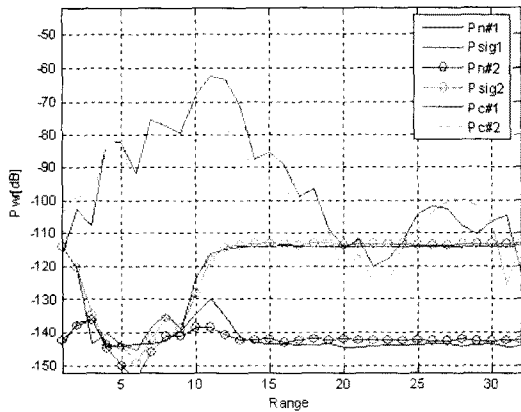


그림 20. 레이더 수신 신호, 표적 신호 없는 경우  
Fig. 20. Radar receive signal, no target.

리즘들을 수행하여 얻은 결과를 나타내었다. 전차 탑재 레이더에서 매우 중요한 위협 판단 결과 두 탄에 대하여 모두 위협으로 판정하였다.

### V. 결 론

본 논문에서는 전차 탑재 L-밴드의 펄스 도플러 레이더 시스템을 설계, 제작하고 다양한 기능 시험과 능동 방호 장치 통합 시험을 통하여 탐지, 추적 및 위협 판단 성능을 확인하였다. 레이더 시스템 설계 및 주요 구성품으로 안테나, 송수신기, 신호처리기 등을 설계 제작하여 지상 무기 탑재 레이더의 개발 가능

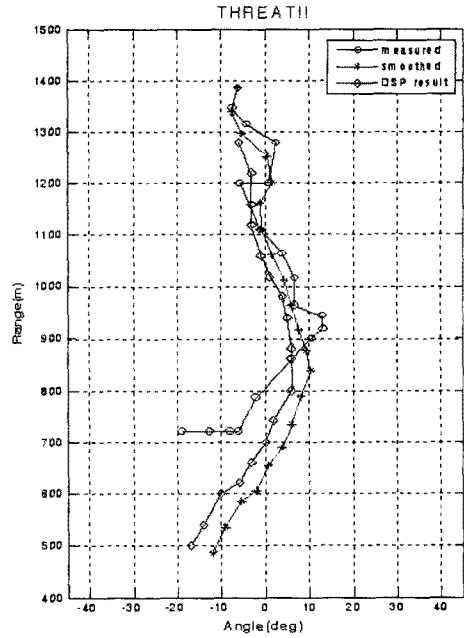


그림 21. 155 mm 시험탄 탐지 결과 비교  
Fig. 21. Comparison of 155 mm test ammunition detection with RDAQ.

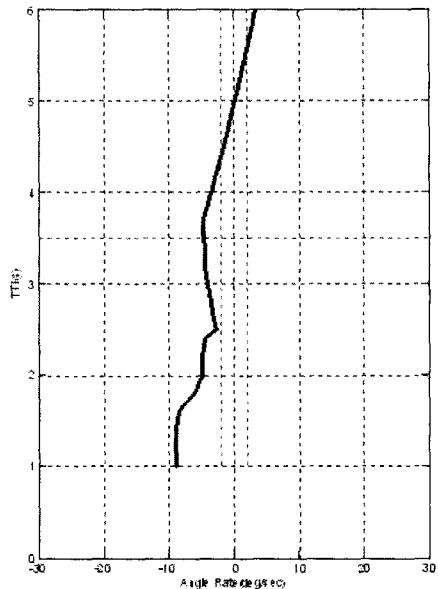


그림 22. 메티스 엠 탐지 결과  
Fig. 22. Metis-M detection.

성을 확인하였다. 향후 다양한 지상 무기 등에 탑재하여 탐지, 추적 및 위협 판단 등의 레이더 기반 기술에 활용될 것으로 예상된다.



참 고 문 헌

- [1] 이종민, 박규철 외, "차기세대전차 능동방호장치", 제 10회 지상무기 발전 세미나, 국방과학연구소, 2002년 11월.
- [2] 박규철, 이종민, 고속/소형 표적 탐지 센서 개발 II(시험개발), 국방과학연구소 연구보고서, GS-DC-417-030522, 2003년 6월.
- [3] Guy Morris, Linda Harkness, *Airborne Pulsed Doppler Radar*, Artech House, 1996.
- [4] D. Curtis Schleher, *MTI and Pulsed Doppler Radar*, Artech House, 1991.
- [5] Galati, *Advanced Radar Techniques and Systems*, IEE Press, London, UK, 1993.
- [6] 박영길, 최민수 외, "헬기 탑재 X-밴드 펄스 도플러 레이더 시험 개발", 한국전자과학회지, 17(8), pp. 773 -787, 2006년 8월.
- [7] 박규철, 하중수, "방호용 레이더 기본시제 송수신기 설계", 국방과학연구소 연구보고서, GSDC-517-060621, 2006년 6월.
- [8] 박규철, 하중수, 이정수, "흑표 방호용 레이더의 하드웨어 설계", 국방과학연구소 연구보고서, AD-DR-417-071161, 2007년 11월.
- [9] 박규철, 이종민, "고속/소형 표적 탐지 센서의 소프트웨어 구조 및 설계", 국방과학연구소 연구보고서, GSDC-417-030524, 2003년 6월.
- [10] 박규철, 이종민, "고속/소형 표적 탐지 센서의 신호처리기 설계", 국방과학연구소 연구보고서, GSDC-417-030251, 2003년 3월.

박 규 철



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

하 중 수



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