

지상 접근 표적 감지를 위한 초소형 K-대역 레이더 연구

Study on the Compact K-Band Radar for Detecting the Approaching Target above Ground

하종수 · 노진입 · 최재현 · 이한진 · 박영식

Jong-Soo Ha · Jin-Eep Roh · Jae-Hyun Choi · Han-Jin Lee · Young-Sik Park

요 약

본 논문에서는 능동방호 시스템의 소형 근접신관에 적용되는 초소형 K-밴드 레이더를 제안한다. 지상 환경에서는 클러터가 산재되어 있기 때문에 접근하는 소형 표적을 감지하기는 쉽지 않다. 또한 이러한 환경에서 레이더의 표적 정확도를 향상시키면서 동시에 소형 근접신관용으로 레이더를 소형화하기에는 어려움이 따른다. 이러한 어려움을 해결하기 위해 본 연구에서는 초소형 K-밴드 레이더의 시스템 분석 및 설계, 안테나 설계, 송수신 및 신호처리기 설계를 제시한다. 이후 일부 시험 결과를 제시하고 그 결과를 분석함으로써 제안하는 연구의 타당성을 검증한다.

Abstract

This paper proposes a compact K-band radar applied to a miniature proximity fuze for the active defense system. In this terrestrial environment, it is not easy to detect approaching small targets because the clutter is scattered. In addition, it is difficult to miniaturize the radar for the small proximity fuze while improving the target accuracy of the radar in such environments. To solve these difficulties, this study presents system analysis and design, antenna design, and transceiver and signal processor design of the compact K-band radar. Some test results are presented and the results are analyzed, the validity of the proposed study is examined.

Key words: FMCW Radar, Proximity Fuze, Countermeasure, Hard-Kill, Ground Target

I. 서 론

지상 차량의 방호성능 향상이라는 군사적 목적 달성을 위해 세계 각국에서는 TROPHY, ADS, ARENA와 같은 전자식 능동방호 시스템을 연구 개발하고 있다. 능동과외체계는 대전차 미사일/로켓을 방어하기 위해 접근하는 위협체를 탐지하여 무력화시키는 능동방호 시스템으로^[1] 레이더^{[2],[3]}, 열상추적기, 사격통제컴퓨터, 구동/발사장치, 그리고 대응탄으로 구성되어 있다. 이 중 대응탄은 전면으

로 파편을 분사하여 위협체를 무력화시키는 수단으로 시한신관을 적용하고 있다.

대응탄의 정확도 향상을 위해 표적 감지 방식의 근접신관이 검토됨에 따라 신관의 표적 감지 센서로서 초소형 레이더에 대한 연구를 수행하고 있다. 기존의 알려진 대공무기용 근접신관은 주로 탄 측면에 센서를 배치하여 표적을 감지하였으나^[4], 지면에 근접해서 운용되는 근접신관은 지면클러터의 유입을 억제하기 위해 탄 측면보다는 전면에 센서를 배치하여 표적을 감지할 필요가 있다.

국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received January 24, 2017 ; Revised March 13, 2017 ; Accepted April 11, 2017. (ID No. 20170124-006)

· Corresponding Author: Jae-Hyun Choi (e-mail: tang@add.re.kr)

그런데 RF(Radio Frequency) 센서를 탄 전면에 배치하면서 안테나 빔폭을 넓게 설계한다면 지면클러터의 유입을 효과적으로 억제하기가 어렵다. 반면에, 탄 전면에 배치한 안테나 빔폭을 좁힌다면 - 안테나 직경이 작아 일정 수준 이하로 빔폭을 좁히기 어려울 뿐만 아니라 - 표적이 근접 거리에서 안테나의 반전력 빔폭을 벗어날 경우에는 표적 감지가 쉽지 않다.

이를 해결하기 위해 본 논문에서는 근접신관의 표적 감지 센서로서 초소형 K-대역 레이더 연구를 제안한다. 이를 위해 능동파괴체계의 교전 범위를 분석하고, 안테나 직경을 고려하여 송·수신 안테나를 최적 설계하고, 기존 근접신관의 표적 감지 방식이 아닌 탐지 레이더의 표적 탐지 및 추적 방식을 기반으로 송·수신 및 신호처리기를 제안하고, 거리 모사 시험 및 표적 감지 시험 결과로부터 제안하는 레이더 연구의 타당성을 검증한다.

II. 근접신관용 K-대역 레이더 연구

2.1 제안하는 연구의 필요성

전자식 능동방호 시스템인 능동파괴체계의 교전개념은 그림 1과 같다^[1]. 능동파괴체계는 레이더 및 열상추적기로 위협체를 탐지·추적한 후 교전지점을 예측하고, 그 위치로 대응탄을 발사하여 예측지점에서 탄두를 폭발시킴으로써 위협체를 무력화시킨다.

이때 시한신관은 예측지점까지의 비행시간을 입력받아 설정시간에 도달했을 때 탄두를 폭발시키는데, 이 때 센서의 측정오차, 통제컴퓨터의 연산오차, 대응탄의 비행오차, 그리고 신관의 시한오차 등이 더해져서 시스템의 정확도에 영향을 주게 된다. 따라서 신관에 표적 감지 센서를 적용하면 시스템 정확도를 향상시킬 수 있다.

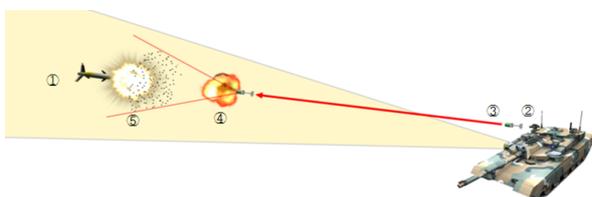


그림 1. 능동파괴체계 교전 개념
Fig. 1. The engagement concept of hard-kill system.

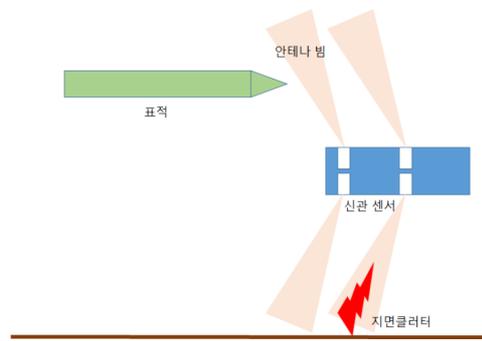


그림 2. 기존 신관 센서의 측면감지 방식
Fig. 2. The side sensing method of the conventional fuze sensor.

2.2 운용조건 분석 및 연구방향 수립

기존 무기체계에 탑재된 근접신관은 탄두의 크기와 표적의 종류 등에 따라 그 탐지범위가 설정되며, 표적을 감지하면 탄두를 기폭시키는 방식으로 설계되어왔다. 일례로 중거리 지대공 유도무기에 탑재된 근접신관 센서는 미사일 탄체의 측면에 배치되어 표적이 감지되면 탄두를 기폭시킨다^[4].

그런데 공중에서 운용되는 대공 무기와 달리 지상에서 운용되는 근접신관은 MDS(Minimum Detectable Signal) 레벨 설계 시 수신안테나로 유입되는 지면클러터의 영향을 고려해야만 하는데, 그림 2와 같이 안테나가 탄체 측면에 배치될 경우, 지면클러터가 직접 반사되어 유입되므로, 표적 신호가 작을 때에는 이를 감지하기 어려운 단점이 있다.

다가능 레이더나^[5] 일정 규모 이상의 레이더 시스템에서는^{[6]-[8]} 좁은 안테나 빔으로 표적을 탐지·추적하는 등의 방법으로 정밀도가 높은 표적 정보를 획득할 수도 있지만, 직경이 작은 소형 근접신관에서는 그 센서를 초소형으로 설계해야 하기 때문에 좁은 안테나 빔을 스캔하여 조사하는 방식은 적용하기가 어렵다. 이를 감안하여 지상에서 접근하는 소형 표적을 감지하기 위해 본 논문에서는 그림 3과 같이 단일 안테나 빔을 사용하여 탄 전면을 감지하는 방식을 연구한다.

그리고 신호 세기가 큰 클러터의 영향을 감소시키기 위해 수신 신호로부터 속도 정보를 획득하여 표적 신호

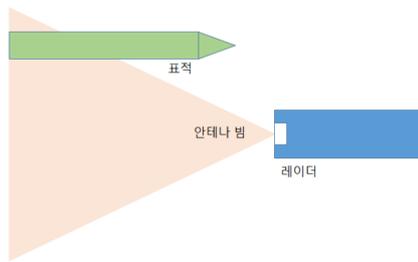


그림 3. 제안하는 레이더의 전면감지 방식
Fig. 3. The front sensing method of the proposed radar.

와 클러스터를 구분하고, 단발성 표적 감지가 아니라 표적을 탐지하고 추적함으로써, 클러스터에 강인하게 접근하는 표적을 감지할 수 있는 방식을 연구한다.

2-3 시스템 설계

그림 4에 제안하는 레이더의 구조를 나타내었다.

레이더 크기를 직경 100 mm 이내의 초소형으로 설계하기 위해 제안하는 레이더는 안테나 조립체, 송수신 및 신호처리기, 전원공급 모듈 3부분으로 구성되어 있다. 전원공급 모듈 하단에는 근접신관의 안전장전장치와 폭발계열이 장착된다.

제안하는 레이더는 안테나 크기의 제한으로 인해 모노펄스 방식 등⁹⁾을 통한 표적의 각도 정보 획득은 어렵지만, 클러스터에 강인하게 표적 정보를 획득하기 위해서 거리 및 속도 정보는 획득할 필요가 있다. 기존의 펄스 도플러

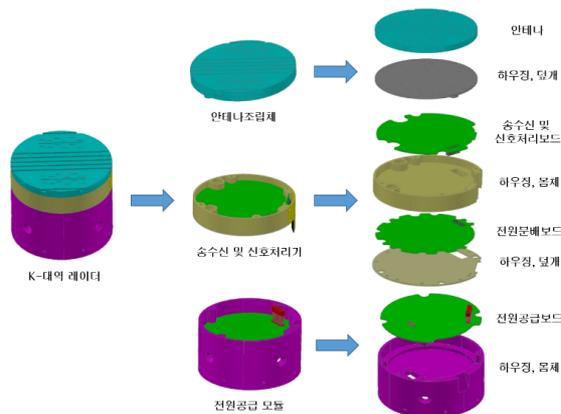


그림 4. 제안하는 K-대역 레이더 구조
Fig. 4. The structure of the proposed K-band radar.

러 레이더¹⁰⁾는 이러한 목적에 적합하지만, 거리 해상도가 펄스폭에 비례하여 커지므로 거리 해상도를 센티미터 수준(예: 30 cm)으로 설계하기 위해서는 펄스폭을 나노세컨드 수준(예: 2 ns)으로 설계해야만 하는 어려움이 있다.

그런데 펄스폭을 줄이면 송신에너지가 감소하게 되므로 FFT(Fast Fourier Transform)를 통해 신호처리 이득을 증가시킨다고 하더라도 정보 간 coherency나 최대탐지거리 설정 문제 등으로 펄스 도플러 레이더로 이를 충족시키기에는 한계가 있다.

따라서 본 논문에서는 FMCW(Frequency-Modulated Continuous-Wave)와 CW(Continuous-Wave)를 기반으로 K-대역 레이더를 설계한다. 연속파의 주파수 변조 구간에서는 표적의 거리 정보를 획득하며, 주파수를 변조하지 않은 구간에서는 표적의 속도 정보를 획득한다. 그림 5에 이러한 개념을 도시하였다. 그림으로부터 표적 속도는 식 (1)에 의해, 표적 거리는 식 (2)에 의해 구할 수 있다.

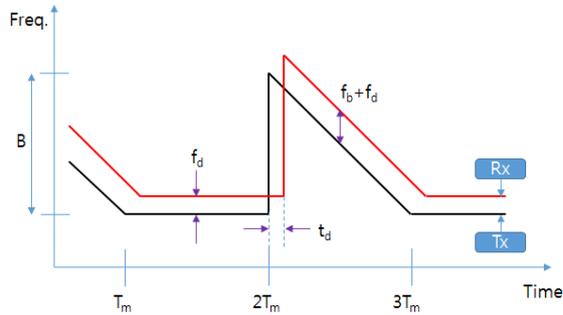
$$v_{tgt} = \frac{f_{cw}\lambda}{2}, f_{cw} = f_d \quad (1)$$

$$r_{tgt} = \frac{cT_m}{2B} \times (f_{fmcw} - f_{cw}), f_{fmcw} = f_b + f_d \quad (2)$$

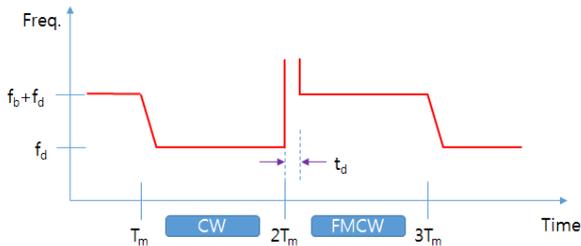
위 식에서 v_{tgt} (m/s)는 표적 속도, λ (m)는 파장, f_{cw} (Hz)는 CW 구간에서 획득한 비트주파수, f_d (Hz)는 도플러주파수를 나타내며, r_{tgt} (m)는 표적 거리, c (m/s)는 빛의 속도, T_m (sec)은 변조 시간, B (Hz)는 주파수 대역폭, f_{fmcw} (Hz)는 FMCW 구간에서 획득한 비트주파수, f_b (Hz)는 표적 거리에 의한 비트주파수를 나타낸다.

이와 같이 FMCW와 CW 변조 시간의 합에 해당하는 한 프레임 동안 표적의 거리 및 속도 정보를 획득하면, 레이더는 표적 후보군을 선별하고¹¹⁾ 그 다음 프레임 또는 n 번째 프레임에서 획득하는 표적 거리 및 속도 정보와의 correlation을 구해 표적 후보를 확정, 매 스캔마다 획득한 표적 탐지정보를 기반으로 표적을 추적함으로써 표적과 대응탄과의 조우시간을 예측하고, 매 프레임마다 측정되는 표적 정보와 예측값을 지속적으로 갱신함으로써 조우시간을 계산한다.

2-4 안테나 설계



(a) FMCW 송수신 파형
(a) FMCW waveform of the radar



(b) 비트주파수
(b) Beat frequency

그림 5. FMCW를 이용한 표적 정보 획득
Fig. 5. The acquisition of the target information using FMCW.

지면클러터가 산재되어 있는 상황에서 저고도로 고속 접근하는 표적을 정확하게 탐지·추적하기 위해서 안테나는 가능하면 고각 방향으로 낮은 부엽 준위를 가져야 한다. 그리고 근접한 표적을 감지하기 위해서 송신 안테나로부터 수신 안테나로의 누설전력은 가능한 억제시켜야 한다. 그런데 제안하는 레이더는 직경이 100 mm 이하이므로 이러한 요구조건을 만족시키기는 쉽지 않다.

이러한 어려움을 극복하고 요구조건을 만족시키기 위해 본 논문에서는 송신 안테나와 수신 안테나를 2x6 도파관 슬롯 배열 구조로 설계하였으며, 안테나 간 전력누설을 억제하기 위해 그림 6과 같이 송신 안테나와 수신 안테나를 분리 배치하고, 그 사이에 홈을 새겨 넣었다. 그 결과, 안테나는 2:1 이하의 VSWR(Voltage Standing Wave Ratio) 특성을 나타내었으며, 송·수신 간 isolation은 약 -60 dB 이하 수준으로 억제되었다.

실험 결과, 안테나의 방사패턴은 그림 7과 같이 측정되었다. 안테나 주빔의 이득은 약 15 dB 수준이며, 방위각



그림 6. 안테나 구조
Fig. 6. The structure of the antennas.

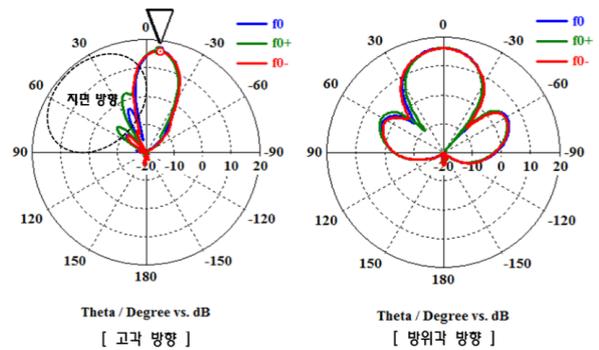


그림 7. 안테나 방사패턴 측정결과
Fig. 7. The characteristics of the antenna beam pattern.

빔은 약 40°의 반전력 빉폭을 가진다. 고각 빉은 약 20°의 반전력 빉폭을 가지는데, 지면클러터의 영향을 최소화하기 위해서는 빉을 상향 틸트시킬 필요가 있다. 높이 1 m의 안테나가 수평방향으로 약 -3°를 조사하면 20 m 거리의 지면을 조사하게 되므로, 본 논문에서는 이 범위의 지면클러터가 안테나의 반전력 빉폭 내에 포함되지 않도록 안테나를 고각 방향으로 약 7° 정도 상향 틸트하였다. 그림 7에서 안테나는 지면 방향으로 약 0 dB 이하의 부엽 특성을 나타내었다.

2-5 송수신 및 신호처리 설계

레이더를 초소형으로 설계하기 위해 본 논문에서는 송수신 파트와 신호처리 파트를 하나의 송수신 및 신호처리기로 설계하였다. 송수신 파형은 앞서 기술한 바와 같이 FMCW와 CW 파형을 사용하며, 탐지 대상인 대전차 위협체의 RCS(Radar Cross Section)를 약 0.01 m²~0.1 m²

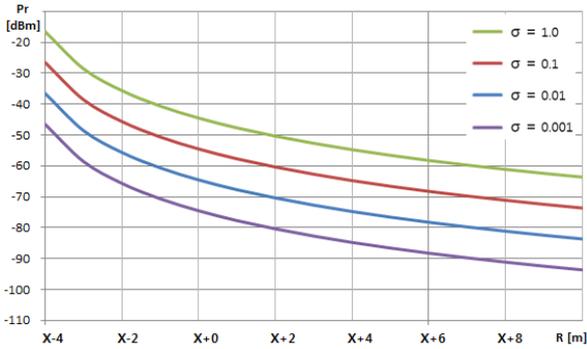


그림 8. 수신전력 분석 결과
Fig. 8. The analysis result of the received power.

의 값으로 설정하여 제안하는 레이더의 수신전력 P_r 을 식 (3)으로부터^[10] 예측하였다.

$$P_r = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4} \quad (3)$$

P_t (W)는 송신전력, G_t 는 송신 안테나 이득(dBi), G_r (dBi)는 수신 안테나 이득, λ (m)는 파장, σ (m²)는 표적 RCS, R (m)은 표적까지의 거리를 나타낸다. 그림 8에 0.001 m²~1 m² 범위의 표적 RCS에 대해 표적까지의 거리에 따른 수신전력 분석 결과를 도시하였다.

레이더의 잡음전력 P_n 은 식 (4)와 같고, SNR(Signal to Noise Ratio)는 식 (5)에 의해 구해지므로 본 논문에서는 오경보율을 고려하여 CFAR(Constant False Alarm Rate) 알고리즘을 적용하고^{[12],[13]} 잡음지수 F_n , 시스템 손실 L_s 을 분석하여 FFT 개수 N_{FFT} 를 1,024개로 설계하였다. 여기서 k 는 볼츠만 상수, T_0 는 절대온도를 나타낸다.

$$P_n = k T_0 B F_n \quad (4)$$

$$SNR = \frac{P_r}{P_n} \times \frac{N_{FFT}}{L_s} \quad (5)$$

제안하는 K-대역 레이더의 송수신 및 신호처리기의 간략화된 블록도를 그림 9에 도시하였다. 송신 파트는 DSP (Digital Signal Processor), PLL(Phase Locked Loop), VCO (Voltage Controlled Oscillator)를 연동시켜 송신 FMCW/ CW 파형을 RF 대역으로 고출력 증폭하여 안테나를 통해

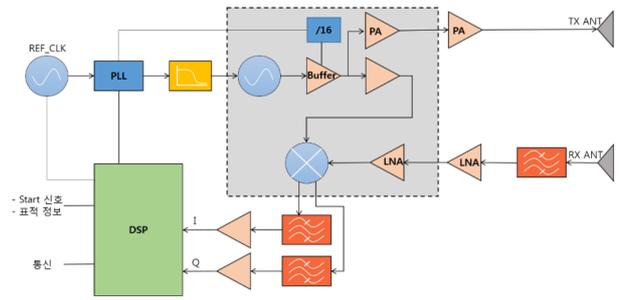


그림 9. 송수신 및 신호처리기 블록도
Fig. 9. The block diagram of the transceiver & signal processor.

송신하는 기능을 수행한다.

수신 파트는 송신 파트로부터 분기된 국부 발진 신호와 표적으로부터 반사된 신호로부터 deramping 신호를 추출하고, 신호처리 파트로 중간 주파수 대역의 I(In-phase), Q(Quadrature-phase) 신호를 제공하는 기능을 수행한다.

신호처리 파트(DSP)는 deramping 신호를 FFT 처리하여 표적 거리 및 속도 정보를 획득하며, 이를 기반으로 표적을 탐지 및 추적하여, 조우 시 통신 라인을 통해 충격신관으로 기폭신호를 인가하는 기능을 수행한다. 이외에도 능동파괴체계로부터 start 신호 및 표적 정보를 인가받으며, 근접신관 내 충격신관과의 통신 기능을 수행한다. 그림 10에 신호처리 파트의 표적 정보 처리 방법을 제시하였다.

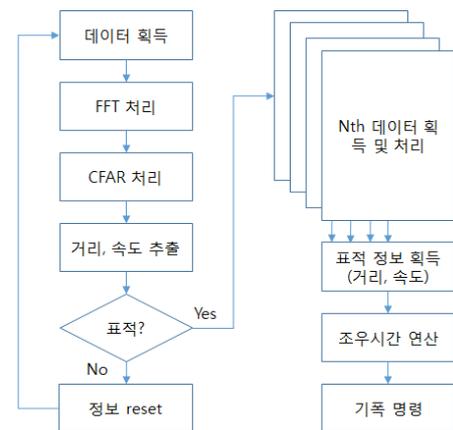


그림 10. 표적 정보 처리 방법
Fig. 10. The processing method of the target information.

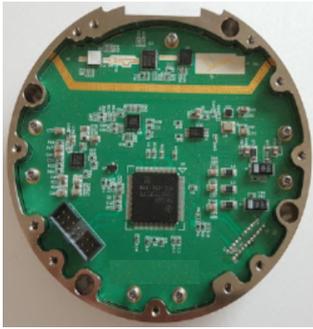


그림 11. 송수신 및 신호처리기 형상
Fig. 11. The transceiver & signal processor.

표적 정보 처리를 위해 수신 데이터는 FFT 처리되어 주파수 정보로 변환되며, CFAR 처리 후 f_{cw} 와 f_{fmcw} 신호로부터 f_b 와 f_d 를 추출함으로써 거리 및 속도 정보를 획득할 수 있다. 그런 다음 획득 정보의 표적 여부를 판별하고, 표적으로 판단되면 매 프레임마다 획득되는 정보로부터 표적을 추적하여 조우시간을 연산하고, 조우시간이 도래하면 기폭명령을 하달한다. 그림 11에 제작된 송수신 및 신호처리기를 나타내었다.

III. 시험 및 결과 분석

3-1 거리 모사 시험

설계된 레이더의 거리 측정 성능을 확인하기 위하여 그림 12와 같이 거리 모사 시험을 수행하였다. 통제 및 분석장치로 레이더를 제어하여 FMCW 신호를 송신하고, 케이블 길이만큼 전송 시간을 지연시킴으로써 거리를 모사하는 거리모사 지그를 거쳐 FMCW 신호가 수신되면 이를 FFT 처리하여 거리를 분석하였다.

그림 12에서 거리 모사 시험을 위해 거리모사 지그의 지연 거리(①)를 측정된 결과, 약 11.44 m로 측정되었는데, 이는 레이더의 왕복거리가 되므로 약 5.72 m가 되며, 연결커넥터의 지연 거리(②)는 약 0.09 m로 측정되어 왕복거리를 고려하면 그 절반인 0.045 m가 되고, 레이더가 측정된 지연 거리(③)는 약 5.931 m가 되었다.

이 때 대응탄 점검장비를 이용하여 레이더의 내부 지연 거리를 확인하였는데, 8 m 거리를 점검장비로 모사하였을 때 8.081 m로 점검장비의 내부 지연 거리는 0.081 m



그림 12. 거리 모사 시험
Fig. 12. The range modeling & measurement test.

로 확인되었고, 점검장비에서 레이더로 8 m 신호를 인가하였을 때 레이더에서는 8.202 m로 측정하였으므로 레이더의 내부 지연 거리(④)는 0.121 m로 확인되었다.

따라서 레이더가 측정된 지연 거리(③)에서 ②와 ④를 소거하면 그 거리는 5.765 m가 되므로 이 거리와 ①의 차이는 약 4.5 cm가 된다. 이는 레이더의 거리해상도 및 스펙트럼의 해상도를 고려할 때 허용오차 범위를 만족하는 것으로 판단되었다. 그림 13에 거리모사 지그로 모사한 거리와 레이더로 측정된 거리를 나타내었다.

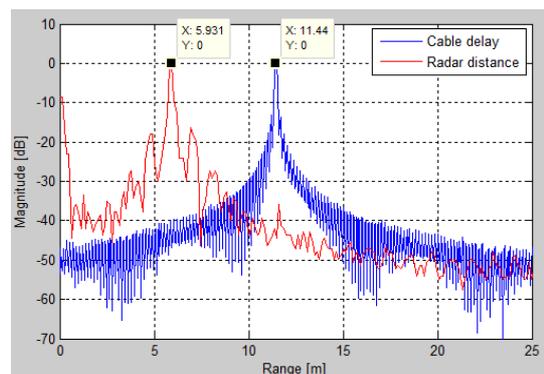


그림 13. 비트 주파수 스펙트럼(모사 스펙트럼, 측정 스펙트럼)
Fig. 13. The spectrum of the beat frequency(modeled spectrum, measured spectrum).

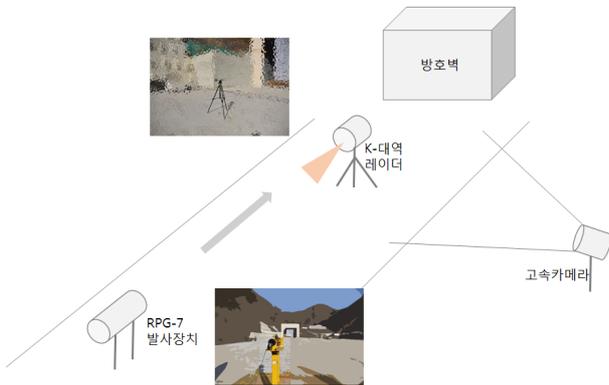


그림 14. 표적 감지 시험
Fig. 14. The target sensing test.

3-2 표적 감지 시험

설계된 K-대역 레이더의 지상 접근 표적 감지 성능을 확인하기 위해 그림 14와 같이 야외시험장을 구성하였다. 위협체로 RPG-7을 선정하였으며, 지면클러터 상황에서 접근하는 표적을 감지해야 하므로 지면으로부터 약 1.5 m에서 발사하여 약 3 m 높이에 탄착하는 것으로 설정하였다. 발사 거리는 제안하는 레이더의 최대 탐지거리 보다 먼 거리로 설정하였으며, 고속카메라를 이용하여 RPG-7이 레이더를 지나가는 순간을 촬영할 수 있도록 시험장을 구성하였다.

그림 15에 RPG-7이 레이더 상단을 지나가는 순간 장면을 나타내었다. 그림에서 레이더 높이는 약 1.9 m이므로 레이더와 RPG-7 간 이격거리는 1.1 m 수준이다.

그림 16에 수집 프레임의 수신 신호를 중첩하여 수신



그림 15. RPG-7과 레이더 간 조우 장면
Fig. 15. The encounter scene of RPG-7 and the radar.

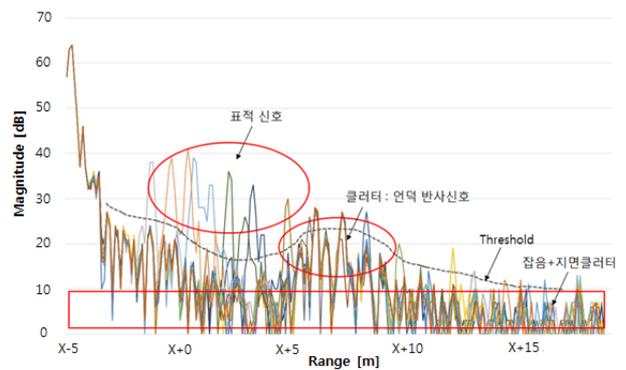


그림 16. 레이더의 표적 거리 데이터
Fig. 16. The target range data of the radar.

스펙트럼을 나타내었다. 그림에서 중첩된 스펙트럼들은 잡음과 지면클러터 성분이며, 원거리로부터 표적이 탐지되어 근거리에서 점점 표적신호가 커짐을 확인할 수 있다. 시험장 환경 상 레이더 우측에 언덕 지형이 있었는데, 스펙트럼 상의 X+5 m~X+10 m 지점에서 이 지형이 탐지되고 있음을 확인할 수 있다. 이 클러터 성분들은 표적 신호와 함께 CFAR 경계값을 넘는 유효 신호로 탐지되지만, 식 (1)의 속도 정보를 이용하여 그 움직임 여부를 판단함으로써 표적 신호로부터 분리하였다.

본 스펙트럼 상에서 획득되는 표적 주파수는 식 (2)의 $f_b + f_d$ 이며, 식 (1)에서 표적 속도 정보 f_d 를 구하여 소거함으로써 표적 거리 정보 f_b 를 구할 수 있다. 그림 15의 이격거리 1 m 수준의 표적은 X+0 m 이내에서 감지되었으며, X+10 m 이상에서도 유효하게 감지됨을 확인하였다. 표적 속도는 평균 250 m/s 수준으로 고속카메라로 특정 구간에서 측정된 속도와 비교할 때 속도 오차 범위 내에 있음을 확인하였다. 이러한 시험 결과로부터 제안하는 레이더가 지면 1~2 m 높이로부터 접근하는 RPG-7을 감지하고, 거리 및 속도 정보를 제공할 수 있음을 확인하였다.

IV. 결 론

본 논문에서는 능동파괴체계 대응탄 신관의 기폭정확도 향상을 위해, 지면클러터가 많이 유입되는 지상 환경에서 고속으로 접근하는 소형 위협체를 감지하기 위한

소형 근접신관의 센서로서 초소형 K-대역 레이다 연구를 제안하였다.

신관 운용조건, 지상이라는 특수한 제약사항, 대응탄 직경 제한으로 인한 초소형 설계, 높은 수준의 거리해상도 만족을 위해 기존의 근접신관 센서와 다른 방식의 레이다를 제안하였으며, 이를 구현하기 위한 시스템 설계 및 안테나, 송수신 및 신호처리기 설계를 제시하였다.

제작된 레이다로 거리 모사 시험을 수행하여 제안하는 레이다가 높은 수준의 거리 정확도를 만족함을 확인하였으며, 실제 RPG-7을 발사하고 제작된 레이다로 이를 감지하는 표적 감지 시험을 통해 지상 환경에서 지면에 밀착하여 접근하는 소형 표적을 제안하는 레이다가 감지할 수 있음을 확인하였다. 향후 이를 보완하여 그 성능을 향상시키기 위한 연구를 지속적으로 수행할 예정이다.

References

[1] 하중수, 이의혁, 이현아, 박규철, 조규공, "미사일/로켓 방어체계의 RPG-7에 대한 전차방호 성능분석", 한국군사과학기술학회지, 17(3), pp. 350-357, 2014년 6월.
 [2] 이종민, 조병래, 선선구, 이정수, 박상순, "지상 이동 차량용 K-대역 레이다 개발", 한국전자과학기술학회논문지, 22(3), pp. 362-370, 2011년 3월.
 [3] 선선구, 이정수, 조병래, 이종민, "고속 표적 추적을 위한 K-대역 레이다 송수신기 설계", 한국전자과학기술학회논문지, 21(11), pp. 1304-1310, 2010년 11월.
 [4] Jae-Hyun Choi, Myung-Suk Jung and Kyung-Whan Yeom, "A design and assessment of a direction finding pro-

ximity fuze sensor", *IEEE Sensor Journal*, vol. 13, no. 8, pp. 3079-3089, Aug. 2013.
 [5] Seung-Phil Lee, Byung-Lae Cho, Jong-Soo Ha, and Young-Soo Kim, "Target angle estimation of multifunction radar in search mode using digital beam forming technique", *Journal of Electromagnetic Waves and Applications*, vol. 29, no. 3, pp. 331-342, Mar. 2015.
 [6] 서원구, 김동욱, "2중 송수신 모듈을 이용한 2차원 근거리 FMCW 레이다", 한국전자과학기술학회논문지, 27(6), pp. 531-538, 2016년 6월.
 [7] 황지환, 김승희, 강기묵, 김덕진, "다중 대역폭을 갖는 FMCW 레이다 송수신기 설계 및 제작", 한국전자과학기술학회논문지, 27(4), pp. 377-387, 2016년 4월.
 [8] 김병준, 구종섭, 김덕수, 남상욱, "다목적활용을 위한 재구성이 가능한 다중대역 FMCW 레이다", 한국전자과학기술학회논문지, 26(12), pp. 1112-1115, 2015년 12월.
 [9] Samuel M. Sherman, *Monopulse Principles and Techniques*, Artech House, 1985.
 [10] M. I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, McGraw-Hill Book Company, 3rd edition 2001.
 [11] 최재현, 장종훈, 이재환, 노진입, "FMCW 전파고도계의 신호처리 알고리즘 구현", 한국전자과학기술학회논문지, 26(6), pp. 555-563, 2015년 6월.
 [12] H. Rohling, "Radar CFAR thresholding in clutter and multiple target situation", *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. AES-24, no. 4, pp. 608-621, Jul. 1983.
 [13] 신상진, "효율적인 CFAR 알고리즘 연구", 한국전자과학기술학회논문지, 25(8), pp. 849-856, 2014년 8월.

하 중 수



2001년 2월: 고려대학교 전자공학과 (공학사)
 2003년 2월: 고려대학교 전자공학과 (공학석사)
 2003년 3월~현재: 국방과학연구소
 [주 관심분야] 근접신관, 전파고도계, 센서 신호처리 등

노 진 입



1984년 2월: 울산대학교 전기공학과 (공학사)
 1993년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학석사)
 2007년 8월: 충북대학교 전자공학과 (공학박사)
 1984년 3월~현재: 국방과학연구소
 [주 관심분야] 전파형 신관, 간섭계 고도계, 레이다 등

최 재 현



1995년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학사)
1997년 2월: 충남대학교 전자공학과 (공학석사)
2014년 2월: 충남대학교 전자전파정보통신공학과 (공학박사)
1998년 2월~현재: 국방과학연구소

[주 관심분야] 근접신관, 고도계, 근거리 레이더 등

박 영 식



2013년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학사)
2015년 2월: 광운대학교 전파공학과 (공학석사)
2015년 3월~현재: 국방과학연구소
[주 관심분야] 근접신관, 추적 알고리즘, 센서 신호처리 등

이 한 진



2010년 2월: 가천의과학대학교 의공학과 (공학사)
2012년 2월: 한양대학교 지능형로봇공학과 (공학석사)
2010년 3월~2012년 8월: 한국과학기술연구원
2012년 10월~현재: 국방과학연구소

[주 관심분야] 근접신관, 신호처리, 로봇틱스, 제어 등