

# MUSIC 알고리즘을 이용한 레이더 표적 탐지 방법 연구

김소연\*<sup>1</sup>, 정태희\*<sup>2</sup>, 조병래\*<sup>3</sup>

## A Study on Radar Target Detection Techniques based on the MUSIC Algorithm

So-Yeon Kim\*<sup>1</sup>, Taehee Jeong\*<sup>2</sup>, and Byunglae Cho\*<sup>3</sup>

---

This work was supported by the Agency for Defense Development grant funded by the Korean government

---

### 요약

MUSIC(Multiple Signal Classification)은 1980년대에 Schmidt가 제안한 고해상도 스펙트럼 추정 방법으로써 레이더 표적 등의 도래각 추정을 위한 알고리즘으로 널리 사용되고 있다. 본 논문에서는 기존 표적 탐지기에 서의 해상도 한계를 극복하고, multipath 환경에서도 우수한 분리 성능을 확보할 수 있도록 MUSIC 알고리즘 을 레이더 표적 탐지 분야에 적용하는 새로운 방법을 제안하고자 한다. 연구 결과를 통해 CFAR(Constant False Alarm Rate) 탐지 및 클러스터링을 대체할 표적 탐지 방법을 제안하였고, 그 결과 기존 방법과 동등한 탐지 성능을 유지하면서 표적의 거리 오차가 평균 93.52% 개선된 결과를 얻을 수 있었으며 비행시험을 통해 실제 레이더 시스템 환경에서 적용 가능성을 입증하였다.

### Abstract

The Multiple Signal Classification (MUSIC) algorithm, proposed by Schmidt in the 1980s, is a high resolution spectral estimation technique widely used for Direction of Arrival (DoA) estimation in radar. This paper proposes a novel approach that applies the MUSIC algorithm to radar target detection field in order to overcome the resolution limitations of conventional detectors and to better separate multiple targets even in multipath environments. Through the research results, we proposed a target detection method that can replace conventional techniques such as Constant False Alarm Rate (CFAR) and clustering, and as a result, the proposed method maintained detection performance comparable to conventional techniques while achieving an average improvement of 93.52% in target range error. Furthermore, its feasibility was validated through flight tests conducted in a real radar system environment.

### Keywords

MUSIC, target detection, target clustering, radar signal processing, airborne surveillance radar

---

\* 국방과학연구소 3기술연구원 4부(\*<sup>2</sup> 교신저자)  
- ORCID<sup>1</sup>: <https://orcid.org/0000-0003-2424-0095>  
- ORCID<sup>2</sup>: <https://orcid.org/0000-0002-6427-8410>  
- ORCID<sup>3</sup>: <https://orcid.org/0000-0002-9160-3362>

· Received: Apr. 30, 2025, Revised: Jun. 12, 2025, Accepted: Jun. 15, 2025  
· Corresponding Author: Taehee Jeong  
3rd R&D Institute - 4th Directorate, Agency for Defense Development  
(ADD), Daejeon 34186, Republic of Korea  
Tel.: +82-42-821-2363, Email: jeongtahee@gmail.com

## 1. 서 론

레이더는 주야간이나 날씨에 영향을 거의 받지 않는 전천후 감시정찰 센서로서 안테나를 통하여 전자파를 공간상에 방사하고, 표적으로부터 반사된 신호를 수신하여 표적의 거리를 측정하고 탐지하는 시스템이다. 레이더에서 표적 탐지는 수신신호에서 노이즈, 간섭 신호 등은 제외하고 원하는 표적 신호만을 판별하는 것을 의미한다. 일반적으로 표적 탐지 방법은 정합 필터링(Matched filtering), 도플러 처리(Doppler processing), hypothesis testing과 같은 여러 단계의 신호처리가 포함된다. Hypothesis testing을 위해서는 Neyman-Pearson detector, CFAR(Constant False Alarm Rate) 탐지기 등을 사용할 수 있지만 구조가 간단하고, 일정한 오경보율을 유지하기 위해 적응적인 임계치를 사용하는 CFAR 탐지기를 널리 사용한다[1][2]. 탐지 성능을 높이고 오경보를 줄이기 위해 다양한 CFAR 기법들이 개발되고 있어 클러터 환경 혹은 표적 환경에 따라 적합한 CFAR 탐지기를 선택하는 것이 탐지 성능에 영향을 미친다. CFAR 결과만으로 표적을 결정하기에는 오경보가 많고, 1개의 표적이 여러 개로 탐지되는 것을 방지하기 위해 통상적으로 표적 결정 및 군집화를 위해서 클러스터링 알고리즘 등이 필수적이고, 다양한 표적 군집화 및 필터링 방법이 연구되고 있다. 클러스터링 방법은 표적의 종류 및 환경에 따라 한계가 존재하며 복잡도가 높고, 범용적으로 사용할 수 없다는 단점이 있다.

본 논문에서는 이러한 단점을 극복하기 위해 MUSIC(Multiple Signal Classification) 알고리즘을 이용한 정형화된 표적 탐지 방법을 제안하고자 한다. MUSIC은 1980년대에 Schmidt가 개발한 high resolution spectrum estimation 방법으로써[3] radar measurement 중 도래각(DoA, Direction of Angle) 추정을 위한 알고리즘으로 널리 사용되고 있다. MUSIC은 신호의 분해능을 높일 수 있고, 잡음에 강하며 다중 신호 추정이 가능한 장점이 있어 레이더 표적 탐지에 적용하고자 한다.

MUSIC 알고리즘을 레이더 분야에 응용한 연구는 제트 엔진 변조(JEM, Jet Engin Modulation) 신호

의 chopping 주파수 추출[4], 거리 프로파일을 이용하여 표적의 종류를 인식하는 기법[5], SAR 영상의 거리 및 방위각에서의 점표적 분리 능력을 향상시키는 초해상도(Super-resolution) 실험[6], 초광대역 표적(소형 항공기 표적 분류) 인식 방법[7] 등이 있다. 표적 인식은 대상의 종류나 특성 분류가 목적이므로 특성 추출, 학습 기반 등의 분류 기법이 주로 사용되어 MUSIC을 이용한 목표 대상의 특성을 정밀하게 분석하는 연구가 활발하다. 반면 표적 탐지는 대상의 존재 유무 판단을 목적으로 하여 일반적으로 통계적인 결정이 필요하므로 MUSIC 알고리즘은 주로 표적 인식 분야에 활용되고 있고, 표적 탐지 분야에 적용된 연구는 미미한 실정이다.

본 연구에서는 기존 표적 탐지기에서의 해상도 한계를 극복하고, multipath 환경에서도 우수한 분리 성능을 확보하여 다중 표적 탐지가 가능하도록 MUSIC의 특성을 이용하고자 한다. MUSIC pseudo spectrum의 첨두치(Peak) 유무, 진폭 등을 이용하여 표적의 존재 유무를 판단하고, 임계치 설정 등의 일련의 방법을 구성한 표적 탐지 방법을 제안하였다.

본 논문에서 전개될 구성은 다음과 같다. II장에서는 기존 표적 탐지 방법에 대해 간략히 설명하고, III장에서 제안하는 MUSIC을 이용한 표적 탐지 방법을 제안한다. IV장에서는 실제 항공기탐재 레이더의 비행시험을 통해 본 논문에서 제안한 MUSIC을 이용한 표적 탐지 방법의 유효성을 검증하고, V장에서는 결론을 도출한다.

## II. 기존 표적 탐지 방법

NCI(Non-Coherent Integration)를 이용한 레이더 시스템에서 일반적으로 사용하는 표적 탐지를 위한 신호처리 과정은 그림 1과 같다[8]. 수신신호에 matched filtering, NCI, CFAR, SLB(SideLobe Blanking), hit clustering을 수행하고, 그 결과로부터 표적 정보를 획득한다. CFAR는 대표적인 표적 탐지 방법으로 다양한 기법이 존재한다. 기존 표적 탐지 방법에서는 MCA(Minimum selected Cell Averaging)-CFAR를 사용하였다[9]-[12]. MCA-CFAR는 step-size 설정을 통해 기준 셀에서 큰 값을 제거한 후 잡음을 추정하는

방식으로 비균질 환경에서 표적의 탐지율은 높아지지만 오경보가 많이 발생하여 클러스터링 방법에 따라 1개의 표적이 여러 개 또는 여러 개의 표적이 1개로 탐지될 수 있는 가능성이 높아지므로 정확도가 저하할 수 있다는 단점이 있다. Hit clustering은 표적을 결정하기 위한 단계로써 CFAR 임계치를 넘은 셀을 hit로 정의하고, hit의 인접 여부 등을 판단하여 다수의 hit를 하나의 클러스터로 병합하거나 분리하는 과정을 포함한다. SLB는 부엽(Sidelobe) 차단 기능으로 SLB 채널을 이용하여 합채널의 CFAR 처리 결과를 정제하는 과정이다. Hit가 존재하는 영역에 대해서만 SLB 채널의 값을 확인하여 임계치 미만인 경우 부엽 신호로 판단하여 제거한다. SLB 채널은 안테나 빔패턴에서 주엽(Mainlobe)과 부엽 신호로 수신되는 신호를 구분하기 위한 목적으로 사용되며 수신된 신호에 대해 합채널과 SLB 채널을 통해 들어온 신호를 비교하여 SLB 채널로 수신된 신호가 더 큰 경우 표적이 부엽 범위에 위치한 것으로 판단한다.

최근에는 CFAR 탐지기를 사용하는 전통적인 표적 탐지 방법 외에 다양한 기법을 레이다 표적 탐지 분야에 적용하기 위한 연구가 진행되고 있다.

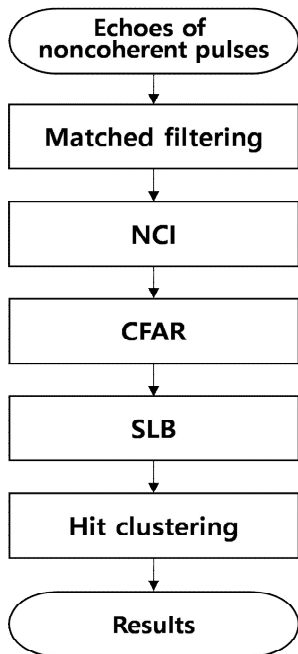


그림 1. NCI를 이용한 기존 표적 탐지 방법  
 Fig. 1. Generic radar signal processing of pulsed non-coherent radar system

DNN(Deep Neural Networks)을 레이다 표적 탐지 분야에 적용하기 위한 표적 탐지기 설계에 관한 연구[13], 딥러닝 기술을 활용한 ST-GNN(Spatio-Temporal Graph Neural Network) 기반 탐지기 설계[14] 등이 있다. 그러나 이러한 방법은 학습 데이터가 필요하므로 충분한 데이터가 없으면 성능이 저하된다는 단점이 있는 반면에 MUSIC 알고리즘은 사전 학습 없이도 정확도 높은 결과를 얻을 수 있다.

### III. MUSIC을 이용한 표적 탐지 방법

#### 3.1 MUSIC

MUSIC은 방위각 추정 기법으로 널리 사용되는 알고리즘으로써 높은 분해능을 가지므로 서로 근접한 신호원의 방위각을 추정할 수 있는 장점이 있는 반면 고유분해(Eigendecomposition)를 수행하기 위해 많은 연산량이 요구되므로 실시간 처리에 제약이 있는 단점이 있다. 수신신호 모델은 다음 식 (1)과 같으며 잡음은 서로 상관성이 없다고 가정한다.

$$x(t) = Ae^{j(2\pi ft + \phi)} + n(t) \quad (1)$$

여기서  $A$ 는 신호의 크기(Amplitude),  $f$ 는 주파수(Frequency),  $\phi$ 는 위상(Phase),  $n$ 은 백색 가우시안 잡음이다. 신호와 잡음은 서로 상관성이 없다는 특성을 기반으로 공분산 행렬(Covariance matrix)의 고유분해를 수행하여 신호 부공간(Signal subspace)과 잡음 부공간(Noise subspace)으로 분리한다. 공분산 행렬( $R_x$ )은 다음 식 (2)와 같다.

$$R_x = E[x(t)x(t)^H] = A^2 e^{j2\pi ft} + \sigma^2 \delta_{0t} \quad (2)$$

여기서  $\sigma^2$ 는 잡음의 분산,  $\delta_{0t}$ 는 Kronecker delta ( $\delta_{ij} = 1(i = j), \delta_{ij} = 0(i \neq j)$ )를 의미한다. 이때 잡음 부공간에 직교하는 특성을 갖는 steering vector를 이용해 서로 직교한다는 사실에 기반하여 공분산 행렬에 대해 고유분해를 수행한다. 신호가 존재하는 고유벡터들로 이루어진 신호 부공간과 순수 잡음에 해당하는 고유벡터들로 구성된 잡음 부공간으로 분

리하여, pseudo spectrum을 구한 후 첨두치(Peak)를 찾아 신호의 방위각을 추정할 수 있다. Steering vector는 다음 식 (3)과 같고, 여기서  $N$ 은 data 수를 의미한다.

$$s = [1 e^{-j2\pi f} \dots e^{-j2\pi(N-1)f}] \quad (3)$$

MUSIC의 pseudo spectrum은 다음 식 (4)로부터 계산한다.

$$P_M(f) = \frac{1}{s^H V_n V_n^H s} \quad (4)$$

여기서  $V_n$ 은 잡음 부공간을 형성하는 고유 벡터,  $s$ 는 steering vector,  $H$ 는 Hermitian(Complex conjugate transpose) 연산을 나타낸다. 위 식의 스펙트럼 함수는 실제 신호의 도래각과 일치할 때 분모가 최소가 되어 MUSIC 스펙트럼은 해당 방향에서 극값을 갖게 된다.

### 3.2 제안하는 표적 탐지 방법 설계

본 논문에서 제안하는 MUSIC을 이용한 효율적인 표적 탐지 방법에 대한 흐름도는 그림 2와 같다.

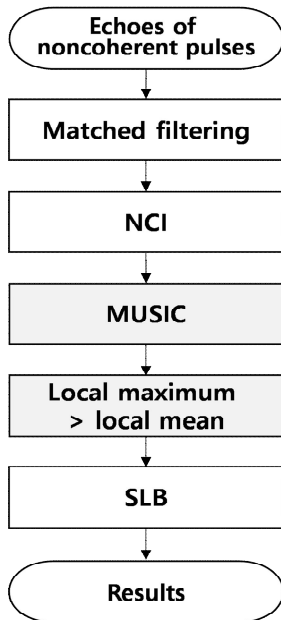


그림 2. 제안하는 MUSIC을 이용한 표적 탐지 방법  
 Fig. 2. Proposed target detection method using MUSIC algorithm

수신신호로부터 정합 필터링, NCI는 앞선 기존의 표적 탐지 방법과 동일하고, 회색으로 표시한 MUSIC, local maximum > local mean 판별 부분을 새롭게 제안하였고, 이후 SLB 과정도 기존 방법과 동일하게 수행하였다.

NCI 처리까지 마친 신호에 대해 MUSIC을 적용한다. 전체 신호에 대해 MUSIC을 적용할 수 있지만 본 연구에서의 관심 영역은 빔 중심점이기 때문에 빔 중심에 해당하는 데이터로부터  $\pm 250m$ 를 관심 영역으로 설정하고 데이터를 처리하였다. MUSIC 알고리즘은 사전에 신호의 개수를 알고 있어야 한다. M개의 독립된 신호가 존재할 때, 신호에 대응하는 M개의 고유값(Eigenvalues)은 다음 식 (5)와 같이 표현할 수 있고, 나머지 고유값은 잡음에 해당하게 된다.

$$\lambda_0 \dots \lambda_{M-1} \quad (5)$$

본 연구에서 M은 경험적으로 12로 설정하였는데 데이터에서 독립된 신호의 개수에 따라 추정이 필요한 값이다. M 값이 정확할 때 신호의 정확한 peak를 추정할 수 있다. M 값을 과대 설정하면 오탐지가 발생할 수 있고, M 값을 과소 설정하면 실제 신호가 누락될 가능성이 있어 M 값 추정 기법과 관련하여 여러 가지 MUSIC 알고리즘도 존재한다.

MUSIC 적용 후에는 pseudo spectrum에 대해 수식 (6)의 local mean을 계산하고, 식 (7)의 local maximum을 계산한다.

$$L_{mean} = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n x_i \quad (6)$$

$$L_{max} = sp_r > sp_{r-1} \text{ and } sp_r \geq sp_{r+1} \quad (7)$$

여기서  $x$ 는 데이터,  $n$ 은 데이터 개수,  $sp$ 는 데이터의 power이다. 식 (6)의 local mean은 데이터의 평균값을 계산한 것이고, 식 (7)은 거리방향( $r$ ) 좌우 셀의 power를 비교하여 식을 만족하는 셀을 검출하는 것이다. 계산한 local mean보다 큰 local maximum을 만족하는 셀만 표적으로 검출하며 수식으로 나타내면 다음 식 (8)과 같다.

이때  $\alpha$ 는 scale factor로써 local mean을 일정한 상수로 보정하기 위해 사용하는 값이다. 본 연구에서  $\alpha$ 는 1.2로 설정하였다. 값을 낮게 설정할수록 표적의 개수가 많아질 수 있다. 식 (8)로부터 검출된 표적에 대해 SLB 판별을 수행하여 최종 표적을 결정한다.

$$L_{max} > \alpha \times L_{mean} \quad (8)$$

#### IV. 비행시험을 통한 제안 기법의 유효성 검증

##### 4.1 레이더 시스템 및 시험 항공기

레이더를 항공기에 탑재한 후 비행시험을 통해 데이터를 획득하였다. 데이터 획득을 위한 레이더 시스템 및 시험 항공기는 그림 3[15]과 같으며 AESA(Active Electronically Scanned Array) 레이더를 사용하였다.



그림 3. 시험 항공기 및 레이더 시스템  
Fig. 3. FTB and radar system

AESA 레이더는 전자주사를 통한 표적 탐지 및 추적을 수행하는 센서이고, 시험 항공기는 민간 항공기(B-737)를 개조한 것으로 노즈 부분에 레이돔과 AESA 레이더를 장착하여 시험하였다. FTB(Flying

Test Bed)는 레이더 시험 항공기로, 항공기 운용환경에서의 비행시험을 통해 신뢰성 있는 AESA 레이더를 개발하기 위하여 개조된 시험 항공기이다[15][16].

##### 4.2 비행시험 파라미터 및 시나리오

비행시험 데이터 획득에 사용한 항공기 탑재 레이더의 주요 파라미터는 아래 표 1과 같다. 레이더의 운용 주파수는 X 대역이며, PRF(Pulse Repetition Frequency)는 LPRF(Low PRF)를 사용하였다. 시험 항공기는 남아프리카공화국에서 운용하였고, 세부적인 시험 항공기의 위치와 안테나 빔 조향 영역을 그림 4의 위성지도[17] 상에 나타내었다.

표 1. 시험 레이더 관련 파라미터  
Table 1. Parameters of the experimental radar

Parameter	Value
Frequency band	X-band
PRF	LPRF (< 800Hz)
Data collection date	August 2024
Position of radar	On the aircraft in the Republic of South Africa



그림 4. 시험 항공기의 위치와 안테나 빔 조향 영역  
Fig. 4. Position of the FTB and antenna beam steering area

##### 4.3 비행시험 데이터 분석

제안한 MUSIC 알고리즘을 이용한 표적 탐지 방

법에 대한 유효성을 검증하기 위해 비행시험으로 획득한 데이터를 사용하였다. 데이터를 획득하기 위해 앞서 언급한 레이더 시스템을 시험 항공기에 탑재하여 비행시험을 수행하였다. 비행시험 데이터 및 결과 검증을 위해 CR(Corner Reflector)을 탐지 대상으로 하고, CR은 넓고 평탄한 지역에 고정하여 설치하였다.

비행시험으로 획득한 데이터에서 2개 case에 대해 연구를 수행하였다. 우선 첫 번째 case에 대해 기존의 표적 탐지 방법을 적용한 결과는 그림 5와 같다. 그림에서 검정색 실선(Point of interest)은 CR의 위치를 나타낸다. 파란색 실선이 matched filtering, NCI 처리 후의 신호이고, 빨간색 점선이 CFAR 임계치, 검정색 동그라미가 CFAR로부터 검출된 hit이다. 빨간색 네모는 hit clustering 후에 검출된 최종 표적을 의미한다. 시험 표적인 CR 1개 외의 2개의 기뢰 표적이 포함되어 있는데 표적 탐지 결과, 총 2개의 표적이 검출되었다. 그중 CR 위치에서 검출된 표적 1개에 대해 CR에서 탐지된 hit와 인접한 표적에서 검출된 hit까지 총 6개의 hit가 각각 검출되었지만 hit clustering 과정에서 hit가 병합되며 2개로 탐지되었어야 할 plot이 1개의 plot으로만 탐지되었고, 그 결과 CR의 위치와 표적 검출 위치 간의 거리 오차가 발생하였다.

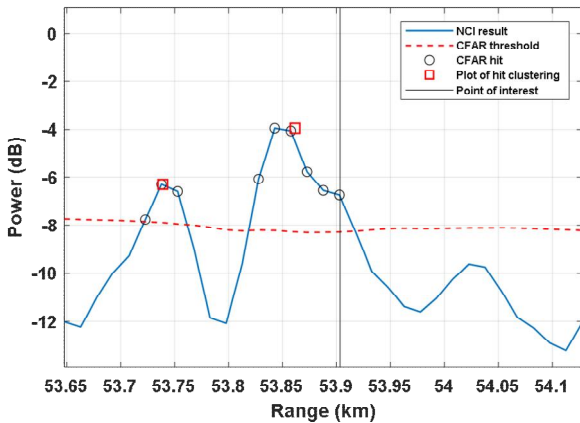


그림 5. 기존 방법의 표적 탐지 결과 (Case #1)  
Fig. 5. Target detection results of the conventional method (Case #1)

그림 6은 NCI 처리 결과에 MUSIC을 적용한 후 pseudo spectrum에서 local mean 및 local maximum을

계산하여 표적을 검출한 결과이다. local mean 계산 결과는 검정색 점선, local maximum 결과는 빨간색 동그라미로 표시하였고, local mean보다 local maximum이 큰 경우에만 표적으로 판별하고 파란색 네모로 표시하였다. 신호처리 한 데이터에서 총 6개의 local maximum plot이 계산되었고, 그중 local mean보다 큰 3개의 plot만 표적으로 판별하였다.

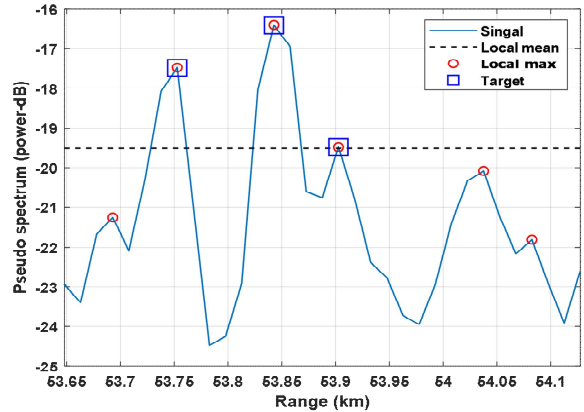


그림 6. MUSIC의 pseudo spectrum (Case #1)  
Fig. 6. Result of the MUSIC pseudo spectrum (Case #1)

본 논문에서 제안한 MUSIC을 이용한 표적 탐지 결과는 그림 7과 같다. 그림 6에서 판별한 표적을 원신호에 표시한 결과로써 총 3개의 표적이 탐지되었다. 기존의 방법에서는 총 2개의 표적이 탐지되었는데 제안한 방법에서는 CR 위치에서 1개의 표적이 분리되어 추가로 탐지되었다. 표적 탐지 결과에 대한 분석을 위해 MUSIC spectrum과 원신호를 같이 도시하였고, 그림 8과 같다. 그림 8에서 좌측의 파란색 축이 pseudo spectrum에 해당하고, 오른쪽의 주황색 축이 원신호에 해당한다. 원신호에서는 CR과 인접한 거리의 다른 표적의 간섭으로 CR 신호에서 peak가 생기지 않았고, CFAR로 검출된 hit 또한 인접한 hit와 클러스터링되며 표적이 1개만 검출되었다. 반면에 MUSIC spectrum에서는 신호 분해능이 좋아지는 효과로 CR 신호에서 peak가 생성되어 CR과 인접한 표적을 구분하여 탐지할 수 있었다. 표적을 구분하여 탐지한 결과, 표적 개수가 늘어난 반면 표적의 거리 오차는 기존의 41.79m에서 제안한 방법을 적용했을 때 0.66m로 개선되어 표적의 정확도를 높일 수 있었다.

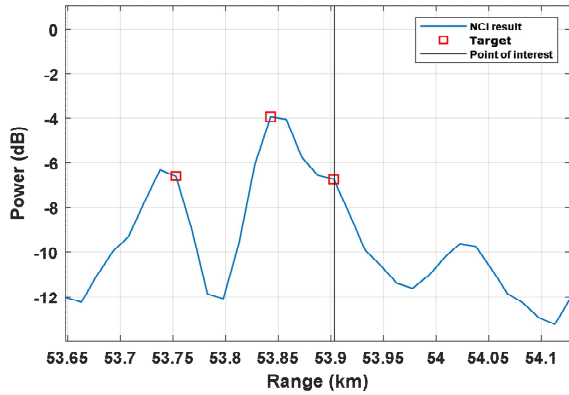


그림 7. 제안하는 MUSIC을 이용한 표적 탐지 결과 (Case #1)

Fig. 7. Proposed target detection results using MUSIC algorithm (Case #1)

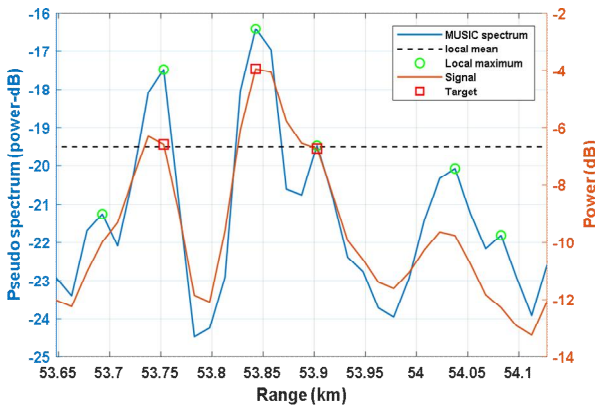


그림 8. MUSIC spectrum과 원신호 비교 (Case #1)

Fig. 8. Comparison between MUSIC algorithm and the reference signal (Case #1)

두 번째 case에 대해 기존의 표적 탐지 방법을 적용한 결과는 그림 9와 같고, 처리 과정은 첫 번째 case와 동일하다. CR 1개와 기회 표적 2개를 포함한 총 3개의 표적 중 2개의 표적이 검출되었다. 검출된 표적 중 CR 위치에서 검출된 표적 1개에 대해 CR에서 탐지된 hit와 인접한 표적에서 검출된 hit까지 총 7개의 hit가 각각 검출되었지만 hit clustering 과정에서 hit가 모두 병합되며 1개의 plot으로 탐지되었고, 그 결과 CR의 위치와 표적 검출 위치 간의 거리 오차가 발생하였다.

표적 탐지 결과에 대한 분석을 위해 MUSIC spectrum과 원신호를 같이 도시하였고, 그림 10과 같다. 그림 10에서 좌측의 파란색 축이 pseudo spectrum이고, 오른쪽의 주황색 축이 원신호에 해당한다. 원신호에서 CR과 인접한 거리의 다른 표적에

서도 peak가 생겼고, 기존 방법을 적용했을 때 CFAR 후 각각 표적에 대해 hit 또한 탐지되었으나 hit clustering의 한계로 모든 hit가 병합되며 1개의 표적만 검출되었다. 반면에 MUSIC spectrum에서는 신호 분해능이 좋아지는 효과로 표적 간 신호에서 null이 깊게 생성되어 2개의 표적을 더욱 분명하게 구분할 수 있었고, 6개의 local maximum 중 local mean보다 큰 3개의 local maximum만을 표적으로 탐지하였다.

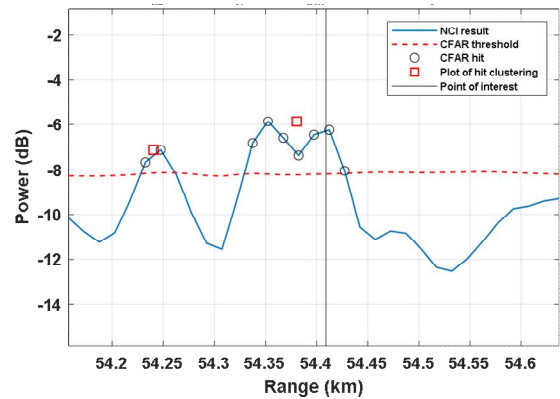


그림 9. 기존 방법의 표적 탐지 결과 (Case #2)

Fig. 9. Target detection results of the conventional method (Case #2)

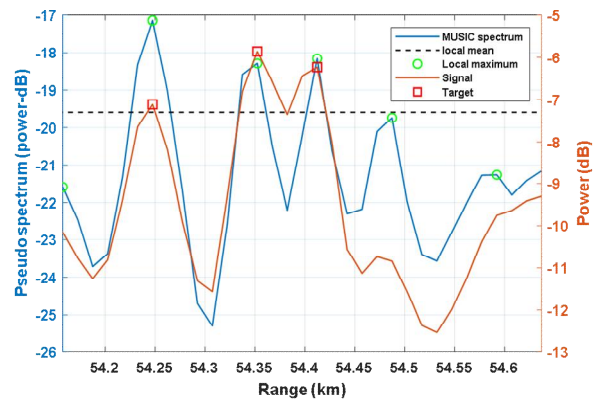


그림 10. MUSIC spectrum과 원신호 비교 (Case #2)

Fig. 10. Comparison between MUSIC algorithm and the reference signal (Case #2)

그림 11은 MUSIC을 이용한 표적 탐지 방법의 결과만을 나타낸 것으로써 총 3개의 표적을 확인하였다(빨간색 네모). 기존의 방법에서는 총 2개의 표적이 탐지되었는데 제안한 방법에서는 CR 위치에서 1개의 표적이 분리 탐지되며 1개의 표적이 추가로 탐지되었다. 표적을 구분하여 탐지한 결과, 표적

개수가 늘어난 반면 표적의 거리 오차는 기존의 28.63m에서 제안한 방법을 적용했을 때 3.26m로 거리 오차가 개선되어 표적의 정확도를 높일 수 있었다. 두 개의 case에 대해 거리 오차를 비교하여 요약한 결과는 표 2와 같다. 제안하는 탐지 방법이 기존의 탐지 방법 대비 거리 오차가 평균 93.52% 개선된 것을 알 수 있다.

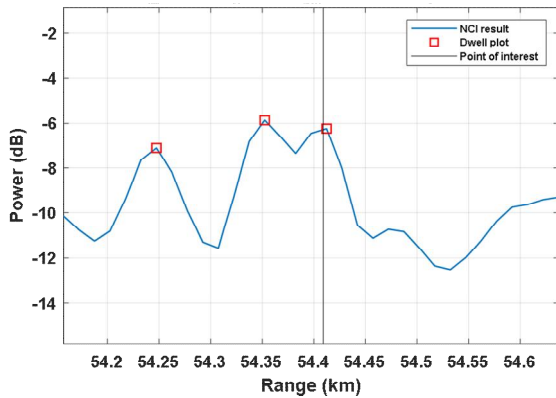


그림 11. 제안하는 MUSIC을 이용한 표적 탐지 결과 (Case #2)

Fig. 11. Proposed target detection results using MUSIC algorithm (Case #2)

표 2. 거리 오차 비교 결과  
Table 2. Comparison of range error

Case number	Range error using the existing method [m]	Range error using the proposed method [m]	Decrease rate [%]
1	41.79	0.66	98.42
2	28.63	3.26	88.61

### V. 결론 및 향후 과제

본 논문에서는 MUSIC 알고리즘을 표적 탐지 분야에 적용하여 이전에 시도된 바 없던 표적 탐지 방법을 제안하였고, 비행시험을 통해 획득한 데이터를 이용하여 제안한 방법에 대한 유효성을 검증하였다. 제안한 표적 탐지 방법은 기존의 CFAR 탐지기 및 클러스터링을 대체하여 MUSIC과 local mean 및 local maximum을 이용하여 표적을 탐지하는 방법이다.

본 연구에서 제안한 방법은 기존의 CFAR를 대체할 수 있고, CFAR 결과로 검출된 표적 후보에

대해 오정보를 제거하고 1개의 표적이 여러 개로 탐지되지 않게 표적 후보를 군집화하는 과정인 클러스터링 또한 수행하지 않을 수 있다. CFAR는 탐지 성능에 영향을 미치는 중요한 과정으로써 클러스터 환경에 따라 적합한 방법을 선택하는 것이 중요한데 운용 환경에 따라 클러스터 환경이 달라지면 성능 또한 저하될 수 있는 문제점이 있다. 클러스터링 알고리즘은 표적 특성에 맞춰 적절하게 설계하는 것이 중요하므로 일반적으로 정형화된 방법이 없어 사용자 필요에 의해 다양하게 설계되고 있다.

본 연구에서 제안한 방법을 사용할 경우 클러스터 환경에 따라 CFAR를 변경하지 않아도 안정적인 탐지 성능을 유지할 수 있다. 클러스터링의 경우 표적의 크기가 크거나 인접한 표적 등의 간섭 신호가 있으면 클러스터링 알고리즘 한계로 표적의 분리 및 탐지가 안되는 경우에서도 탐지가 가능하며 클러스터링 알고리즘을 대체하여 수식화된 간단한 방법으로 표적을 탐지할 수 있게 된다.

기존의 표적 탐지 결과와 제안한 방법의 표적 탐지 결과를 비교했을 때 탐지된 표적의 거리 오차 또한 개선할 수 있었다. 기존 클러스터링 알고리즘의 한계로 인접한 표적의 분리가 적절히 수행되지 않는 경우에서 표적을 분리하여 탐지할 수 있었다. 그 결과 표적의 거리 오차가 case별로 각각 41.13m, 25.37m 감소되었고, 거리 위치 정확도가 평균 93.52% 개선되었다. 탐지된 표적의 오차가 적을수록 시스템의 신뢰성이 높아지며 이후 추적 등의 후처리 과정이 있는 경우에도 성능을 향상시킬 수 있게 된다.

본 연구에서 제안한 방법은 항공기탐재 AESA 레이다 비행시험을 통해 획득한 데이터에 적용하여 실제 레이다 시스템 환경에서 적용성 및 유효성을 입증하였다. 그러나 제안하는 방법을 범용적으로 사용하기 위해서는 세부 파라미터의 최적화가 이루어져야 하고, 연산시간 분석이 필요하다는 점에서 본 연구의 한계를 찾을 수 있다. 시스템 운용 환경에 따른 파라미터 최적화 및 연산시간 분석을 위한 신뢰도 확보를 위하여 더욱 많은 실험 데이터가 필요하고 반복적인 비행시험이 필요하므로, 최적화를 위한 연구는 본 논문의 향후 과제로 한다.

## References

- [1] M. A. Richards, "Fundamentals of Radar Signal Processing", McGraw-Hill, pp. 295-345, 2005.
- [2] M. I. Skolnik, "Introduction to Radar Systems", 3rd ed. McGraw-Hill, pp. 276-312, 2001.
- [3] J. B. Tsui, "Digital Techniques for Wideband Receivers", IET, pp. 348-350, 2004. <http://doi.org/10.1049/SBRA005E>.
- [4] W. Y. Song, H. J. Kim, S. T. Kim, I. S. Shin, and N. H. Myung, "Chopping Frequency Extraction of JEM Signal Using MUSIC Algorithm", The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science, Vol. 30, No. 3, pp. 252-259, Mar. 2019. <http://doi.org/10.5515/KJKIEES.2019.30.3.252>.
- [5] K. T. Kim, D. K. Seo, and H. T. Kim, "Efficient Radar Target Recognition Using the MUSIC Algorithm and Invariant Features", IEEE Transactions on Antennas and Propagation, Vol. 50, No. 3, pp. 325-337, Mar. 2002. <http://doi.org/10.1109/8.999623>.
- [6] P. Thompson, M. Nannini, and R. Scheiber, "Target Separation in SAR Image with the MUSIC Algorithm", IEEE International Geoscience and Remote Sensing Symposium, pp. 23-28, Jul. 2007. <http://doi.org/10.1109/IGARSS.2007.4422832>.
- [7] M. Secmen, G. Turhan-Sayan, and A. Hizal, "Radar Target Recognition Method with MUSIC Algorithm: Application to Aircraft Targets with Measured Scattered Data", IEEE Radar Conference, Rome, Italy, pp. 26-30, May 2008. <http://doi.org/10.1109/RADAR.2008.4721034>.
- [8] C. Alabaster, "Pulse Doppler Radar", SciTech Publishing, pp. 89-90, 2012.
- [9] S. Hong, K. S. Kim, B. L. Cho, and C. H. Kim, "A Study on Environmental Adaptive CFAR to Improve Performance under Sea Clutter Environments", The Journal of KIIT, Vol. 19, No. 7, pp. 83-90, Jul. 2021. <http://dx.doi.org/10.14801/jkiit.2021.19.7.83>.
- [10] J. B. Yoon, S. G. Kim, and G. R. Lim, "A Study on the Application of Hybrid CFAR Considering Mountain Terrain Condition", Journal of the Korea Academia-Industrial, Vol. 24, No. 7, pp. 94-99, Jul. 2023. <http://doi.org/10.5762/KAIS.2023.24.7.94>.
- [11] G. H. Park, J. Ahn, W. Kim, S. Lee, and D. Lee, "A Design of MCA-CFAR Detector for Extraction of Cetacean Whistle Contours", KICS Winter Conference 2024, Pyeongchang, Korea, pp. 1474-1475, Jan. 2024.
- [12] T. Kim and Y. Eom, "Implementation of Threshold Calculation for Target Signal Detection in Radar Systems", KIISE Transactions on Computing Practices, Vol. 26, No. 12, pp. 567-572, Dec. 2020. <http://doi.org/10.5626/KTCP.2020.26.12.567>.
- [13] L. Wang, J. Tang, and Q. Liao, "A Study on Radar Target Detection Based on Deep Neural Networks", IEEE Sensors Letters, Vol. 3, No. 3, pp. 1-4, Mar. 2019. <http://doi.org/10.1109/LSSENS.2019.2896072>.
- [14] X. Wang, G. Cui, Y. Wang, W. Zhao, and K. Xiong, "Marine Target Detection via Spatial-Temporal Graph Neural Network", IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Vol. 74, pp. 1-14, Jan. 2025. <http://doi.org/10.1109/TIM.2025.3529068>.
- [15] Gukbang News, <https://gukbangnews.com/news/articleView.html?idxno=3601>. [accessed: May 23, 2025]
- [16] T. Jeong, S. Y. Kim, H. Ju, and B. Cho, "A Study on the Adaptive Guard Cell-based Target Detection Technique for Airborne Surveillance Radar", The Journal of KIIT, Vol. 23, No. 4, pp. 135-143, Apr. 2025. <http://dx.doi.org/10.14801/jkiit.2025.23.4.135>.
- [17] Google Earth Pro V7.3.3.7786. (Date of Original Imagery: Dec. 14, 2015), <https://www.google.com/intl/ko/earth/about/>. [accessed: May 23, 2025]

저자소개

김 소 연 (So-Yeon Kim)



2012년 2월 : 세종대학교  
지구정보공학과(공학사)  
2014년 8월 : 세종대학교  
지구정보공학과(공학석사)  
2015년 9월 ~ 현재 :  
국방과학연구소 선임연구원  
관심분야 : 레이더 신호처리,

레이더 시스템

정 태 희 (Taehee Jeong)



2009년 2월 : 한양대학교  
전자통신컴퓨터공학부(공학사)  
2011년 2월 : 포항공과대학교  
전자전기공학과(공학석사)  
2024년 2월 : 한국과학기술원  
전기및전자공학부(공학박사)  
2011년 1월 ~ 현재 :

국방과학연구소 선임연구원

관심분야 : 레이더 신호처리, 표적 탐지, 레이더 시스템

조 병 래 (Byunglae Cho)



1999년 2월 : 경북대학교  
전자전기공학부(공학사)  
2001년 2월 : 포항공과대학교  
전자전기공학과(공학석사)  
2005년 2월 : 포항공과대학교  
전자전기공학과(공학박사)  
2005년 3월 ~ 2006년 1월 :

포항공과대학교 전자전기공학과 연구원

2006년 1월 ~ 현재 : 국방과학연구소 책임연구원

관심분야 : 레이더 신호처리, 영상레이더