

항공기 AESA 레이더 운용 환경에서의 잡음 및 기만 재밍 효과도 시뮬레이션 및 분석

Simulation and Analysis of Deception and Noise Jamming Effectiveness in the Operating Environments of Aircraft ASEA Radar Systems

이건 · 김효정 · 성진용* · 변우주* · 김준혁* · 김경태

Geon Lee · Hyo-Jeong Kim · Jin-Yong Sung* · U-Ju Byoun* · Jun-Hyeok Kim* · Kyung-Tae Kim

요 약

항공기용 AESA 레이더는 항공기를 향해 고속으로 접근하는 표적을 효율적이고 신속하게 탐지하고 추적하기 위하여 여러 운용 모드를 사용한다. 이때, 전자전 공격에 대비하여 운용 모드마다 다양한 형태의 레이더 신호와 중심 주파수, PRF 등을 사용하게 되며, 이에 따라 운용 모드에 따른 재밍 효과가 달라진다. 본 논문에서는 실제 항공기 AESA 레이더 운용 환경과 잡음 및 기만 재밍을 위한 재머를 설계하고, 표적 접근 시나리오에서 재밍 효과도 분석을 수행한다. 이를 위하여 AESA 레이더를 설계하여 빔폭 및 수신 신호 세기를 설정하고, 항공기가 접근함에 따라 NAST, AAST, ACM의 운용 모드를 설정하여 각 모드마다 레이더 신호 및 재밍 신호를 생성하고 재밍 효과도 분석을 수행하였다.

Abstract

AESA radar used in aircraft operates in various modes to efficiently and quickly detect and track targets approaching the aircraft at high speed. To prepare for electronic warfare attacks, different radar signals, central frequencies, and multiple PRFs were used for each operating mode. In this study, we designed a jammer for noise and deception jamming in an aircraft AESA radar operational environment and analyzed its effectiveness in target approach scenarios. For this purpose, an AESA radar was designed to set the beam width and received signal strength. As the aircraft approached, the operating modes of NAST, AAST, and ACM were set, and the radar and jamming signals for each mode were generated and analyzed.

Key words: Airborne AESA Radar, Electronic Warfare, Air to Air

I. 서 론

항공기에 사용되는 레이더는 항공기의 전방에서 접근

및 퇴각하는 표적에 대해 탐지/추적을 수행한다. 이때, 탐지 및 추적에 대응하기 위하여 자신의 위치를 숨기거나, 기만하는 전자전에 대한 연구들이 수행되고 있다. 그러

「이 논문은 2022년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(KRIT-CT-22-057).」

포항공과대학교 전자전기공학과(Department of Electrical Engineering, Pohang University of Science and Technology)

*LIG넥스원(주)(LIG Nex1 Co., Ltd)

· Manuscript received July 30, 2024 ; Revised August 17, 2024 ; Accepted September 19, 2024. (ID No. 20240730-075)

· Corresponding Author: Kyung-Tae Kim (e-mail: kkt@postech.ac.kr)

나, 항공기 레이더 역시 이러한 전자전에 대비하여 각 운용 모드마다 중심 주파수 및 대역폭을 변경하거나, 다수의 펄스 반복 주파수(PRF: pulse repetition frequency)를 운용하여 전자전에 의한 영향을 감소시킨다. 이러한 전자전 방어를 회피하고 전자전 효과를 분석하는 것은 신규 재밍 기법 연구나 전자전 방어책과 시스템 설계에 중요한 역할을 수행한다. 이러한 측면에서 재밍 효과도를 분석하기 위해, 재밍 대상이 되는 항공기용 ASEA 수신기 모델링을 수행하고, 각 운용 단계별로 다양한 파형의 레이더 신호를 생성할 필요가 있다.

본 논문에서는, 항공기에 사용되는 AESA 레이더의 공대공 운용 모드에서 고속 표적이 접근하는 시나리오를 가정하여 표적의 접근에 따른 공대공 운용 모드를 NAST (nose aspect search & track), AAST(all aspect search & track), ACM(air combat mode) 3개 모드로 나누었으며, 각 모드마다 AESA 레이더의 탐색 및 추적 빔 형태를 변경하여 표적이 해당 레이더에 대해 재밍을 수행할 때 재밍 기법의 효과도를 분석할 수 있는 시뮬레이터를 설계한다.

II. 항공기용 AESA 레이더 공대공 운용 모드

항공기에 사용되는 레이더는 항공기의 전방에서 접근 및 퇴각하는 표적에 대해 탐지/추적을 수행하며, 효과적인 탐색을 위해 그림 1과 같이 탐색 범위에 따라 크게 NAST, AAST, ACM 3개 운용 모드로 나누어서 탐색을 수행한다^[1].

2-1 NAST 운용 모드

NAST 운용 모드는 비가시거리 표적에 대한 탐색 및 추적을 수행하며, 전방에서 고속으로 접근하는 표적에 대

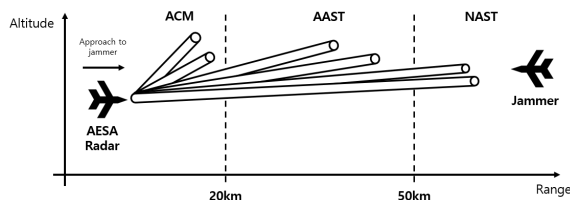


그림 1. 거리에 따른 운용 모드
Fig. 1. Operation mode based on distance.

한 탐지 및 추적을 수행하므로, HRRP 파형을 사용하여 좁은 범위에 대한 탐색을 수행한다. NAST 모드는 Search, Confirm, Acquisition 단계로 나누어 빔이 운용되며, Search 단계는 도플러 필터를 통해 표적 유무를 확인하고, 표적의 존재가 확인되면 Confirm 단계에서 해당 지점에 빔을 재방사하여 표적의 거리 및 속도 정보를 추출한다^[2]. 해당 단계에서 여러 종류의 빔을 방사하여 표적 탐지에 신뢰성을 높이며, Confirm 단계에서 표적이 탐지된다면 Acquisition 단계로 넘어가 표적의 거리, 각도, 속도 정보를 추출하여 표적에 대한 추적을 수행하도록 한다(그림 2 및 그림 3)^[2].

Search 단계에서는 고속으로 접근하는 표적의 탐지를 우선시하기 때문에, 사전에 설정된 변조율에 따른 주파수

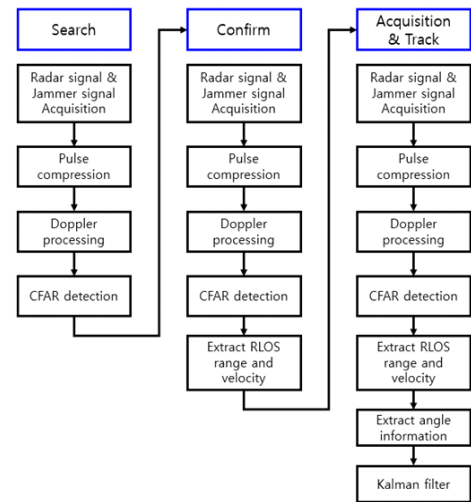


그림 2. NAST 모드 순서도
Fig. 2. Flowchart of NAST mode.

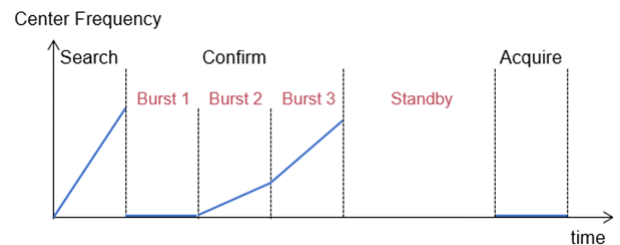


그림 3. NAST 운용 모드에 따른 중심주파수 변화
Fig. 3. Changes of center frequency based on NAST operation mode.

변조(FM: frequency modulation) HPRF 파형을 운용하며, 전방의 좁은 범위를 탐색하면서 도플러 탐지를 수행한다. Confirm 단계에서는, Search 단계에서 탐지한 결과가 실제 표적인지 확인을 위해 해당 지점에 빔을 재방사하며, 전자전에 대비하고 탐지에 대한 신뢰성을 확보하기 위해 3개의 버스트를 순차적으로 방사한다. 이때, 사용하는 빔의 파형은 그림 3과 같이 첫 번째 버스트는 chirp 파형을, 두 번째와 세 번째 버스트는 계단 주파수 변조 파형(steped frequency-modulated waveform)을 사용하며, 첫 번째 버스트를 활용하여 도플러 정보를 획득하고, 최대 비모호 거리를 증가시키기 위하여 두 번째 버스트와 세 번째 버스트에 대해 FM ranging 기법을 적용한다.

그림 4는 FM ranging 기법을 사용하여 표적의 거리를 추정하는 것을 도식화한 것이다^[3]. 표적의 거리 및 속도에 따라 획득한 수신 신호와 송신 신호 간에 주파수 차이, Δf 가 발생하게 되며, 이를 활용하여 거리 모호성을 해소한다.

$$\begin{cases} \Delta f_2 = k_2 t_r - f_{d2} \\ \Delta f_3 = k_3 t_r - f_{d3} \end{cases} \quad (1)$$

식 (1)에서 k_2, k_3 는 각각 두 번째, 세 번째 버스트의 FM rate를 의미하며, t_r 은 표적 신호의 수신 시간을, f_{d2}, f_{d3} 는 각각 두 번째, 세 번째 버스트의 표적 속도에 의한 주파수 편이를 의미한다.

$$f_d = \frac{f_0 v}{c} \quad (2)$$

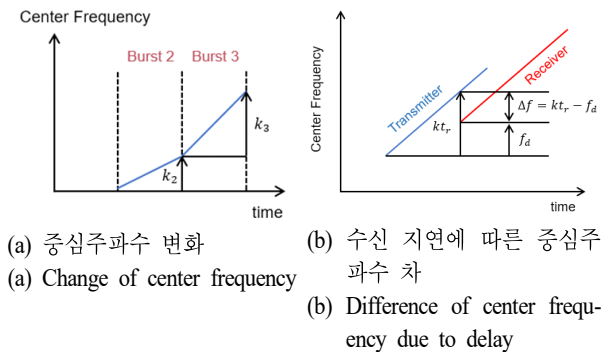


그림 4. FM ranging 도식도
Fig. 4. FM ranging diagram.

식 (2)는 표적 속도에 의한 주파수 편이(f_d)와 표적 속도(v) 및 레이더 신호의 중심주파수(f_0)의 관계를 나타낸다. c 는 전파 속도를 의미한다. 식 (1) 및 식 (2)를 활용하여 표적에 대한 거리 모호성을 해소할 수 있다.

Confirm 단계에서 획득한 표적 정보를 바탕으로, 해당 대상이 적대적 대상임을 확인한다면, Acquisition 단계를 수행하게 된다. Acquisition 단계에서는 표적에 대한 거리 모호성을 해소하고, 획득한 거리, 각도, 속도 정보를 이용하여 표적에 대한 추적을 수행한다. 이때, 표적에 대한 거리 모호성 해소를 수행하는데 FM ranging 기법에 비해 복잡한 구조를 지니지만 모호성 해소 신뢰성이 우수하고 다중 표적이 존재하는 환경에서도 수행할 수 있는 staggered PRF 기법에 기반한 모호성 해소를 수행한다.

그림 5는 PRF의 변화에 따른 탐지되는 표적 위치와 실제 표적 위치를 보여준다. PRF의 차이에 따라 탐지되는 표적의 위치가 변화하며, 이를 이용하여 최대 비모호 거리를 증가시킬 수 있다^[3].

$$T_d = MT_1 + t_1 = MT_2 + t_2, \quad M = 1, 2, 3... \quad (3)$$

$$M = \begin{cases} \frac{t_2 - t_1}{T_1 - T_2} & t_1 < t_2 \\ \frac{(t_2 - t_1) + T_2}{T_1 - T_2} & t_1 > t_2 \end{cases} \quad (4)$$

식 (3) 및 식 (4)는 실제 표적의 수신 지연 시간, T_r 이 PRF에 의해 결정되는 거리 모호성에 의해 나타나는 수신 지연 시간 t_1, t_2 과의 관계를 보여준다. T_1, T_2 는 각각 두 신호의 펄스 반복 주기(PRI: pulse repetition interval)를 의미한다.

거리 모호성을 해소한 이후, 모노펄스 각도 추정 기법

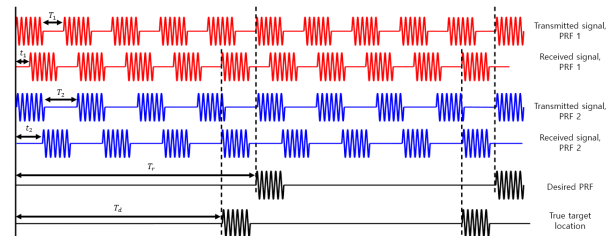


그림 5. Staggered PRF를 이용한 모호성 해소
Fig. 5. Ambiguity resolution using staggered PRF.

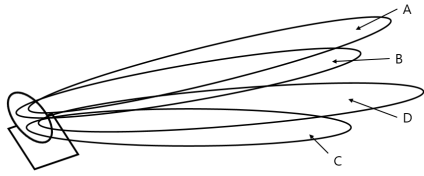


그림 6. 크기 비교 모노펄스

Fig. 6. Amplitude comparison monopulse.

을 사용하여 표적에 대한 각도 추정을 수행한다. 모노펄스 각도 추정 기법은 대표적으로 크기 정보를 사용하는 크기 비교 모노펄스와 위상 정보를 사용하는 위상 비교 모노펄스 기법이 존재하며, 본 논문에서는 실제 운용 환경을 고려하여 위상 오염에 대한 영향이 적은 크기 비교 모노펄스 기법을 적용하여 시뮬레이터를 설계한다.

그림 6은 크기 비교 모노펄스 기법의 도식도를 보여준다. 각각의 송신 빔들은 서로 다른 방향으로 동일한 스쿼트 각도(squint angle)만큼 기울어져 있어, 표적이 레이더의 가시선(RLOS: radar line of sight) 방향에서 벗어나 있다면 반사신호의 진폭 차이가 발생하며, 이를 이용하여 표적의 각도 정보를 획득한다. 가장 먼저, 위상 기준을 설정하기 위해 각 수신 채널의 신호들을 전부 더하는 합 패턴, $(A+B)+(C+D)$ 을 형성한다. 방위각 및 고각 추정을 위해 차 패턴을 획득하며, 방위각 방향의 차 패턴은 $(A+B)-(C+D)$, 고각 방향의 차 패턴은 $(A+D)-(B+C)$ 로 획득한다. 형성된 합 패턴과 차 패턴의 비와 추정 각도는 선형관계를 만족하며, 사전에 계산한 빔패턴 및 스쿼트 각도의 선형 관계에 대한 기울기 정보를 이용하여 각도를 추정한다. 표적의 각도를 추정한 이후 칼만 필터를 사용하여 표적 추적을 수행한다.

2-2 AAST 운용 모드

AAST 운용 모드는 NAST 운용 모드와 비교하여 최대 탐지 거리가 상대적으로 짧은 반면, 넓은 영역을 빠른 속도로 탐색한다^[1]. AAST 운용 모드는 NAST 운용 모드와 비교하여 상대적으로 신속한 빔의 운용을 요구하며, 이에 따라 운용 단계가 축소된 search와 acquisition & track 단계로 구성된다.

공대공 운용 모드의 Search 단계에서는 고속 표적 탐지

를 목적으로 하여 도플러 신호에 대한 탐지를 수행하며, 신뢰성 있는 탐지 결과를 제공하기 위하여 서로 다른 PRF를 가지는 다수의 chirp 형태의 버스트를 송수신하여 특정 횟수 이상 탐지된다면 표적이 탐지된 것으로 선언한다. Search 단계에서 표적이 탐지된 이후, 이전의 NAST 운용 모드와 마찬가지로 표적에 대한 구체적인 정보를 획득하고 추적을 수행하는 acquisition & track 단계를 수행한다. 거리 모호성을 해소하기 위하여 staggered PRF 기법을 사용하고, 각도 추정을 위해 진폭 비교 모노펄스 기법을 사용한 후, 칼만 필터를 사용하여 표적에 대한 추적을 수행하도록 한다.

2-3 ACM 운용 모드

ACM 운용 모드는 근접한 표적에 대한 탐지 및 추적을 수행하며, AAST 운용 모드와 비교하여 방위 방향으로 좁은 범위, 고각 방향으로 넓은 범위를 탐색한다^[1]. 신속한 표적 탐지를 위해 하나의 버스트에 방사하는 펄스의 수가 가장 적으며, 운용 모드 내의 단계도 Search, track의 2개 단계로 구성된다.

Search 단계는 앞서 AAST 운용 모드와 마찬가지로 다수의 각각 다른 PRF를 가지는 chirp 형태의 신호를 송수신하여 획득한 신호를 가공하여 도플러축에서 탐지를 수행한다. 특정 개수 이상의 신호에서 표적이 탐지되면 표적이 탐지된 것으로 결정하며 Track 단계를 수행한다. Track 단계 또한 AAST 운용 모드와 마찬가지로 staggered PRF에 기반한 거리 모호성 해소 기법을 적용하였으며 크기 비교 모노펄스 기법을 사용하여 표적의 각도 정보를 추출한 후 칼만 필터 기반의 표적 추적을 수행하도록 한다.

III. 재밍 효과도 분석을 위한 재밍 신호 설계

공대공 교전 환경에서 다양한 재밍 기법을 활용한 전자 공격책(EA: electronic attack)은 상대방의 레이더를 교란하여 자신의 위치를 숨기거나, 잘못된 정보를 획득하도록 한다^[5]. 하지만 다양한 레이더 운용 환경과 레이더와 재머 간의 거리에 따라 재밍 성능이 크게 달라지게 되며, 그에 따라 다양한 운용 모드가 존재하는 항공기용 공대공 AESA 레이더에 대한 재밍 효과 또한 운용 모드마다

크게 달라진다. 해당 문단에서는 운용 모드에 따른 재밍 효과도 분석을 위한 재밍 신호 설계를 수행하며, 잡음 재밍과 기만 재밍 기법을 구현하였다.

3-1 잡음 재밍

잡음 재밍은 레이더 신호가 반사되어 수신될 때 잡음을 가하여 표적 탐지 단계에서 정보 획득을 방해하는 목적으로 사용된다. 일반적으로 신호의 주파수 대역폭에 잡음 변조를 수행하며, 크게 광대역 주파수 대역폭에 걸쳐 잡음 신호를 발생시키는 광대역 잡음 재밍(barrage noise jamming) 기법과 특정한 주파수 대역폭 안에서 잡음 신호의 중심주파수를 스위프(sweep)하여 잡음 신호를 발생시키는 기법이 존재한다^{[2],[4],[5]}.

그림 7은 광대역 잡음 재밍 기법을 보여준다. 넓은 주파수 범위에 걸쳐 재밍을 수행하기 때문에, 송신 신호에 대한 정보가 없어도 재밍을 수행할 수 있지만, 재밍 자체의 출력 문제로 인하여 출력할 수 있는 잡음의 전력에 한계가 존재하며, 이로 인해 재밍 효과가 떨어지는 단점이 존재한다. 반면, 그림 8은 점 소인 잡음 재밍 기법을 보여준다. 특정한 주파수 범위 내에서 중심 주파수를 스위프하며 잡음 신호를 발생시키며, 재밍을 수행하고자 하는 대

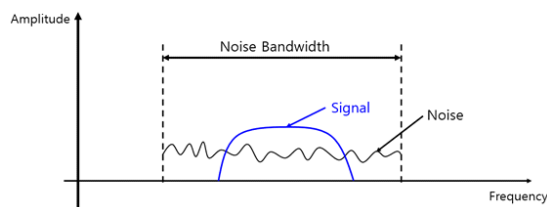


그림 7. 광대역 잡음 재밍
Fig. 7. Barrage noise jamming.

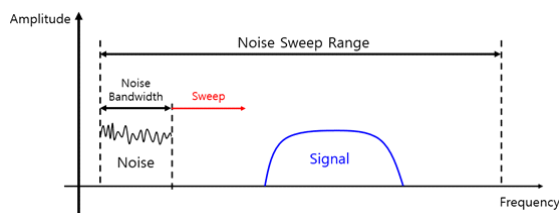


그림 8. 점 소인 잡음 재밍
Fig. 8. Sweep spot noise jamming.

상의 운용 주파수 대역폭에 대해 재밍을 수행한다면 높은 효율의 재밍 효과를 얻을 수 있지만, 재밍 신호의 중심 주파수와 재밍 대상의 중심주파수는 시간에 따라 변화하기 때문에 재밍이 활성화되는 주기가 100 %에 이르지 못하는 단점이 존재한다.

3-2 기만 재밍

기만 재밍은 레이더가 수신 신호를 처리하는 과정에서 표적의 위치, 방향 또는 속도에 대한 정보를 실제와 다른 정보로 추정하도록 기만하는 기법이다^{[4],[5]}. 본 논문에서는 대표적인 기만 재밍 기법 중 하나인 거리 정보를 기만하는 RGPO 재밍 기법에 대해 시뮬레이션을 수행하였다.

그림 9는 RGPO 재밍의 수행 과정을 보여주며, 초기에는 표적의 정확한 위치가 표기되지만, 시간이 흐름에 따라 표적의 거리 정보가 왜곡되는 것을 보여준다. 표적의 거리 정보를 왜곡하는 대표적인 방법에는 L , J , S 3개가 있다.

그림 10은 RGPO 재밍 기법의 대표적인 기만 기법을 보여준다. 먼저 L 타입의 경우, 일정한 속도 v 로 펄스를 지연시키는 방법이며, 식 (5)와 같이 t 시점에서의 지연

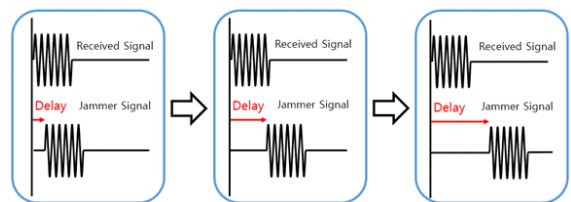


그림 9. RGPO 재밍
Fig. 9. RGPO jamming.

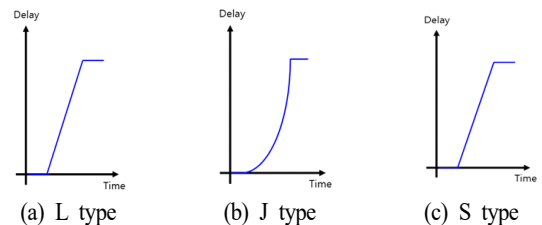


그림 10. RGPO 재밍 기법 종류
Fig. 10. Type of RGPO jamming techniques.

거리를 결정한다.

$$r = vt \quad (5)$$

J 타입의 경우, 초기속도 v 와 가속도 a_1 를 사용하여 t 시점에서의 지연거리 r 을 결정한다.

$$r = \frac{1}{2}a_1t^2 + vt \quad (6)$$

마지막으로, S 타입은 초기속도 v , 가속도 a_1 , 감속도 a_2 를 적용하여 t 시점에서의 지연거리 r 을 결정한다.

$$r = \begin{cases} \frac{1}{2}a_1t^2 + vt & t < \tau \\ \frac{1}{2}a_2\tau^2 + v(a_1 - a_2)\tau - \frac{1}{2}a_2\tau^2 - v(a_1 - a_2)\tau^2 + s_0 & \tau \leq t \end{cases} \quad (7)$$

식 (7)을 이용하여 탐지 정보를 왜곡하여 이후 추적 게이트 형성 시, 추적 게이트 형성 단계에서 잘못된 지점을 추적하도록 유도한다.

IV. 시뮬레이션 및 성능 분석

본 문단에서는 앞서 설계한 항공기 탑재 AESA 레이더 운용 시나리오 및 재머를 이용하여 시뮬레이션을 구성하고, 재밍 효과도 분석을 수행한다. 재밍 효과도 분석을 위해 재밍 대상이 되는 AESA 레이더를 탑재한 항공기가 재머를 향해 600 m/s로 접근하는 시나리오를 구성한다. 재머는 일반적인 항공기의 레이더 반사 면적(RCS: radar cross section)과 동일한 크기를 가진 점 표적으로 모델링하며, 재머와의 거리가 50 km를 초과할 경우 NAST 모드로, 20~50 km 거리에서는 AAST 모드로, 20 km 내에서는 ACM 모드로 동작하도록 운용 시나리오를 구성하였다. AESA 레이더는 30×30 평면 배열 안테나를 가정하였으며, 이에 따른 2차원 빔 패턴은 그림 11과 같다.

각 운용 모드마다 고각 및 방위각 방향으로 탐색을 수행하는 범위가 달라지며, 한 번의 탐색 주기 동안 그림 12와 같이 탐색 빔을 범위 내에서 순차적으로 방사한다.

표 1은 NAST, AAST 및 ACM 운용 모드에서 탐색 범위를 설정한 것이다. NAST 운용 모드는 항공기 전면에서 고속으로 접근하는 표적을 탐지하기 위해 상대적으로 좁은 범위를 탐색하며, AAST 운용 모드는 방위 방향으로

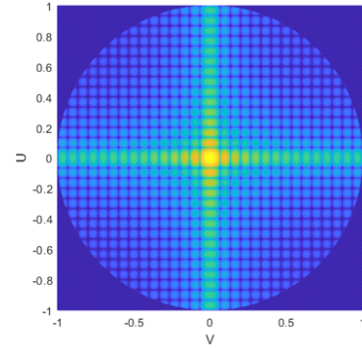


그림 11. 2차원 송신 빔 패턴

Fig. 11. 2D beam pattern.

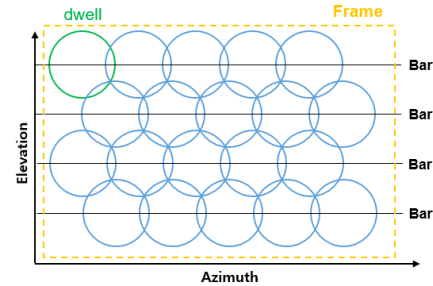


그림 12. 탐색 빔 방사 패턴

Fig. 12. Radiation pattern of search beam.

표 1. 운용 모드 별 탐색 범위

Table 1. Search range for each operation mode.

	Azimuth search range (°)	Elevation search range (°)	Number of Bar	Number of dwell
NAST	-10~10	-1.5~1.5	1	6
AAST	-15~15	-3~3	2	8
ACM	-15~15	-6~6	4	10

더 넓은 범위를, 근접 교전을 위한 ACM 운용 모드는 방위각, 고각 방향의 광범위 탐색을 목적으로 한다.

시뮬레이션의 시나리오는 그림 1의 AESA 레이더가 재머를 향해 접근하는 시나리오를 사용하였다. 재머와의 거리에 따라 운용 모드가 달라지며, AESA 레이더는 재밍 신호가 합성된 신호를 수신한다. AESA 레이더 및 재머는 X 대역에서 운용하며, 재머 신호의 수신 신호와 AESA 레이더 신호의 거리에 따른 전력 감쇄에 차이가 있으며, 전력비는 식 (8)을 통해 결정된다^[6].

$$JSR = \frac{P_f G_f A \pi R^2}{P_T G_T \sigma} \quad (8)$$

식 (8)에서 P_f 와 P_T 는 각각 재머와 AESA 레이더 신호의 평균 송신 전력을, G_f 와 G_T 는 각각 재머와 AESA 레이더 안테나의 송신 이득이며, R 은 재머와 AESA 레이더 사이의 RLOS 거리를, σ 는 재머의 레이더 단면적값이다. 모든 시뮬레이션 시나리오에 대해 레이더 신호와 재머 신호의 평균 전력과 안테나 이득을 동일한 값으로 설정하였으며, 이때 계산되는 JSR은 그림 13과 같다.

RGPO 재밍의 경우, L 타입, J 타입 및 S 타입의 지연 방식을 구현하였으며, 한번 수행 시, 50 s 시간 동안 15 km 거리를 지연하도록 설정하였다. 또한, 기만을 수행한 후, 10 s 시간 동안 지연을 유지하여 추적 게이트가 해당 위치를 중심으로 추적을 수행하도록 유도한다. 한 번의 기만 절차가 종료되면 처음부터 동일한 절차를 반복한다.

표적의 탐지는 일정 오경보율(CFAR: constant false rate) 탐지기를 사용하였으며, 셀의 평균값을 이용하는 평균 일정 오경보율(CA-CFAR: cell-averaging CFAR)을 사용하였다.

그림 14는 CA-CFAR 탐지기의 구조를 보여주며, 훈련 셀(training cell)의 평균값을 바탕으로 문턱값을 결정하도록 한다^[7]. 잡음 재밍 시나리오에서 표적의 위치를 정확히 찾아내지 못하거나, RGPO 재밍 시나리오에서 거리 게이트 이탈 현상으로 인해 500 m 이상의 오차가 발생할 시, 탐지에 실패한 것으로 판정하였다.

마지막으로, 표 2는 레이더의 운용 모드마다 설정한 펄

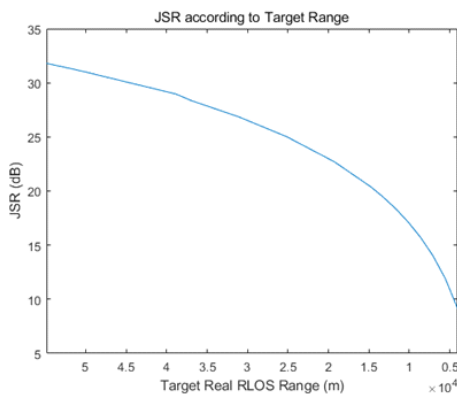


그림 13. 표적 거리에 따른 JSR 변화
Fig. 13. JSR variation with target distance.

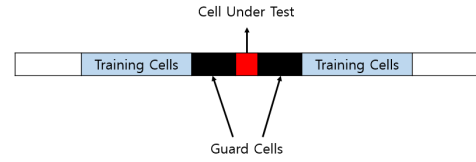


그림 14. CA-CFAR 탐지기 구조
Fig. 14. Structure of CA-CFAR.

표 2. 운용 모드 별 레이더 설정
Table 2. Radar setting for each operation mode.

	Operation mode	Number of pulse	Dwell time (ms)
NAST	Search	5,000	40
	Confirm	5,000	40
	Acquisition	5,000	40
AAST	Search	1,000	70
	Acquisition	1,000	70
ACM	Search	100	60
	Acquisition	100	60

스의 개수와 dwell 시간을 보여준다. NAST의 경우 장거리 탐지를 위해 펄스 수가 다른 모드에 비해 많고, 짧은 길이의 dwell을 설정하였고, AAST는 상대적으로 적은 수의 펄스로, ACM의 경우 근접 교전 시 빠른 탐색을 위해 가장 적은 수의 펄스와 가장 짧은 dwell로 구성되었다. 설정한 시나리오에 의해 NAST의 탐색 주기가 가장 짧고, AAST의 탐색 주기는 가장 길다.

현재 수행되는 재밍 시나리오는 표적의 위치 기만을 수행함을 가정하였으며, 이에 따라 시뮬레이션의 결과는 레이더로부터 재머까지의 거리와 추정된 거리의 위치를 표기하였다. 시뮬레이션을 수행하여 AESA 레이더에서 표적을 탐지한 결과는 아래와 같다.

그림 15은 점 소인 잡음 재밍 결과를 보여준다. 시뮬레이션 중 잡음에 의해 탐지에 실패한 구간이 존재함을 확인할 수 있으며, 재머에 접근함에 따라 그림 13에 나타난 것과 같이 JSR이 감쇄하여 잡음이 존재함에도 탐지가 가능한 구간들이 존재함을 알 수 있다.

그림 16은 광대역 잡음 재밍 결과를 보여준다. 이전의 점 소인 잡음 재밍 기법과 달리 더 넓은 주파수 대역에 대해 재밍을 수행하여 지속적으로 재밍을 수행할 수 있

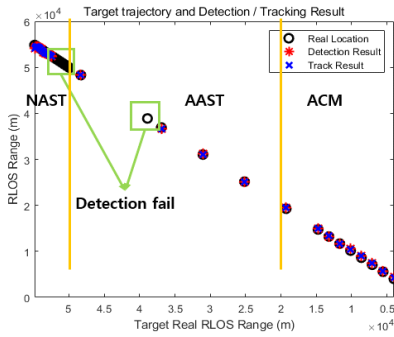


그림 15. 점 소인 잡음 채밍 결과

Fig. 15. Result of sweep spot noise jamming.

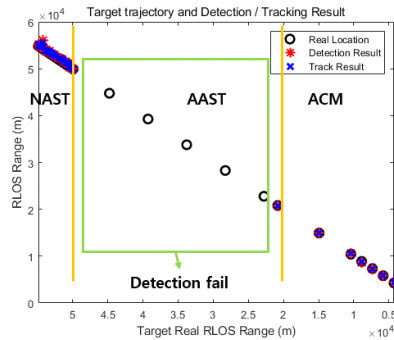


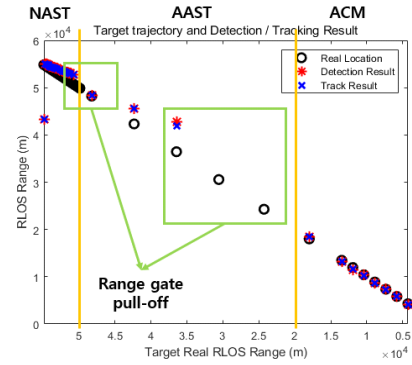
그림 16. 광대역 잡음 채밍 결과

Fig. 16. Result of barrage noise jamming.

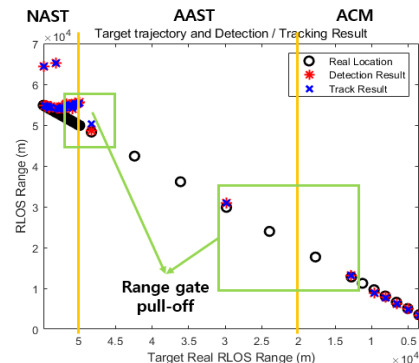
음을 확인할 수 있으며, AESA 레이더가 채머에 접근함에 따라 JSR이 낮아지고, 그에 따라 탐지가 정상적으로 수행됨을 확인할 수 있다. 하지만, NAST 운용 모드 구간에서 확인할 수 있듯이, 점 소인 잡음 채밍 기법의 경우 광대역 잡음 채밍 기법에 비해 높은 전력 밀도를 제공할 수 있어 채밍 대역과 AESA 레이더의 운용 대역이 일치한다면 우수한 채밍 성능을 보임을 확인할 수 있다.

그림 17은 기만 채밍 기법 중 하나인 RGPO 채밍 기법을 수행한 결과를 보여준다. 추적 수행 시, 거리 게이트가 기만 신호에 집중되어 이탈하는 것(pull-off)을 확인할 수 있으며, 표적 신호가 손실된 이후 재추적을 수행하게 된다. 또한, 채머에 접근함에 따라 JSR이 감소하여 정상적으로 탐지를 수행하는 것을 확인할 수 있다.

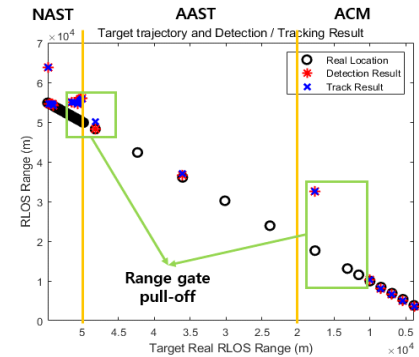
위의 시뮬레이션 결과로부터, 잡음 채밍의 경우, JSR이 높더라도 AESA 레이더가 다중 펄스 시스템을 사용할 경우 기존 레이더의 잡음 제거와 같은 효과를 발생시켜 잡



(a) RGPO (L type)



(b) RGPO (J type)



(c) RGPO (S type)

그림 17. RGPO 기만 채밍 결과

Fig. 17. Result of RGPO jamming.

음 채밍의 효과도를 떨어트리는 점을 확인할 수 있다. 점 소인 잡음 채밍은 대역이 좁아 높은 전력을 사용할 수 있어 대역이 겹치는 구간의 채밍 효과가 우수하지만 채머와 레이더의 주파수 대역이 겹치지 않는다면 크게 떨어지는 채밍 효과를 보인다. 반면 광대역 잡음 채밍의 경우

재밍을 수행하는 주파수 대역이 넓어, 주파수 도약 체계를 적용한 AESA 레이더에 대해 상대적으로 강한 재밍 효과를 보이지만, 상대적으로 적은 전력을 사용함에 따라 점 소인 잡음 재밍 기법이 재밍을 정상적으로 수행하는 구간에 대해 재밍을 수행하지 못하는 것을 볼 수 있다. 기만 재밍의 경우, 거리 게이트 이탈 현상을 일으키므로 게이트 이탈을 유지하는 시간이 끝나기 전까지 지속적인 재밍 효과를 보여주며, 이로 인해 ACM 운용 모드가 수행되는, JSR이 낮은 구간에서도 재밍을 수행하는 점을 확인할 수 있다.

V. 결론 및 향후 연구 방향

본 논문에서는 AESA 레이더의 공대공 운용 환경에서 잡음 및 기만 재밍 시뮬레이션을 수행하고 재밍 효과도 분석을 수행하였다. 제시한 시뮬레이션은 항공기가 재밍에 접근함에 따라 운용 모드가 변경되고, 운용 모드의 변화로 인한 각종 재밍 기법들에 대한 재밍 결과를 보여준다. 향후 연구에서는 제작된 시뮬레이터를 바탕으로 보다 효과적인 재밍 기법 연구나, 재밍 기법에 대한 대응책을 연구하고 분석하는 것을 목표로 할 것이다.

References

[1] J. J. Won, "Load-based beam operating algorithm design and analysis of test results for the AESA radar interleaved mode," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 34, no. 8,

pp. 638-646, Aug. 2023.
 [2] G. W. Stimson, *Introduction to Airborne Radar*, 2nd ed. Raleigh, NC, SciTech, 1998.
 [3] T. H. Kim, S. H. Ryu, J. H. Shin, H. W. Jeon, S. H. Jang, and S. J. Kim, "Design of signal processing for target detection and tracking based on high pulse repetition frequency waveforms in airborne active electronically scanned array radars," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 30, no. 12, pp. 951-963, Dec. 2019.
 [4] S. M. Sherman, *Monopulse Principles and Techniques*, Washington, DC, Artech House, 1988.
 [5] T. H. Kim, S. Y. Beak, H. W. Jeon, J. H. Park, S. W. Lee, and M. I. Kang, et al., "Design and test analysis of countermeasures against deceptive jamming for fighter radar," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 35, no. 2, pp. 157-167, Feb. 2024.
 [6] S. H. Lee, N. H. Jeong, Y. I. Choi, S. G. Hong, S. S. Oh, and I. S. Na, et al., "An analysis of spot noise jamming technique in a monopulse sensor," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 28, no. 3, pp. 237-245, Mar. 2017.
 [7] B. R. Mahafza, *Radar Systems Analysis and Design using MATLAB*, 2nd ed. New York, NY, Chapman and Hall/CRC, 2005.

이 건 [포항공과대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0000-0001-6607-5177>



2019년 8월: 경북대학교 전자공학부 (공학사)
 2021년 8월: 포항공과대학교 전자전기공학과(공학석사)
 2021년 9월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 박사과정
 [주 관심분야] 레이더 신호처리

김 효 정 [포항공과대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0009-0003-6623-7158>



2023년 2월: 경북대학교 전자공학부 (공학사)
 2023년 2월~현재: 포항공과대학교 전자공학과 (석사과정)
 [주 관심분야] 레이더 신호처리, FMCW 레이더, Human Detection

성진용 [LIG넥스원/연구원]

<https://orcid.org/0009-0003-1384-4165>



2023년 2월: 한국항공대학교 항공전자정보공학부 (공학사)
2023년 1월~현재: LIG넥스원 전자전연구소 연구원
[주 관심분야] 전자전 EA 시스템, 디지털 신호처리

김준혁 [LIG넥스원/연구원]

<https://orcid.org/0009-0006-8163-7493>



2024년 2월: 경북대학교 전자공학부 (공학사)
2024년 1월~현재: LIG넥스원 전자전연구소 연구원
[주 관심분야] 전자전 EA 시스템, 디지털 신호처리

변우주 [LIG넥스원/연구원]

<https://orcid.org/0009-0007-5118-6545>



2023년 2월: 광운대학교 전자통신공학과 (공학사)
2023년 1월~현재: LIG넥스원 전자전연구소 연구원
[주 관심분야] EW, SW 등

김경태 [포항공과대학교/정교수]

<https://orcid.org/0000-0003-1200-5282>



1994년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)
1996년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
1999년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)
2002년 3월~2011년 2월: 영남대학교 전자공학과 교수

2011년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 교수
2012년 9월~2017년 12월: 레이더/IR 표적식별 특화연구실실장
2018년 1월~현재: 무인감시정찰기술연구센터장
2019년 4월~현재: 차세대 영상레이다시스템 연구센터장
2020년 11월~현재: 차세대 국방융합기술 연구센터장
[주 관심분야] 레이더 신호 처리 및 영상, 레이더 표적인식 및 패턴인식, 전자기수치해석 및 RCS 측정