

능동방호장치 레이더의 탐지 추적 정확도 향상을 위한 고속표적 속도 보상 및 탐지 추적 알고리즘에 관한 연구

High-Speed Target Velocity Compensation and Detection/Tracking Algorithm to Improve Detection/Tracking Accuracy for Active Protection System Radar

노 경 아 · 하 창 훈

Kyung A Roh · Chang Hun Ha

요 약

능동방호장치는 전차와 같은 기갑차량이 대전차 미사일 등 고속 발사체의 공격을 받아내기 전에 능동적으로 발사체를 무력화하여 공격을 막는 방어체계이다. 능동방호장치에서의 레이더는 전차에 고속으로 접근하는 위협체를 탐지추적하는 필수 센서로, 표적을 정밀타격하기 위해 수 센티미터 수준의 추적 정확도를 보유해야 한다. 하지만 고속표적 추적 시 표적 속도에 의한 Range Walk가 발생하여 속도에 비례한 거리추적 오차를 갖게 된다. 본 논문에서는 능동방호장치에 적합한 레이더의 거리추적 정확도 확보를 위하여 신호 전처리 단계에서 NCO(Numerically controlled oscillator) 주파수를 조절하여 실시간으로 속도 보상 방법을 연구하였다. 알고리즘의 성능을 검증하기 위하여 MATLAB M&S를 통해 표적 신호 모사 및 신호처리를 수행하였으며 CFAR(constant false alarm rate) 및 클러스터링을 통한 표적 탐지 및 칼만 필터 기반의 추적알고리즘을 통해 최종 추적 성능을 분석하였다.

Abstract

The Active Protection System is a defense system that protects armored vehicles, such as tanks, from attacks by high-velocity projectiles such as anti-tank missiles, by actively neutralizing the projectile before it strikes the vehicle. Radars are essential for detecting and tracking threats approaching tanks at high speeds, and their tracking accuracy must be a few centimeters to precisely strike the target. However, when high-speed targets are tracked, range walk occurs owing to the target speed, resulting in a range tracking error proportional to the speed. In this study, we investigated a real-time speed compensation method by adjusting the NCO frequency in the signal pre-processing stage to secure the range tracking accuracy of radars suitable for active defense devices. To verify the performance of the algorithm, target signal simulation and signal processing were performed using MATLAB M&S. The final tracking performance was analyzed using CFAR and clustering for target detection and a Kalman filter-based tracking algorithm.

Key words: Active Protection System, High-Speed Target, Velocity Compensation

I. 서 론

능동방호장치(APS, active protection system)는 주로 전

차나 장갑차 등 전투차량의 생존성 향상을 위해 대전차 미사일(anti-tank guided missiles ATGM)과 대전차 로켓(anti-tank rocket, ATR) 등이 차량에 도달하기 전에 연막,

한화시스템(Hanwha Systems)

· Manuscript received August 7, 2023 ; Revised August 21, 2023 ; Accepted September 19, 2023. (ID No. 20230807-060)

· Corresponding Author: Kyung A Roh (e-mail: kyunga.roh@hanwha.com)

재머 등으로 방해하거나 직접 요격하여 파괴하는 시스템이다^{[1]~[3]}.

APS는 그림 1과 같이 레이더, 전자광학장비, 발사대, 통제컴퓨터 등으로 구성된다. APS에서 레이더는 진차에 고속으로 접근하는 위협체를 탐지/추적하는 펄스 센서로, 표적을 정밀타격하기 위해 수 센티미터 수준의 추적 정확도를 보유해야 한다.

일반적인 펄스 레이더는 신호처리 이득을 높이고 탐지 거리를 확보하기 위하여 다수 펄스열을 이용한 coherent 또는 non-coherent integration processing을 수행한다. 펄스 레이더로 이동표적을 탐지추적 하는 경우, 펄스별로 표적 거리가 달라지는 range walk 현상이 발생한다^[4]. 이는 레이더의 integration 효율을 낮출 뿐만 아니라, 거리측정 오차를 유발하는 주요 요소로, integration 펄스 수가 많을수록, 표적 속도가 빠를수록 range walk 현상은 커지게 된다. APS에서의 대상 표적 중 하나인 운동에너지탄(kinetic energy penetrator, KEP)의 경우, 1,500 m/s 이상의 속도를 가지며, 본 논문의 시뮬레이션 조건 및 결과에 따르면, range walk 보상을 수행하지 않을 경우, 수 미터 수준의 거리측정오차를 갖게 된다(IV장 시뮬레이션 결과 참고). 따라서, 수 센티미터 수준의 레이더 추적 정확도를 확보하기 위해서는 이동표적에 대한 range walk 보상이 필수다.

일반적으로 펄스 열을 이용하여 표적의 거리, 속도를 측정하는 레이더 신호처리는 다음과 같다. 먼저 펄스 열 수신 신호에 대하여 거리 방향으로 펄스 압축(pulse compression) 또는 비트 주파수 FFT(fast Fourier transform)를 수행하여 1차원 거리 프로파일을 생성하고, 각 거리열 샘플

플을 도플러 방향으로 FFT하여 거리-도플러 맵을 생성한다. 이러한 신호처리 과정에서 range walk 보상을 수행하는데, 기존 연구에서는 레이더 빔을 송신하는 방향에서 표적 탐지 및 레인지링하는 coherent 방식으로 도플러 정보를 먼저 획득하여 위상을 보상하고 레인지 프로세싱하는 연구결과를 제시하였다^[6]. 기존 이동표적의 구조를 변형하여 이동표적 속도를 0으로 만들고 이를 레이더 속도에 반영하여 새로운 기하학적 구조를 얻은 후 푸리에 변환을 통해 표적 속도를 추정하는 연구도 제시되었다^[7]. 영상분야에서는 펄스 간 위상 오차로 인해 초점이 흐려져 이를 해결하기 위해 PSO(particle swarm optimization)을 활용한 HRRP(high resolution range profile)의 엔트로피를 최소화하여 위상 오차의 보상을 시행하는 연구도 있다^[8]. 또한, 혼합 다중 스케일과 변형 가능한 모델을 기반으로 표적의 잠재적 영역과 탐색 범위를 줄여 복잡한 환경에서도 다 표적을 추적하는 연구결과도 제시되었다^[9]. 하지만 앞서 언급한 연구들은 상대적으로 표적 속도가 느리고 요구되는 거리 오차가 수 미터 수준이거나 단일 표적에 관한 연구이기 때문에 APS 레이더와 같이 고속, 다표적을 정밀하게 탐지 추적하기 위해서는 range walk 보상을 위한 추가적 연구가 필요하다.

본 논문에서는 range walk 보상의 실시간성 확보를 위해, 이전 CPI에서 측정된 표적 속도 정보를 이용하여 현재 CPI의 수신 ADC(analog to digital converter) 데이터를 재귀적으로 보상하는 range walk 보상 알고리즘을 제안하였고, 알고리즘의 성능검증을 위해 MATLAB 기반의 M&S를 수행하였다. M&S에서는 서로 다른 거리/속도를 갖는 두 개의 표적 신호를 모사하였고, 신호처리, CFAR 및 clustering을 통해 표적을 탐지하고 Kalman filter 기반의 추적알고리즘을 통해 최종 추적 성능을 확인하였다.

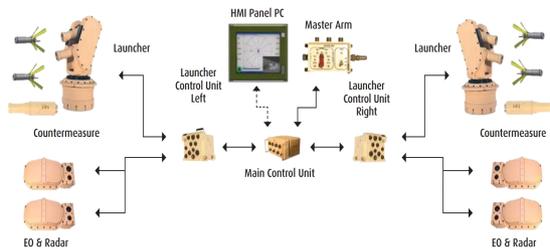


그림 1. 이스라엘의 능동방호장치 IRON FIST의 구성^[5]
 Fig. 1. Components of Israel Military Industries (IMI)'s Iron Fist active protection system.

II. Range Walk에 의한 거리 오차 분석

II 장에서는 APS 레이더의 운용 파형 및 신호처리 개념을 설명하고, M&S를 통해 신호처리 결과를 확인한다.

APS 레이더는 표적의 거리, 속도 정보를 측정하기 위하여 그림 2와 같이 선형 주파수 변조 신호가 다수의 펄스 열로 구성된 LFM-PT(linear frequency modulated pulse

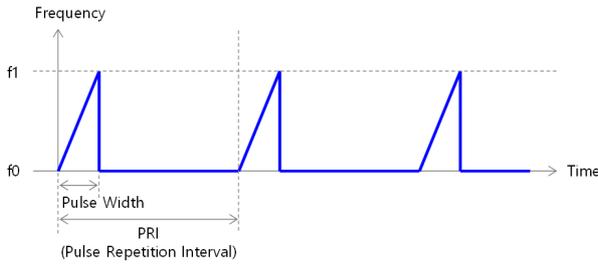


그림 2. LFM-PT 파형
Fig. 2. LFM-PT waveform.

train) 파형을 사용한다.

LFM-PT의 신호처리 과정은 그림 3과 같으며, 스트리밍으로 입력되는 데이터를 실시간으로 처리하는 전처리 과정과 저장된 전처리 결과를 신호처리하는 후처리 과정으로 구분된다. 전처리 과정에서는 IF(intermediate frequency) 대역의 ADC 데이터에 복소의 NCO 데이터를 합성하여 기저 대역 데이터로 하향 변환하고, LPF(low pass filter) 디지털 필터링 및 decimation을 통해 신호처리가 용이한 데이터로 변환하여 거리방향으로 펄스압축을 수행한다. 후처리 과정에서는 펄스열에 대한 펄스압축 결과를 도플러 방향으로 FFT하여 거리-도플러 맵을 생성한다 [10],[11].

그림 4는 펄스열에 대한 거리 방향 펄스압축 결과를 나타낸다. 1 CPI(coherent processing interval) 동안 표적의 속도에 의한 거리 변화가 신호처리 거리 해상도보다 크기 때문에 펄스압축 결과가 동일 거리 셀에 존재하지 않고 이동하는 것을 확인할 수 있다. 표적의 속도 1,500 m/s, PRI 20 μ s, 펄스 개수 250개, CPI 5 ms로 가정하여 계산해보면 1 PRI 동안의 거리 변화는 0.03 m, 1 CPI 동안의 거리 변화는 7.5 m이다. 또한, 펄스압축에서의 거리 해상

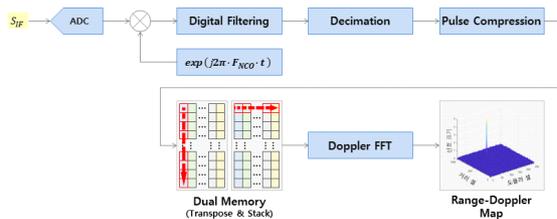


그림 3. LFM-PT의 신호처리 과정
Fig. 3. Signal processing process of LFM-PT.

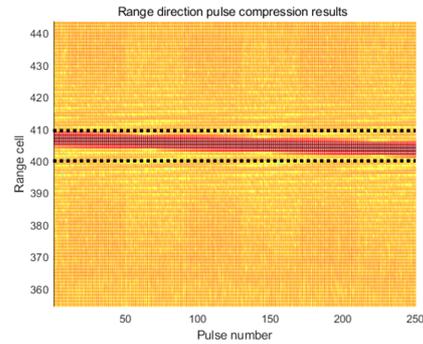


그림 4. range walk 보상이 미적용된 펄스압축 결과
Fig. 4. Pulse compression results without range walk compensation.

도는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있는데 여기서 c 는 빛의 속도이며, f_s 는 신호처리 샘플링 주기를 나타낸다. 샘플링 주기 f_s 를 62.5 MHz로 계산하면 거리 해상도는 2.4 m로, 1 CPI 동안의 거리 변화는 거리 해상도의 3배 이상이 되며, 그림 4의 시뮬레이션 결과 또한, 계산 결과와 같이 1 CPI, 250개 펄스에 대한 펄스압축 결과가 3개 이상의 거리 셀에 걸쳐서 나타남을 확인할 수 있다. 이처럼 1 CPI 내의 펄스압축 결과가 표적 속도에 의해 다른 거리 셀로 이동하는 현상을 range walk라고 한다. 이러한 range walk를 보상하지 않고 거리-도플러 맵을 생성할 경우 표적 속도에 비례한 신호 손실 및 거리추적 오차를 갖게 된다.

$$\Delta R = \frac{c}{2f_s} \quad (1)$$

그림 5는 range walk 보상 없이 거리-도플러 맵을 생성한 시뮬레이션 결과이다. 시뮬레이션에서 표적 거리는 682.5 m로 설정하였는데, 신호처리를 통해 산출한 표적 거리는 678 m로 약 4.5 m의 오차가 발생하였다. 이는 앞서 계산한 1 CPI 동안 표적의 거리 변화 7.5 m+신호처리 거리 해상도 2.4 m의 1/2인 4.95 m에 근접한 수준으로 계산을 통해 예측한 거리오차 수준이 발생함을 확인할 수 있다.

III. Range Walk 보상 방법 및 M&S 결과

III장에서는 range walk를 보상하기 위하여 수신 신호의 수식을 통해 range walk를 유발하는 항을 확인하고 보상 수식을 도출한다. 또한, M&S를 통해 range walk 보상 결

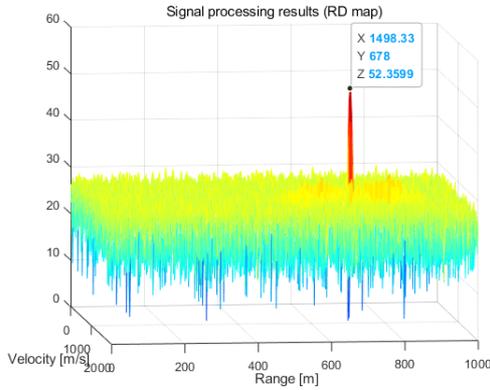


그림 5. Range walk 보상이 미적용된 거리-도플러 맵
Fig. 5. Range-Doppler map without range walk compensation.

과를 확인한다.

펄스 내 송신 신호 $S_{TX}(t)$ 는 식 (2)와 같이 정의되며, 송신 신호의 위상 $\theta_{TX}(t)$ 는 식 (3)과 같이 시간에 따라 선형으로 주파수가 변조된다. 여기서, A_{TX} 는 송신 신호의 크기, F_C 는 반송파의 중심 주파수, α 는 주파수 변화율(기울기), PW 는 주파수 변조가 발생하는 펄스 폭, t 는 CPI 동안 초기화되지 않고 변하는 시간이며 t_m 은 매 펄스 시작 시 초기화되는 시간이다. LFM-PT 파형에서의 펄스 시작 시점마다 초기화되는 t_m 을 사용해야 하는 이유는 거리-도플러 맵을 생성하는 신호처리 과정에서, 식 (3)의 주파수 변조 항인 $\frac{1}{2}\alpha\left(t_m - \frac{PW}{2}\right)^2$ 에 대한 펄스압축 결과 위상이 도플러 처리를 수행하는 $F_C t$ 항에 영향을 주지 않아야 하며, 이런 이유로 주파수 변조 항의 위상은 매 펄스마다 초기화되어야 하기 때문이다.

$$S_{TX}(t) = A_{TX} \cdot \cos(2\pi\theta_{TX}(t)) \quad (2)$$

$$\theta_{TX}(t) = F_C t + \frac{1}{2}\alpha\left(t_m - \frac{PW}{2}\right)^2 \quad (3)$$

표적에 반사되어 수신되는 수신기 출력 신호 $S_{RX}(t)$ 는 식 (4) 및 식 (5)와 같이 정의된다. 수식에서 A_{RX} 는 레이다 방정식에 의해 정의되는 수신 신호의 크기이며 τ (tau)는 표적과 레이다 간의 거리 R 만큼의 수신 지연시간이다. 여기서 펄스압축이 이루어지는 주파수 변조 항의 지연시간 τ 가 펄스마다 달라지기 때문에 range walk가 발생함을 알 수 있다.

$$S_{RX}(t) = A_{RX}(t) \cdot \cos(2\pi\theta_{RX}(t)) \quad (4)$$

$$\theta_{RX}(t) = F_C(t - \tau) + \frac{1}{2}\alpha\left(t_m - \tau - \frac{PW}{2}\right)^2 \quad (5)$$

Range walk 보상 식 도출을 위해 τ 를 표적의 거리, 속도로 표현하면 식 (6)과 같으며, R_0 , τ_0 는 각각 CPI 시작 시점에서의 표적 거리 및 지연시간, V 는 표적의 접근 속도로 등속 운동을 가정하였다. 식 (6)을 식 (3)의 주파수 변조 항에 대입하면 식 (7)과 같다.

$$\tau = \frac{2(R_0 - Vt)}{C} = \tau_0 - \frac{2Vt}{C} \quad (6)$$

$$\begin{aligned} & \frac{1}{2}\alpha\left(t_m - \tau - \frac{PW}{2}\right)^2 \\ &= \frac{1}{2}\alpha\left(t_m - \tau_0 - \frac{PW}{2} + \frac{2Vt}{C}\right)^2 \\ &= \frac{1}{2}\alpha\left(t_m - \tau_0 - \frac{PW}{2}\right)^2 \\ & \quad + \alpha\left(t_m - \tau_0 - \frac{PW}{2}\right)\frac{2Vt}{C} \\ & \quad + \frac{1}{2}\alpha\left(\frac{2Vt}{C}\right)^2 \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)에서 첫 번째 항인 $\frac{1}{2}\alpha\left(t_m - \tau_0 - \frac{PW}{2}\right)^2$ 은 CPI 시작 시점에서의 펄스압축 결과이고, 나머지 두 번째, 세 번째 항은 펄스마다 달라지는 range walk를 유발하는 항인데, 여기서 세 번째 항은 매우 작은 값이므로 보상에서 제외해도 무방하다. 결과적으로 range walk 보상을 위해서는 식 (7)의 두 번째 항이 0이 되도록 매 펄스, 매 ADC 샘플마다 보상을 하면 된다. 식 (8)은 range walk 보상 항을 재귀적으로 보상하기 위한 전개식이다.

$$\begin{aligned} & \theta_{comp}(t_m) \\ &= -\alpha\left(t_m - \tau_i - \frac{PW}{2}\right) \times \frac{2Vt}{C} \\ &= -\alpha\left(t_m - \left(\tau_{i-1} - \frac{2V \cdot CPI}{C}\right) - \frac{PW}{2}\right) \\ & \quad \times \frac{2V \cdot N \cdot PRI}{C} \end{aligned} \quad (8)$$

τ_i 는 현 CPI에서 계산되어야 할 수신 지연시간으로 앞의 식 (7) τ_0 와 같은 값이지만 CPI 간 회귀식으로 표현하

기 위하여 변경하였다. τ_{i-1} 은 이전 CPI에서 계산된 수신 지연시간이며 N 은 CPI 내 펄스 번호로 0부터 시작하는 값이다. τ_i 는 현재 신호처리를 통해 산출해야 할 값이기 때문에 현재 신호처리 과정에서 결과를 알 수 없으므로, 이전 CPI에서 산출된 수신 지연시간 τ_{i-1} 과 표적 속도 V 를 통해 산출할 수 있다. 또한, range walk 보상은 펄스 간 거리 변화를 보상하기 위함이므로 t 를 $N \cdot PRI$ 로 변환하여 계산할 수 있다. 상기 수식을 이용한 재귀 보상은 τ 와 V 의 초기값이 필요한데, 이는 range walk를 보상하지 않은 거리-도플러 맵을 통해 산출한 값을 이용하게 되며, range walk에 따른 오차를 포함하고 있지만 수 CPI가 반복되면서 오차가 0에 근접하게 된다.

그림 6은 앞에서 기술한 보상방법에 따라 range walk를 보상하여 펄스 압축 결과이다. 앞의 그림 4와 달리 펄스 압축 결과가 동일 거리 셀에 분포함을 확인할 수 있다. 그림 7은 그림 6의 펄스압축 결과를 이용해 거리-도플러 맵을 생성하여 표적 정보를 산출한 결과이다. 시뮬레이션에서 설정한 표적 거리 682.5 m, 신호처리를 통해 산출된 표적 거리 682.8 m로 약 0.3 m 수준의 거리오차를 가지며, 이는 신호처리 거리 해상도 2.4 m를 고려하면 정상적으로 range walk가 보상되었다고 볼 수 있다.

수신 신호에 range walk를 보상하는 방법으로는 DDS (direct digital synthesizer)를 이용하여 보상 신호를 생성하고 수신 신호에 합성하는 방법도 고려해 볼 수 있으나, 하드웨어 복잡도 상승 및 DDS 제어 등의 문제가 존재한다.

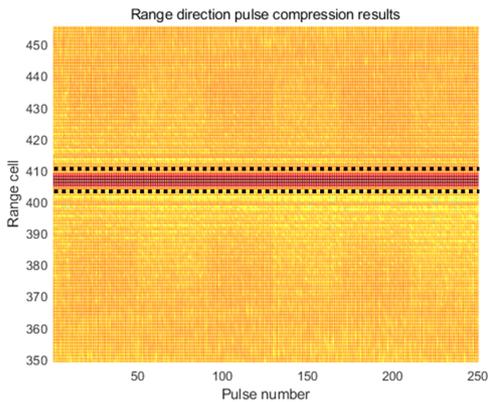


그림 6. Range walk 보상이 적용된 펄스압축 결과
Fig. 6. Pulse compression results with range walk compensation.

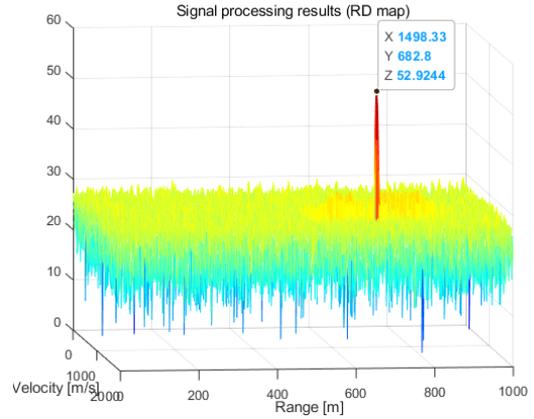


그림 7. Range walk 보상이 적용된 거리-도플러 맵
Fig. 7. Range-Doppler map with range walk compensation.

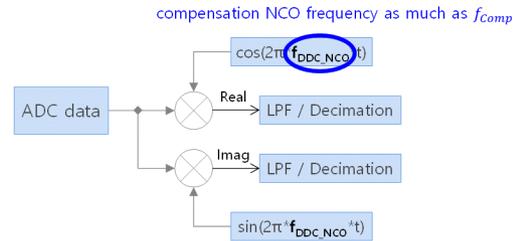


그림 8. 신호처리 블록도
Fig. 8. Signal processing block diagram.

따라서 본 연구에서는 FPGA를 이용해 수신 ADC 데이터에 보상데이터 합성하는 방식을 채택하였다.

그림 8은 FPGA에서 처리하는 신호처리 초단의 블록도이다. 그림과 같이 FPGA에서는 IF 대역의 ADC 데이터에 복소수의 NCO 데이터를 합성하여 기저 대역 데이터로 하향 변환 및 I/Q 양자화를 수행하는데, 이를 활용하여 NCO 신호에 range walk 보상값을 적용하여 수신 ADC 데이터에 실시간으로 range walk 보상을 적용할 수 있다.

IV. 대표적 대응 및 M&S 결과

III장까지는 단일 표적에 대한 range walk 보상에 대해 기술하였다. 식 (8)의 보상 수식에 따르면 보상값은 표적의 속도 V 와 펄스폭 PW 에 의해 계산되는데 보상값은 그림 8과 같이 수신 ADC 데이터에 일괄 적용되므로 특정 표적 하나에 대해서만 보상할 수 있다. APS의 경우에는 표적 신호가 다수여도 전투차량의 최근접 위협 표적을

우선 대응하기 때문에 최근접 위협 표적을 기준으로 먼저 속도 보상을 수행하고 교전 완료 후 후속 표적에 대한 보상을 수행한다면 시스템 운용에는 문제가 없다고 볼 수 있다.

IV장에서는 다표적에 대한 대응과 M&S 결과를 보여 준다. 긴박한 교전 상황에서 전투차량의 생존성이 높이기 위해서는 다수의 표적 중 위협 표적에 대한 명확한 구분이 필요하다. 지상에서는 실제 위협 표적 외의 주변 환경에서 발생하는 잡음, 전자전, 열, 스모크, 반사 잡음 등이 존재하여 레이더 신호를 왜곡하거나 잘못된 탐지를 유도할 수 있기 때문이다.

다표적 탐지를 위해서는 신호처리를 통해 생성된 거리-도플러 맵에 2차원 CFAR을 적용하여 표적 후보의 거리/도플러 인덱스 및 신호 세기 등의 정보를 추출한다. 표적의 크기, 형상 및 신호 환경에 따라 표적 신호가 여러 셀에 걸쳐서 나타날 수 있기에 근접 셀을 클러스터링하여 하나의 표적으로 간주하고, 클러스터 내에서의 표적 정보는 peak power 셀을 기준으로 산출한다. 또한, 오경보를 배제하기 위하여 표적 동특성을 고려한 유효성 검사를 수행하여 표적을 확정한다.

유효성 검사를 통과한 표적에 대해서 정밀한 표적 거리 산출을 수행한다. 앞서 언급한 바와 같이 신호처리 거리 해상도는 2.4 m인데 요구되는 거리 정확도는 수 센티미터 수준이다. 따라서 거리-도플러 맵의 신호처리 프로파일에서 SPI(subsample peak interpolation)^[12] 기법을 적용하여 센티미터 수준으로 거리 보간을 수행한다.

끝으로 보간법을 적용하여 계산한 거리와 속도에 추적 정확도 향상을 위해 칼만 필터(Kalman filter)를 적용하였다. 초기값 \hat{x}_0, P_0 을 설정한 후, 식 (9)와 같이 추정값과 오차 공분산을 예측하였으며, 식 (10)의 칼만 이득, 식 (11)의 추정값, 식 (12)의 오차 공분산을 계산하였다^[13].

$$\hat{x}_k^- = A\hat{x}_{k-1}, P_k^- = AP_{k-1}A^T + Q \tag{9}$$

$$K_K = P_K^- H^T (HP_K^- H^T + R)^{-1} \tag{10}$$

$$\hat{x}_k = \hat{x}_k^- + K_K(z_k - H\hat{x}_k^-) \tag{11}$$

$$P_K = P_K^- - K_K HP_K^- \tag{12}$$

\hat{x} 는 거리, 속도의 정보이며, P 는 오차 공분산이다. 각 알파벳 위에 '1'이 있다면 추정값이라는 의미이며, 0은 초기, k 는 현재, $k-1$ 은 직전 과거라는 의미이다. A 는 State transition matrix, H 는 measurement matrix이다. 시뮬레이션

시 A 는 $\begin{pmatrix} 1 - 5e^{-3} & -1.25e^{-5} \\ 0 & 1 & 5e^{-3} \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$, H 는 $\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \end{pmatrix}$ 을 사용하였다.

Q 는 system noise, R 은 measurement noise이며 정의된 값을 사용하였고 필터는 일반적인 정속 모델이 아닌 가속모델 PVA(position-velocity-acceleration)로 설계하였다.

그림 9는 칼만 필터를 적용하여 표적을 추적한 M&S 결과로, 오차의 표준편차가 64.03 mm에서 24.17 mm로 감소한 것을 확인할 수 있다.

그림 10은 등속으로 접근 중인 2개 표적의 거리-도플러 맵이다. 파란색 원은 CFAR을 통과한 표적 후보군을 나타내며, 이 중 신호처리 알고리즘에 의해 클러스터링 및 표적유효성 검사 등을 거쳐 최종 표적인 Target 1과 Target 2를 거리-도플러 맵에 표시되었다. Target 1과 Target 2는 거리 차이가 200 m이고, 각각 1,500 m/s, 1,600 m/s의 속도를 가지고 있다. 최근접 위협표적인 Target 1을 우선적으로 대응하였고, 신호처리 M&S 결과, 정상적으로 속도 보상이 이루어져 1,502.57 m/s의 속도 추정치를 얻으며 탐지/추적을 유지하였다. 그러나 Target 2는 탐지/추적은 유지하지만 속도 미보상으로 1,492.6 m/s의 비정상적인 속도 추정치가 발생하였다. Target 1 대응 후 Target 2의 속

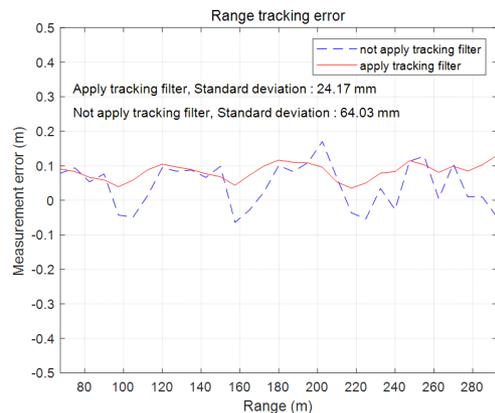


그림 9. 칼만 필터를 적용한 거리 추적 오차 분석 결과
Fig. 9. Range tracking error analysis results applied with Kalman filter.

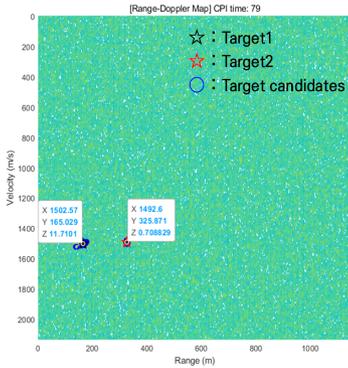


그림 10. 다표적 탐지/추적 M&S 결과
Fig. 10. Multi-target search/tracking M&S results.

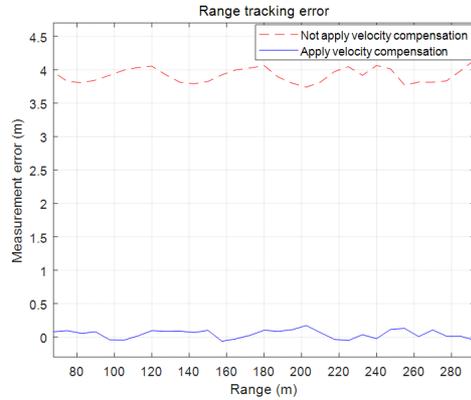


그림 12. 거리 추적 오차 M&S 결과
Fig. 12. Range tracking error M&S results.

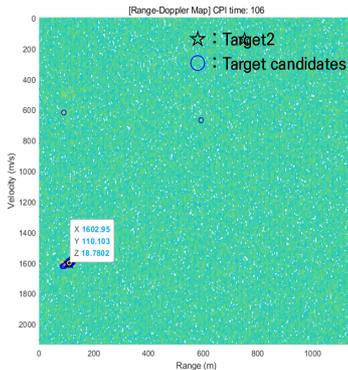


그림 11. 다표적 대응 후 탐지/추적 M&S 결과
Fig. 11. Multi-target post-response search/tracking M&S results.

도를 이용하여 보상한 결과, 그림 11과 같이 탐지/추적을 유지하면서 정상적으로 처리된 1,602.95 m/s의 속도 추정치를 확인하였다.

그림 12는 속도 보상 전과 후를 비교한 거리 측정 오차 M&S 결과 그래프이다. 속도 보상 미적용 시 표 1과 같이 평균적으로 3.916 m의 거리 추적 오차가 발생한다. 속도 보상 적용 시에는 0.043 m의 낮은 수치의 거리 추적 오차가 발생하며 속도 보상 미적용 대비 98.88 % 오차가 낮은 것을 확인할 수 있다. 표 2는 시뮬레이션 파라미터이며, II 장~IV 장에서 사용한 값을 표로 정리한 것이다.

V. 결 론

본 논문에서는 능동방호장치용 레이더에서 다수의 고속 표적을 탐지/추적하고 추적 정확도 향상을 위한 속도

표 1. 거리 추적 오차의 측정값

Table 1. Measurement of range tracking error.

	Average	Standard deviation
Not apply velocity compensation	3.916 m	0.109 m
Apply velocity compensation	0.043 m	0.064 m

표 2. 시뮬레이션 파라미터

Table 2. Simulation parameters.

Target velocity	PRI	Number of pulse	CPI	Sampling period
1,500 m/s	20 us	250	5 ms	62.5 MHz
1,600 m/s				

를 보상하는 방법을 제시하였다. Range walk를 보상하기 위해 속도 보상 적용 결과 거리 추적 오차를 98.88 % 줄여 정확도가 향상됨을 확인할 수 있었다.

실시간으로 들어오는 다수의 표적 신호를 추적하기 위해서는 우선순위를 선정하여 표적을 비교 및 분석할 수 있는 기준이 필요하다. 본 논문에서는 표적이 등속도인 경우로 분석하였지만, 실제 전장에서는 주 표적인 대전차 미사일이나 로켓이 가속도를 가지고 있으며, 이미 추적하고 있는 표적 외에 근접한 거리에서 추가로 표적이 생길 수도 있기 때문에, 표적 대응의 우선순위를 선정한 후 알고리즘에 반영하는 추가적 연구가 필요하다. 구조화된 기준 데이터와 이를 포함한 추적알고리즘은 지상의 다양한 표적으로부터 대전차를 방호할 수 있는 핵심적인 연구로 사료된다.

References

- [1] J. S. Ha, J. E. Roh, J. H. Choi, H. J. Lee, and Y. S. Park, "Study on the compact K-band radar for detecting the approaching target above ground," *Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 28, no. 4, pp. 309-317, Apr. 2017.
- [2] J. S. Ha, E. H. Lee, H. A. Lee, G. C. Park, and K. G. Cho, "Performance analysis of missile/rocket defense system for RPG-7 defense of main battle tank," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, vol. 17, no. 3, pp. 350-357, Jun. 2014.
- [3] J. E. Kim, "A high-speed image processing algorithm based on facet filter for small missile detection," *Journal of the Korea Institute of Military Science and Technology*, vol. 12, no. 4, pp. 500-507, Aug. 2009.
- [4] J. M. Christiansen, K. E. Olsen, and G. Weiß, "Coherent range and Doppler-walk compensation in PBR applications," in *2014 15th International Radar Symposium (IRS)*, Gdansk, Jun. 2014, pp. 1-4.
- [5] Elbit Systems-Land, "Iron fist series of active protection systems high-performance active protection systems against full spectrum of anti-tank threats," 2019. Available: https://elbitsystems.com/media/Catalog-Active-Protection-Systems-_5_-Web.pdf
- [6] J. H. Youn, K. Kim, H. G. Yang, Y. S. Chung, W. W. Lee, and K. B. Bae, "Doppler frequency compensated detection and ranging algorithm for high-speed targets," *Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences B*, vol. 35, no. 12, pp. 1244-1250, Dec. 2010.
- [7] C. S. Bae, H. M. Jeon, D. H. Yang, and H. G. Yang, "Ground moving target's velocity estimation in SAR-GMTI," *Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 28, no. 2, pp. 139-146, Feb. 2017.
- [8] B. S. Kang, K. T. Kim, "Removal of inter-pulse phase errors for ISAR imaging using rear view radars of an automobile," *Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers*, vol. 51, no. 8, pp. 1781-1787, Aug. 2014.
- [9] X. Tao, H. Chaobing, and Z. Mengqiang, "Detection and tracking of multiple moving targets in complex conditions," in *4th International Conference on Mechatronics, Materials, Chemistry and Computer Engineering*, Xi'an, Dec. 2015, pp. 2978-2986.
- [10] J. H. McClellan, R. W. Schafer, and M. A. Yoder, *Signal Processing First*, Bloomington, MN, Pearson, 2003.
- [11] L. F. Chaparro, A. Akan, *Signals and Systems Using MATLAB*, 3rd ed. London, Academic Press, 2019.
- [12] S. D. Regani, C. Wu, F. Zhang, B. Wang, M. Wu, and K. J. R. Liu, "Handwriting tracking using 60 GHz mmWave radar," in *2020 IEEE 6th World Forum on Internet of Things(WF-IoT)*, New Orleans, LA, Jun. 2020, pp. 1-6.
- [13] P. Kim, *The Kalman Filter Is Not Difficult: With MATLAB Examples*, Scotts Valley, CA, CreateSpace Independent, 2011.

노 경 아 [한화시스템(주)/선임연구원]

<https://orcid.org/0009-0001-4774-2541>



2016년 2월: 서강대학교 전자공학과 (공학사)
 2015년 12월~2016년 9월: 한화탈레스 연구원
 2016년 9월~현재: 한화시스템(주) 선임연구원
 [주 관심분야] 레이더 시스템 및 신호처리

하 창 훈 [한화시스템(주)/수석연구원]

<https://orcid.org/0009-0004-2874-827X>



2003년: 아주대학교 전자공학과 (공학사)
 2005년: 아주대학교 전자공학과 (공학석사)
 2005년~2009년: LG전자(주) 연구원
 2009년~2016년 9월: 한화탈레스 전문연구원
 2016년 9월~현재: 한화시스템(주) 수석연구원
 [주 관심분야] 레이더 시스템 및 디지털 통신, 신호처리, 제어