

다양한 재밍에 대한 대함 미사일의 효과도 분석

Analysis of the Effects of Various Jamming Techniques on Anti-Ship Missiles

김제안 · 김기인 · 안민기 · 이준호*

Je-An Kim · Ki-In Kim · Min-Gi An · Joon-Ho Lee*

요 약

레이다는 반사되는 신호를 이용하여 목표물의 거리, 속도, 각도 정보를 획득하여 탐색하고 추적을 수행한다. 아군 선박과 항공기의 생존율을 높이기 위해서는 이러한 레이더의 탐색 및 추적을 피하는 것이 중요하다. ECM(electronic counter measure) 기법은 에코신호를 속이거나 잡음 신호로 레이더 신호를 덮어 레이더가 표적을 탐색하고 추적하는 것을 방해한다. 본 논문에서는 ECM 기법 중 재밍 기법들을 모델링하여 재밍 환경에서의 대함 미사일의 성능을 분석한다.

Abstract

Radars search and track by obtaining the distance, speed, and angle information of the targets using the reflected signals. To increase the survival rate of friendly vessels and aircraft, it is important to avoid radar tracking. The electronic counter measure (ECM) prevents the radars from searching and tracking by deceiving or covering echo signals with noise. In this study, jamming techniques, which are ECM techniques, were modeled to verify how anti-ship missiles operate in jamming environments.

Key words: Radar, Active Homing Missile, ECM, Jamming, RGPO, VGPO, Cross-Eye

I. 서 론

호밍 유도 미사일의 유도 방식 중 하나인 능동 유도는 표적에 대한 RF신호를 송신하고, 반사되어 돌아오는 표적 반사 신호를 수신하여 표적의 거리, 속도, 각도 정보를 얻어 표적을 추적하게 된다^[1]. 표적은 유도 미사일 seeker의 탐지를 회피하기 위해 ECM(electronic counter measures) 기법을 사용하여 생존율을 높이는 방법이 있다. ECM 기법은 잡음재밍, 기만재밍뿐만 아니라 전파를 반사시키는 물질을 뿌리는 방법인 Chaff와 레이더가 실제 표적이라고 생각하여 추적하는 Decoy 기법이 있다^[2].

ECM 기법 중 잡음재밍 기법은 표적 추적요소인 거리, 속도, 및 각도 정보를 획득하지 못하게끔 방해하고, 기만재밍 기법은 표적 추적 요소를 기만된 요소 값들을 수신하게끔 만드는 기법이다. 본 논문에서는 대함 미사일에 대한 ECM 기법 중 잡음재밍 기법 및 기만재밍 기법에 대한 효과도 분석을 하고자 한다.

잡음재밍기법은 적 미사일의 seeker가 수신하는 신호의 SNR(signal to noise ratio)를 감소시켜 표적 추적요소를 획득하지 못하게끔 방해한다. 기만재밍 기법의 경우 대표적으로 거리기만재밍, 속도기만재밍, 각도기만재밍 기법이 있다. 거리기만재밍은 펄스 도착시간에 대한 변조를

LIG 넥스원(LIG Nex1)

*세종대학교 정보통신공학과(Department of Infomation & Communication Engineering, Sejong University)

· Manuscript received August 9, 2024 ; Revised September 4, 2024 ; Accepted January 9, 2025. (ID No. 20240809-080)

· Corresponding Author: Joon-Ho Lee (e-mail: joonhlee@sejong.ac.kr)

통하여 시간지연이나 빠르게 도착하는 방식으로 거리를 기만한다. 속도기만재밍은 도플러 변조를 통하여 레이더 신호의 주파수 및 위상을 변조시켜 재밍하는 방식으로 속도를 기만한다. 각도기만재밍은 진폭 변조를 통하여 레이더 신호의 진폭 혹은 편파를 변조시키거나 다중 변조 신호로서 재밍하는 방식으로 각도를 기만한다.

본 논문에서는 미사일 Seeker를 모델링하여 능동 유도 미사일을 모의한다. 또한 잡음재밍 기법, 거리기만재밍 기법, 속도기만재밍 기법, 각도기만재밍 기법을 적용하여 미사일 Seeker에 미치는 영향을 분석한다.

II. 배경 기술

2.1 잡음재밍

레이다에서 방사된 레이더 펄스신호는 표적에서 반사되며 반사된 신호가 레이더 수신기에 수신될 때는 표적으로부터의 표적 반사 신호와 함께 각종 잡음 신호가 같이 수신되게 된다. 이때 잡음 신호가 표적 반사 신호보다 세기가 크면 신호탐지가 되지 않아 표적 탐색이 불가능하다. 이렇게 SNR을 크게 하여 표적의 반사 신호보다 잡음 신호의 세기를 크게 하여 탐지를 못하게 하는 것이 잡음재밍이다. 잡음재밍은 점 잡음, 대역 잡음, 소인 점 잡음, cover pulse 잡음 등이 있으나, 본 논문에서 다루는 잡음재밍 방법은 cover pulse 잡음재밍을 이용한다^[2]. Cover pulse 잡음재밍은 위협체의 RF 펄스 신호를 추적하여 펄스 신호 주위에 잡음 펄스 신호를 방사한다. 이에 위협체의 수신기에는 RF 반사 신호와 재밍으로 인한 잡음 성분도 동시에 입사되므로 목표물 반사 펄스 추적이 방해된다. 결과적으로 위협체의 수신기는 거리 추적을 정상적으로 하지 못하게 된다. 해당 잡음 기법은 점 잡음 및 대역 잡음과 같은 재밍 기법보다 발생하는 방법이 복잡하나, 위협체의 펄스를 추적하여 짧은 시간동안 잡음 펄스를 방사하므로 전력 측면에서 효율적이다. Cover pulse재밍에 사용할 잡음의 대역폭은 spot 및 barrage로 설정할 수 있으며, 본 연구에서는 barrage 잡음으로 가정하여 가우시안 노이즈를 잡음 모델로 사용하였다.

2.2 거리기만재밍 기법 (RGPO)

레이다에서 펄스 추적을 통하여 거리 정보를 정확하게

얻기 위해 거리게이트(range gate)를 사용한다. 표적으로부터 반사되어 되돌아오는 신호를 항상 게이트 중앙에 오도록 조정하며, 송신된 레이더 펄스와 게이트 중앙까지의 시간이 거리로 환산되어 표적을 추적한다. RGPO(range gate pull off) 재밍 기법은 실제 표적에서 점점 멀어지는 허위 표적을 생성하는 기법이다^[3]. 허위 표적은 레이더의 추적을 기만하여 기존 추적하던 표적에서 허위 표적을 추적하게끔 유도한다. RGPO 재밍 기법은 게이트 내에 허위 신호를 발생시켜 반사 신호와 허위 신호와의 시간차를 점점 증가시킨다. 수신기는 큰 신호인 허위 신호를 쫓아가게 되므로 얼마 후 레이더 수신기의 거리 게이트에는 실제 표적의 반사 신호가 아니라 허위 신호를 추적하게 되어 실제 표적을 놓치게 된다^[2]. 그림 1은 RGPO의 동작 원리를 나타내는 그림이다.

2.3 속도기만 재밍 기법(VGPO)

RGPO가 펄스 신호의 시간지연을 통하여 작동된다면 VGPO(velocity gate pull off) 재밍 기법의 경우 표적 반사 신호의 도플러 주파수를 점진적으로 증가시켜 추적레이더의 속도 게이트가 기만용 재밍 신호를 추적하도록 하는 기법이다. RGPO의 경우 실제표적과의 거리를 기만하였다면 VGPO는 실제 표적과 다른 속도를 가진 허위 표적을 생성하여 레이더를 기만한다.

$$F_d = \frac{2V_d}{\lambda} \quad (1)$$

도플러 주파수 F_d 는 식 (1)에 의해서 계산된다. 그림 2는 VGPO의 작동 방식을 나타낸 것이다. 초기 실제 표적

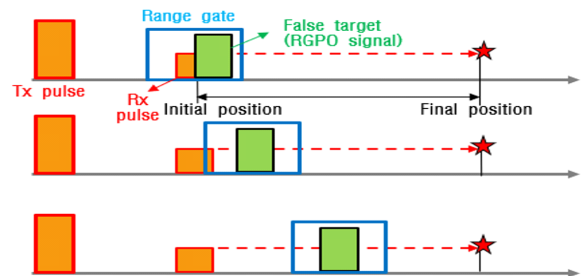


그림 1. RGPO 동작원리

Fig. 1. Mechanism of RGPO.

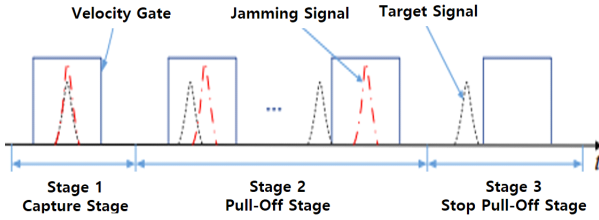


그림 2. VGPO 동작원리
Fig. 2. Mechanism of VGPO.

과 같은 도플러 주파수를 가진 신호를 방사하나 실제 표적의 신호보다 높은 신호레벨을 가진 신호를 방사한다. VGPO는 그 후 점진적으로 주파수를 증가시켜 실제 표적의 주파수가 아닌 허위 표적의 주파수를 수신하여 추적하게끔 기만한다. 도플러 주파수의 변이율은 식 (2) 및 식 (3)에 의해 결정된다^[2].

$$V_d = 0.375at^2 \quad (2)$$

$$F_d = \frac{55}{\lambda} V_d \quad (3)$$

2-4 각도기만(Cross-Eye)

Cross-eye는 L만큼 떨어져 배치된 두 재머 안테나가 방사하는 진폭 비 a 와 위상차 ϕ 를 갖는 두 재밍 신호를 통해 모노펄스 레이더를 기만한다. Cross-eye 재밍의 경우 모노펄스 레이더의 수신 신호의 합신호(Σ)와 차 신호(Δ)를 변경시켜 모노펄스의 각도 오차 값을 변경시킨다. 재밍 신호에 의하여 모노펄스레이더는 실제 표적이 아닌 허위 표적을 추적하게 된다^[3].

$$r_{miss} = \frac{L \cos \psi}{2} \frac{1 - a^2}{1 + 2a \cos \phi + a^2} \quad (4)$$

$$\theta_{miss} = \frac{\Delta \theta}{2} \frac{1 - a^2}{1 + 2a \cos \phi + a^2} \quad (5)$$

ψ 는 두 재머 안테나 사이를 수직 이등분한 선과 track axis 사이의 각도이며, $\Delta \theta$ 는 두 재머 안테나 사이의 각도이다. 식 (4) 및 식 (5)을 통하여 진폭 비 a 가 1일 때와 위상차 ϕ 가 180° 일 때 가장 효과가 우수함을 확인 할 수 있다.

III. 능동 레이더 탐색기 설계 및 재밍 기법 Simulink 설계

3-1 능동레이더 탐색기 설계

본 연구에서 재밍 효과도 분석에 사용한 미사일은 능동 호밍 미사일이다. 능동 호밍이란 미사일의 탐색기(seeker)에서 표적을 향해 RF 신호를 방사하고, 반사된 RF 신호를 통해 표적의 정보를 획득하여 유도하는 방식이다. 본 논문에서는 미사일 유도에 필요한 탐색기를 시뮬링크(simulink)로 모델링하였다. 또한 비례항법 유도인 PPNG(pure proportional navigation guidance) 유도 법칙이 적용된 미사일 동체는 참고문헌 [4]에서 설계된 것을 사용하였다.

3-1-1 탐색기 구조 개요

그림 3에서 설계한 탐색기의 구조를 보인다. 설계한 탐색기는 거리 및 각도 추적을 수행하며, 3가지 탐색기 모드에 따라 그에 맞는 동작알고리즘을 수행한다. 탐색기 안테나는 진폭비교 모노펄스 안테나이며, 정현파 반송 주파수 변조의 RF 신호를 사용하는 펄스레이더로 설계하였다. 또한 분할 게이트를 사용한 거리 추적과 2축 김발 측 구조로 방위각 및 고각 추적을 수행하도록 설계하였다. 탐색기모드는 탐색(search), 획득(acquisition), 추적(track)의 3가지 모드를 갖는다. 추적모드에서 목표물 손실(target loss)이 발생될 때 탐색모드로 변환되며, 탐색모드 중에 목표물을 획득하면 획득모드로 전환된다. 획득모드에서는 목표물을 기만하게 추적하기 위해 광대역으로 거리 추적 시스템이 작동된다. 획득모드에서 약간의 시간이

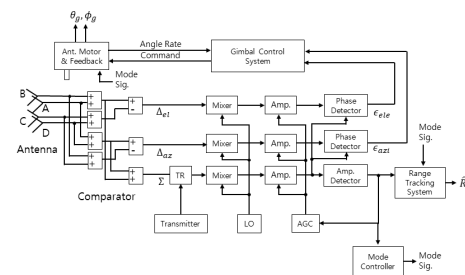


그림 3. 탐색기 구조 블록 다이어그램
Fig. 3. Block diagram of designed seeker.

호르면 추적모드로 변환된다.

3-1-2 각도 추적 시스템 모델링

미사일이 목표물을 향해 안정적으로 유도되기 위해서는 탐색기 안테나의 지시방향과 목표물 사이의 가시선(LOS, line of sight)을 정렬하는 과정이 필요하다. 유도는 미사일의 동체 축과 안테나 지시방향 사이의 김발 각을 이용하여 이루어지도록 하였다. 김발 각은 안테나 김발 축에 부착되어있는 리졸버(resolver)센서를 통해서 김발축의 회전각을 측정한다. 그림 4는 본 연구에서 설계된 탐색기의 형상을 보인다. 설계한 탐색기는 2축 김발구조로 설계하였으며, 방위각 및 고각 평면에서의 각도 추적을 수행한다.

그림 4를 보면 내부 김발로 방위각 오차를 추적하는 요(yaw) 김발과, 외부 김발로 고각 오차를 추적하는 피치(pitch) 김발구조가 보인다. 또한 안테나에 각속도 자이로(rate gyro) 센서가 부착되어있어, 동체의 움직임과 김발축의 회전 각속도를 모두 고려하여 각속도를 측정한다. θ_g 와 ϕ_g 는 각각 미사일 동체 축을 기준으로 김발의 요각과 피치각을 의미한다. 그림 5에서 각도 추적 루프를 보

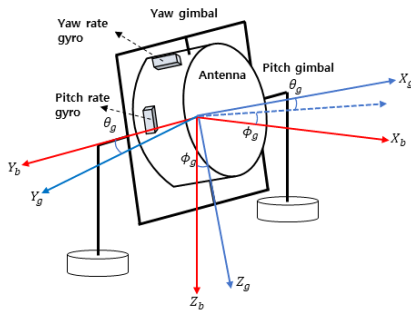


그림 4. 2축 자이로 플랫폼 기반의 탐색기 형상

Fig. 4. Seeker model based on 2-axis gyro platform.

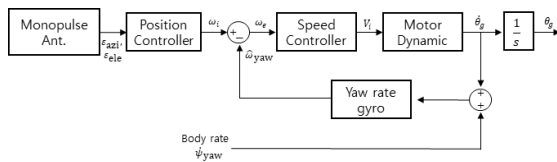


그림 5. LOS 각도 추적 루프

Fig. 5. Loop of LOS angle tracking.

인다^[5].

Monopulse Ant. 블록은 모노펄스 안테나이며, 해당 블록의 출력으로 목표물과 안테나 지시선사이의 추적 각도 오차 ($\epsilon_{azi}, \epsilon_{ele}$)를 산출한다. **Position controller** 블록은 추적 각도 오차를 입력으로 받아 각도 추적을 위한 명령 각속도 (ω_i)를 출력한다. 명령 각속도는 각속도 자이로 출력 ($\hat{\omega}_{yaw}$)과 비교하여 각속도 에러 (ω_e)를 산출한다. ω_e 는 **speed controller** 블록에 입력되어 김발 축을 구동시킬 DC 모터에 필요한 기전력 (V_i)을 출력한다. $\dot{\theta}_g$ 는 DC 모터의 의한 김발축의 회전 각속도이다. 김발축의 회전 각속도 ($\dot{\theta}_g$)와 미사일 동체 움직임에 의한 각속도 ($\dot{\psi}$)는 각속도 자이로에 의해 측정되며, 각속도 자이로는 미사일의 움직임에도 안정적으로 안테나가 목표물을 지시할 수 있도록 한다.

3-1-3 진폭비교 모노펄스 안테나 모델링

목표물과 안테나 사이의 추적오차각도를 산출하기 위해서 모노펄스 안테나를 모델링하였다. 모노펄스 안테나는 하나의 펄스로 표적에 대한 방위각 및 고각 추적 오차를 산출한다. 이를 위해 4개의 편향빔(squinted beam)이 사분면에 공간 분할적으로 배치되어있으며, 각각 동일한 편향 각(squint angle)을 가지도록 하였다. 그림 6에서 모노펄스의 편향 빔을 보인다.

A, B, C, D는 각각 4개의 방향으로 향하고 있는 편향 빔들을 의미한다. 목표물의 대한 반사 신호가 이 편향 빔을 통해 수신할 때, 수신 신호의 크기가 각각 다른 점을 이용하여 각도 오차를 산출한다. 편향 빔 각각의 빔 패턴은 가우시안 패턴으로 가정하였으며, 전력 이득 패턴으로 설계하였다^[6].

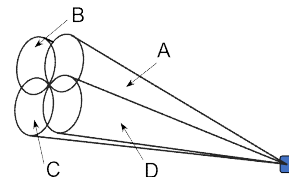


그림 6. 모노펄스 안테나의 편향 빔

Fig. 6. Squinted beam of monopulse antenna.

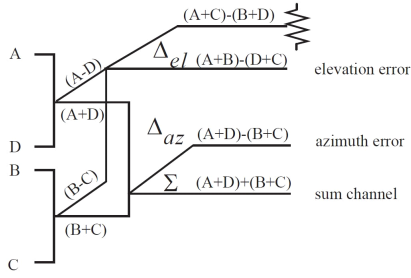


그림 7. 모노펄스 비교기
Fig. 7. Monopulse comparator.

$$\alpha(\theta) = G_0 \left[\exp \left\{ -2 \ln 2 \left(\theta / \theta_{3dB} \right)^2 \right\} \right]^2 \quad (6)$$

식 (6)에서 G_0 는 하나의 편향 빔에 대한 boresight 이득이며, θ_{3dB} 는 한 안테나 빔의 3 dB 빔폭이다. 그림 7에서 모노펄스 비교기(monopulse comparator) 구조를 보인다^[7]. 모노펄스 비교기는 방위각 및 고각 추적 오차 산출을 위해 두 개의 차이 패턴(difference pattern)과 합 패턴(sum pattern)을 출력한다. 차이 패턴은 방위각 차이 패턴(Δ_{az})과 고각 차이 패턴(Δ_{el})으로 구성되어 있다. 합 패턴(Σ)은 송신기의 방사패턴과 수신 차이 패턴의 정규화에 사용된다.

식 (7) 및 식 (8)을 통해 추적 각도 오차를 산출할 수 있다^[6].

$$\hat{\epsilon}_{azi} = -\frac{\theta_{3dB} \Delta_{az}}{k_m \Sigma} \quad (7)$$

$$\hat{\epsilon}_{ele} = \frac{\theta_{3dB} \Delta_{el}}{k_m \Sigma} \quad (8)$$

식 (7) 및 식 (8)의 k_m 은 모노펄스 오차 기울기 계수이다. 해당 수식의 결과는 그림 3에서 Monopulse Ant. 블록 출력에 해당한다.

3-1-4 거리 추적 시스템

목표물에 대한 거리 추적은 아날로그 회로를 가정하여 설계하였다. 거리 추적을 위해 분할 게이트를 설계하였으며 초기게이트(early gate)와 후기게이트(late gate)로 구성하였다. 분할 게이트를 통해 거리 오차 전압을 산출하여 거리 추적 루프 회로를 가동하여 게이트의 스위칭 타이밍을 제어한다. 게이트의 스위칭 타이밍은 시간영역상에

서의 거리게이트 위치이며, 게이트는 목표물 반사 펄스를 추적하므로 게이트의 위치는 추정거리이다.

그림 8에서 분할 게이트를 통한 거리오차 산출 모습 보인다. 목표물 반사 펄스에는 게이트가 위치하여있고, 펄스에는 초기 게이트와 후기 게이트가 중첩되어있다. 후기 게이트 중첩영역을 초기 게이트 중첩영역으로 감산하여 거리 오차 전압(E_e)을 산출한다.

그림 9는 거리 추적 시스템의 블록 다이어그램이다^[8]. R_m 은 실제 거리이고, R_o 는 추정 거리이다. 거리 오차 전압은(E_e) 그림 9에서 보인 분할 게이트를 통한 거리 판별기로 산출한다. D 는 거리 단위를 전압단위로 스케일링해 준다. 루프필터(loop filter)는 E_e 를 입력으로 받아 거리 속도 전압(E_v)으로 출력한다. 루프 필터에서 탐색기 모드에 따라 대역폭이 변경되는데 획득모드에서는 광대역이고, 추적모드에서는 협대역으로 변경된다. 거리 적분기는 거리 속도 전압을 입력으로 받아 거리 전압(E_R)으로 출력

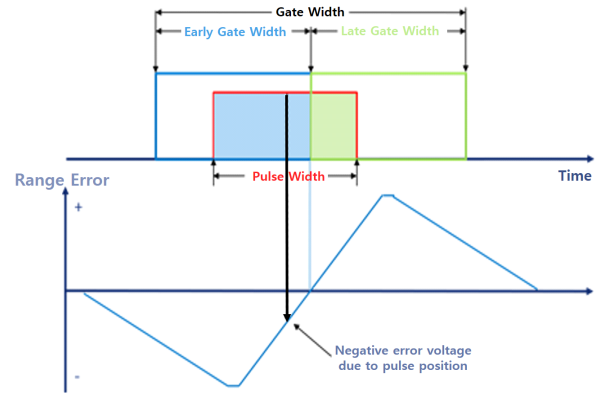


그림 8. 분할 게이트의 거리 오차 전압
Fig. 8. Range error voltage of split gate.

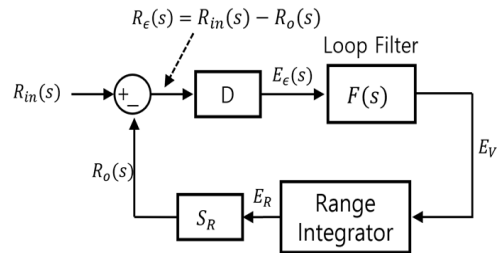


그림 9. 거리 추적 시스템의 전달함수 모델
Fig. 9. Transfer function model of range tracking system.

한다. S_R 을 통해 거리 전압(V)은 거리 단위(m)로 스케일링된다.

3-2 재밍기법 설계

3-2-1 잡음재밍 설계

그림 10은 simulink로 구현한 noise jamming의 블록 다이어그램이다. Noise jamming 기법 중 cover pulse jamming기법을 사용하였다. 잡음재밍은 설정한 JSR만큼 잡음전력이 주어질 때, 상응하는 잡음 분산값이 결정되며 대부분의 시간영역에서의 range gate가 위치해 있을 때, 잡음이 존재함을 고려해야하므로 simulink 내에서 잡음 신호가 매우 큰 펄스폭을 가진 펄스 신호라고 가정하여 설계하였다. 가우시안 랜덤변수를 펄스 내부에서 발생시켜 표적을 맞고 되돌아오는 echo신호의 pulse를 커버 할 수 있도록 설계하였다. 그림 11은 range gate블록 내부에 설계하여 sig_volt_mag을 통해서 잡음 신호의 진폭을 입

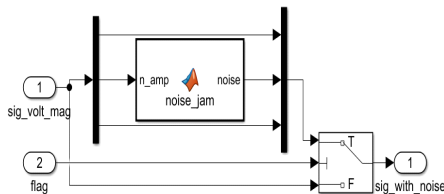


그림 10. Noise 재밍 블록

Fig. 10. Simulink block diagram of noise jamming.

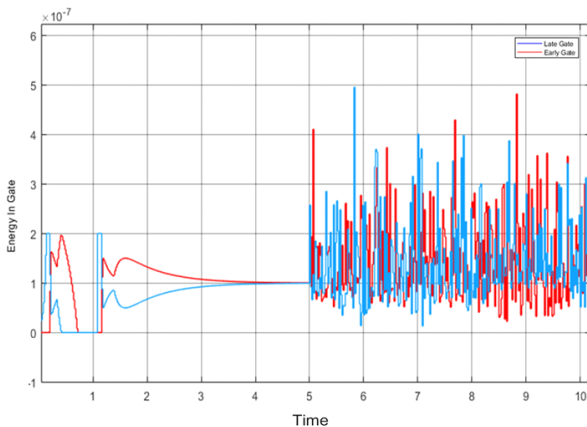


그림 11. 분할 게이트 내부 noise jamming으로 인한 잡음
Fig. 11. Noise due to noise jamming inside the split gate.

력받으면 보이는 MATLAB function 블록에서 그에 따른 잡음 신호를 발생시킨다. Flag는 range gate 내부에 초기 게이트와 후기 게이트에서 모든 범위에서 펄스가 감지되면 잡음재밍이 발생하였다고 판단하는 블록이다. 이 flag 신호를 통해서 잡음재밍이 활성화 된다.

그림 11은 range 분할 게이트 내부의 신호를 나타낸 것이다. 빨간색 신호는 초기 게이트 내부의 신호 에너지이고, 파란색 신호는 후기 게이트 내부의 신호 에너지이다. 5 s까지는 두 게이트의 신호 에너지가 동일하게 되어 정상적으로 목표물을 추적하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 5 s부터 잡음재밍이 발생하게 되면 게이트 내부는 echo 신호와 잡음 신호 동시에 존재하게 되어 게이트가 정상적으로 펄스를 추적하지 못하게 하는 결과를 도출하게 된다.

3-2-2 RGPO 설계

그림 12는 설계한 시뮬레이터의 RGPO pull-off cycle을 보여준다. 해당 설정값은 dwell time 1 s, acceleration 15 m/s², 150 m/s, initial range 0 m, final pull-off range 250 m, final dwell time 0 s로 설정하였다. 위 그림에서 Y축은 Pull-off된 기만 펄스의 시간상 위치를 의미한다. Y축에 c/2를 곱하면 m단위의 Pull-off 거리를 계산할 수 있다. 해당 결과에서 RGPO cycle은 6.774 s로 나타난다. 이러한 결과를 통해 기만 펄스는 설정한 주기를 가지고 pull-off를 반복한다.

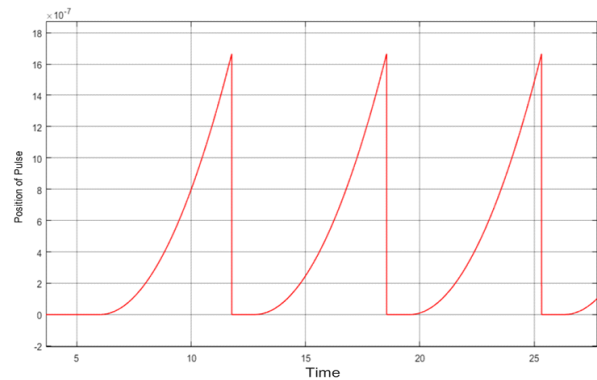


그림 12. RGPO pull-off 거리

Fig. 12. Pull-off distance of RGPO.

3-2-3 VGPO 설계

그림 13은 VGPO의 simulink 블록 다이어그램을 나타낸다. VGPO 설계의 경우, VGPO가 실제로 주파수를 Pull-off하는 시간인 velocity walk time을 VWT, 초기 실제 표적의 리턴신호의 주파수를 그대로 내보내는 Velocity Dwell time을 VDT, 실제 주파수 f_{true} 를 입력으로 받아 pull-off 되는 주파수를 출력으로 내보내게 된다. 그림 14의 파란 선은 실제 목표물과 미사일 사이의 상대 속도를 나타내며 붉은색 선은 미사일에서 추정된 상대 시선 속도이다. 그림 14의 그래프에서 붉은색 선 보면 VGPO로 인해 시선 속도의 true 값과 다르게 추정 시선 속도가 변화한다. 이는 Pull-off된 기만 도플러 주파수로 인해 속도를 추정하였기 때문이다. 이때 VWT는 2초, VDT는 8초로 설정되어 실행되었다.

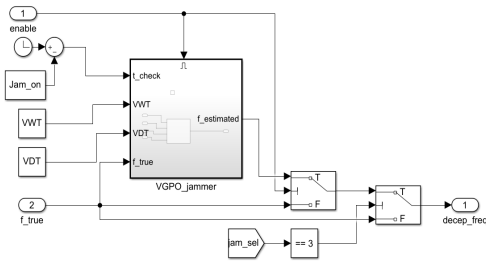


그림 13. VGPO Simulink 블록
Fig. 13. Simulink block diagram of VGPO.

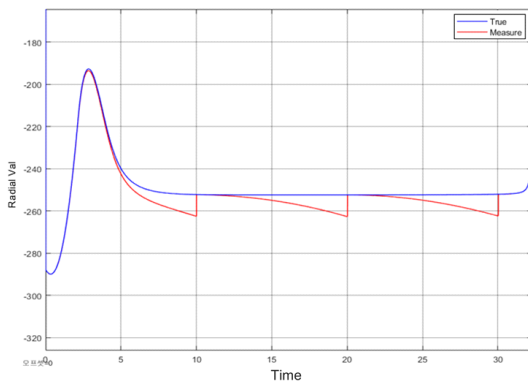


그림 14. VGPO의 Pull-off 속도
Fig. 14. Pull-off velocity of VGPO.

3-2-4 Cross-eye 설계

Cross-eye jamming의 경우 2-4절에서 언급 하였듯이 두 재머 안테나를 L만큼 떨어지게 배치함으로써 레이더를 기만하게 된다. 그림 15은 두 재머 안테나를 simulink로 설계한 블록다이어그램이며, 이때 출력으로 진폭비 a 와 위상차 ϕ 를 갖는 두 재밍 신호를 내보내게 된다. 이 때 a 와 ϕ 는 사용자 입력 파라미터로 값을 입력할 수 있다. 그림 16은 cross-eye jamming이 적용되었을 때 모노펄스 수신기의 추적각도오차를 나타내는 그림이다. 모노펄스 레이더의 합 신호와 차 신호 값을 변경시켜 각도추적을 제대로 수행하지 못하도록 방해한다.

IV. 결 과

본 장에서는 noise jamming, 거리기만, 속도기만, 각도

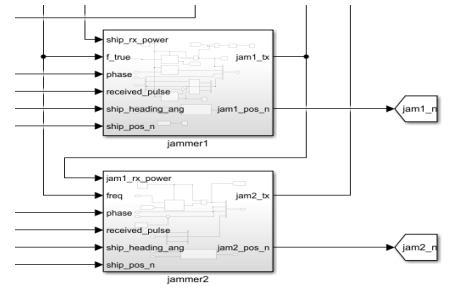


그림 15. Cross-eye jammer simulink 블록
Fig. 15. Simulink block diagram of cross-eye jamming.

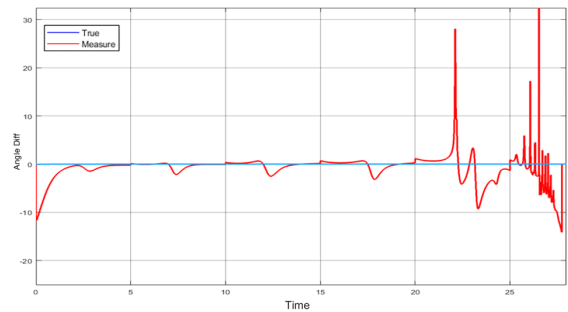


그림 16. Cross-eye 재밍이 적용된 모노펄스 수신기의 추적각도 오차
Fig. 16. Track angle error of monopulse receiver with cross-eye jamming applied.

기만, 각 재밍 기법에 따른 효과도 분석을 진행한다. RGPO, VGPO, Cross-eye는 상용프로그램과의 miss distance 차이를 확인하여 검증을 실시한다.

시뮬레이션의 Initial condition은 표 1과 같다. Noise jamming과 RGPO, VGPO, Cross-eye 모두 표 1의 환경에서 시뮬레이션이 진행되었다.

그림 17 및 그림 18은 noise jamming의 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 그림 17의 검은 직선은 함정의 이동궤적을, 파란선은 미사일의 궤적을 나타낸다. 그림 18의 빨간 선은 noise jamming을 적용 하였을 때 계산되는 추정거리 오차를 나타낸다. 그림 18 결과에서, 재밍을 사용하지 않았을 경우와 비교하여 최대 추정 거리 오차가 790 m까지 발생한 것을 확인하였다. 또한 그림 17의 결과로 miss distance가 52.23 m까지 증가한 결과를 볼 수 있다. 하지만

표 1. Simulation의 초기 설정값

Table 1. Initial condition of simulation.

Parameters	Value
Missile speed	290 [m/s]
Platform speed	15 [m/s]
Missile position	(0,0,10)
Platform position	(8,000, 0, 10)
Missile heading angle	15°
Platform heading angle	-90°

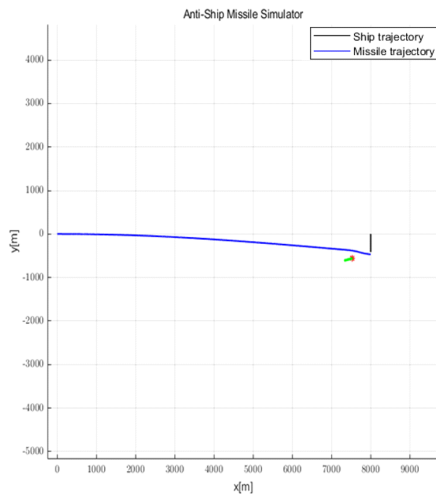


그림 17. 잡음재밍 결과

Fig. 17. Result of noise jamming.

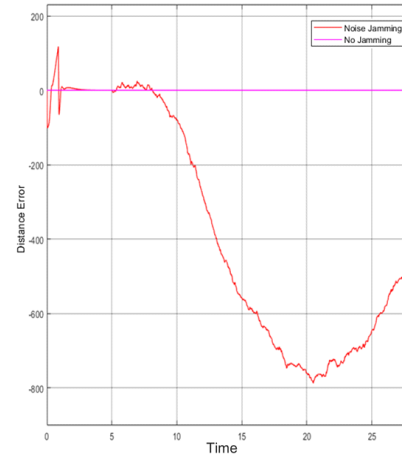


그림 18. 잡음재밍 결과(거리 추정 오차)

Fig. 18. Result of noise jamming (distance error).

여전히 매우 큰 추정 거리오차에도 불구하고 miss distance는 그에 상응하게 증가하지 않는다. 이는 거리 게이트 내부에 잡음영향을 지속적으로 적용하였기에 시선 방향으로 거리 추정 오차만 발생하도록 모델링 되었기 때문이다. 즉 각도 추정에는 잡음에 의한 각도 오차는 고려되지 않는다. 또한 유도 제어에서 각도 추정값과 거리 추정값을 모두 이용하여 칼만필터에서 유도 제어에 필요한 상대 운동벡터를 계산하기 때문에 본 시뮬레이터 상에서 해당 상대 거리 오차는 추적 능력에 크게 영향을 끼치지 않는 것으로 사료된다.

그림 19 및 그림 20은 거리기만재밍 방식인 RGPO 재밍 기법, 그림 21 및 그림 22는 속도기만재밍 방식인 VGPO 재밍 기법, 그림 23 및 그림 24는 각도기만재밍 방식인 cross-eye 재밍 기법을 적용한 상황을 각각 비교한 것이다. 그림들을 비교해보면 모두 유사한 양상을 가지는 것을 확인 할 수 있다. 그림 19, 그림 21 및 그림 23은 각 재밍 기법의 미사일의 궤도이고 그림 20, 그림 22 및 그림 24는 각 시뮬레이션 마지막 상황을 확대하여 최종적으로 미사일과 함정의 거리를 확인 할 수 있다. RGPO의 경우 상용 프로그램의 miss distance가 15.16 m, 개발 프로그램의 miss distance가 13.55 m가 나오는 것을 확인하였다. VGPO의 경우 미사일의 속도에 비하여 Platform의 속도가 현저히 느리기 때문에 효과가 없어 상용프로그램의 경우 miss distance가 3.76 m, 개발 프로그램의 miss distance는

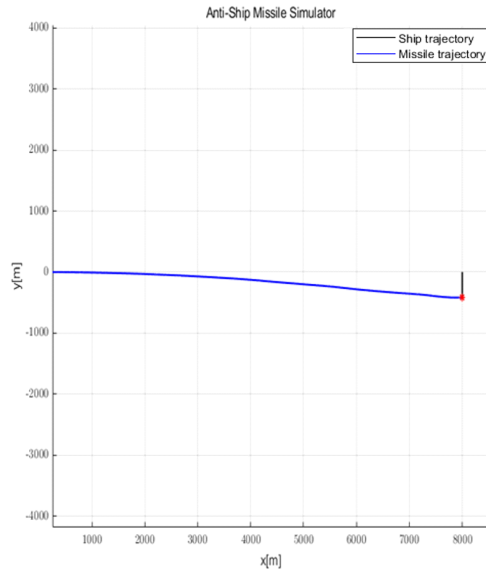


그림 19. RGPO 재밍 결과
Fig. 19. Result of RGPO.

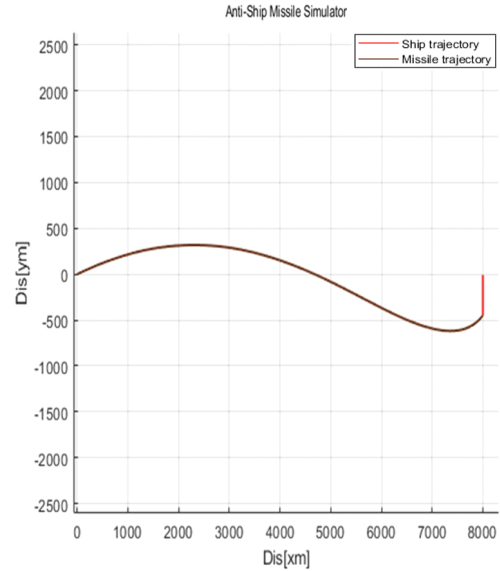


그림 21. VGPO 재밍 결과
Fig. 21. Result of VGPO.

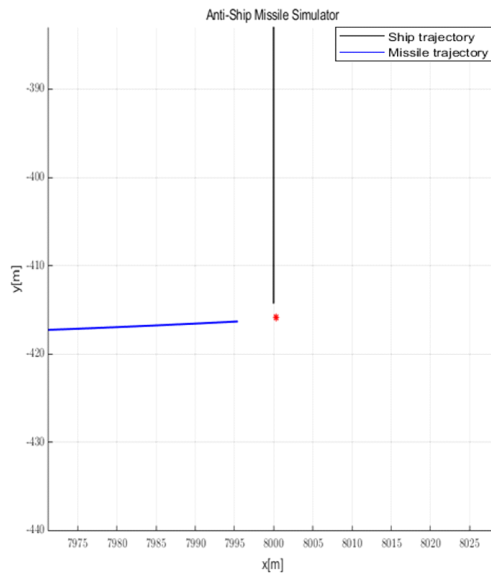


그림 20. RGPO 재밍 결과(확대)
Fig. 20. Result of RGPO (detail view).

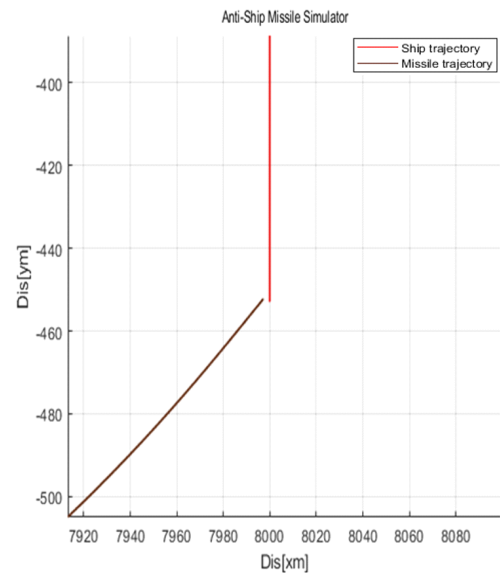


그림 22. VGPO 재밍 결과(확대)
Fig. 22. Result of VGPO (detail view).

3.8 m로 효과가 없음을 확인 할 수 있다. Cross-eye의 경우 상용 프로그램의 miss distance가 23.4 m, 개발 프로그램의 miss distance가 21.922 m로 비슷한 양상을 확인함으로써 검증을 진행 할 수 있었다.

V. 결 론

본 논문은 대함 능동 유도 미사일에 대하여 잡음재밍, 거리기만재밍, 속도기만재밍, 각도기만재밍 기법에 대해

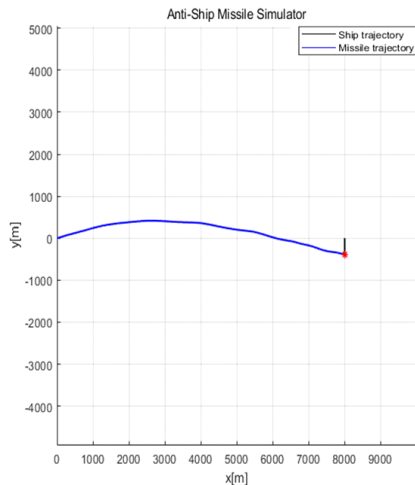


그림 23. Cross-eye 재밍 결과
Fig. 23. Result of cross-eye.

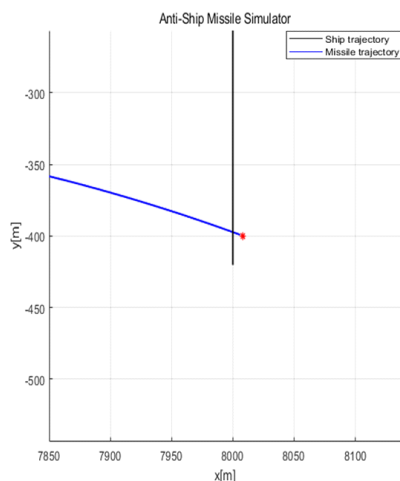


그림 24. Cross-eye 재밍 결과(확대)
Fig. 24. Result of cross-eye (detail view).

여 *simulink*로 구현하고 재밍 효과도를 분석하였다. 잡음 재밍 기법은 에코신호를 *noise*로 덮어 제대로 된 추적이 불가하게 만들고, 거리기만재밍 기법은 *RGPO*, 속도기만재밍 기법은 *VGPO*, 각도기만재밍 기법은 *cross-eye*를 사용하였다. 각 재밍 기법이 존재하는 환경에서 능동 유도 미사일이 목표물을 타격하는 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션 결과로 *RGPO*, *VGPO*, *cross-eye*는 미사일의

궤적이 유사한 양상을 보이는 것을 확인할 수 있고, 타격 오차에 대한 지표인 *miss distance*에 대한 차이를 확인할 수 있다. *RGPO*와 *cross-eye*는 10 m 이상, *VGPO*는 3 m 이상 *miss distance*가 나옴을 확인하였다. 배의 속도가 느리기 때문에, 대함 능동 유도 미사일의 경우는 *VGPO*에 대한 효용성이 떨어지며, 배의 사이즈가 크기 때문에, 배에 대한 반사 단면적을 수신하지 못하도록 하는 잡음재밍이 가장 우수한 성능을 가짐을 확인할 수 있다.

References

- [1] S. M. Shermanm D. K. Barton, *Monopulse Principles and Technique*, Oxford, Artrch House, 2011.
- [2] Naval Air Warfare Center(NAWC), *Electronic Warfare and Radar Systems Engineering Handbook*, 2nd ed. Pont Mugu, CA, Electronic Warfare Division, Apr. 1999.
- [3] L. Falk, "Cross-eye jamming of monopulse radar," in *2007 International Waverom Diversity and Design Conference*, Pisa, Jun. 2007, pp. 209-213.
- [4] B. J. Kim, "A study on the jamming effect analysis of anti-ship missile," M.S. thesis, Sejong University, Sejong, Korea, 2019.
- [5] W. S. Ra, I. H. Whang, "A robust horizontal LOS rate estimator for 2-axes gimbaled seeker," *Proceedings of the 41st IEEE Conference on Decision and Control 2002*, Las Vegas, NV, Dec. 2002, pp. 2884-2889.
- [6] D. J. An, J. H. Lee, "Performance analysis of amplitude comparison monopulse direction-of-arrival estimation." *Applied Sciences*, vol. 10, no. 4, p. 1246, Feb. 2020.
- [7] B. R. Mahafza, *Radar Systems Analysis and Design Using MATLAB*, 3rd ed. Boca Raton, FL, Chapman and Hall, 2013.
- [8] R. S. Hughes, *Analog Automatic Control Loops in Radar and EW*, Norwood, MA, Artech House, pp. 175-212, 1988.

김 제 안 [LIG 넥스원/연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-2647-8515>



2021년 2월: 세종대학교 전자정보통신공학과 (공학사)
2022년 8월: 세종대학교 정보통신공학과 (공학석사)
2022년 10월~현재: LIG 넥스원 전자전 연구소 연구원
[주 관심분야] 레이더 신호처리, 전자전

ES 시스템

안 민 기 [LIG 넥스원/연구원]

<https://orcid.org/0009-0006-4878-9188>



2023년 2월: 세종대학교 데이터사이언스학과 (공학사)
2024년 1월~현재: LIG 넥스원 전자전 연구소 연구원
[주 관심분야] 전자전 ES 시스템

김 기 인 [LIG 넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0009-0006-0602-5876>



2012년 8월: 아주대학교 전자공학과(공학사)
2023년 2월: 광주과학기술원 기전공학부 (공학박사)
2023년 6월~현재: LIG 넥스원 전자전 연구소 선임연구원
[주 관심분야] RF, 전자전 ES 시스템

이 준 호 [세종대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-3715-3943>



1994년 2월: 포항공과대학 전자전기공학과 (공학사)
1996년 2월: 포항공과대학 전자전기공학과 (공학석사)
1999년 2월: 포항공과대학 전자전기공학과 (공학박사)
2004년 3월~현재: 세종대학교 정보통신

학과 교수

[주 관심분야] Signal Processing (Radar Signal Processing, Array Signal Processing), Smart Antenna