

펄스 도플러 레이더의 모노펄스 비율 기반 주엽 표적 탐지 및 유효성 검증 기법 연구

Monopulse Ratio-Based Mainlobe Target Detection and Validation in Pulse-Doppler Radar

정태희 · 김소연 · 김진욱* · 최민준* · 장지연* · 김영주** · 조현호** · 원종민** · 조병래

Taehee Jeong · So-Yeon Kim · Jinuk Kim* · Minjoon Choi* · Jiyeon Jang* · Youngjoo Kim** ·
Hyunho Cho** · Jongmin Won** · Byunglae Cho

요 약

펄스 도플러 레이더는 복잡한 전자기 환경에서 신뢰성 있는 표적 탐지를 위해 모노펄스 기법을 널리 사용한다. 그러나 기존 방식은 부엽 간섭에 취약하여 오탐지와 성능 저하가 발생한다. 이를 보완하기 위해 다양한 기법이 제안되었으나, 시스템 복잡성과 비용 증가로 실제 적용에는 제약이 따른다. 본 논문에서는 모노펄스 비율의 각도 특성을 활용하여 부엽 표적을 억제하고, 보조 안테나 없이 주엽 표적을 안정적으로 탐지하는 기법을 제안한다. 제안 기법은 단순한 구조와 낮은 연산 복잡도를 유지하면서도 신뢰성 있는 탐지를 가능하게 한다. 비행시험을 통해 주엽 표적 탐지 성능과 탐지 표적의 유효성을 검증하였으며, 그 결과 실제 운용 환경에서도 적용 가능성을 확인하였다.

Abstract

Monopulse techniques are widely employed in pulse-doppler radars to achieve reliable target detection in complex electromagnetic environments. However, conventional methods are vulnerable to sidelobe interference, which leads to false alarms and degraded performance. Although various approaches have been proposed, these often suffer from increased system complexity and implementation costs. In this study, we propose a mainlobe target detection method that utilizes the angular characteristics of the monopulse ratio to suppress sidelobe targets without auxiliary antennas. The proposed method involves a simple structure and low computational complexity, while ensuring reliable detection. The flight test results demonstrate the effectiveness of the proposed method in detecting mainlobe targets and verify its applicability in practical operational environments.

Key words: Monopulse Ratio, Mainlobe Target Detection, Validation, Pulse-Doppler Radar

「이 논문은 2025년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임.」

국방과학연구소 3기술연구원 4부(4th Directorate, 3rd R&D Institute, Agency for Defense Development)

*한화시스템 항공레이더체계팀(Avionics Radar System Team, Hanwha Systems)

**한화시스템 SW팀(SW Team, Hanwha Systems)

· Manuscript received December 1, 2025 ; Revised December 29, 2025 ; Accepted January 13, 2026. (ID No. 20251201-150)

· Corresponding Author: Taehee Jeong (e-mail: taehee@add.re.kr)

I. 서 론

현대 펄스 도플러 레이더 시스템은 복잡한 전자기 환경에서도 신뢰성 있는 표적 탐지 및 추적 기능을 제공하는 핵심 기술로 자리매김하고 있다^{[1]-[4]}. 특히 펄스 도플러 레이더는 이동 표적 지시(moving target indication)와 도플러 필터링을 통해 클러터(clutter) 환경에서도 우수한 탐지 성능을 발휘하며, 항공기 전투 및 감시 정찰 임무에서 중요한 역할을 수행한다. 이러한 시스템에서 표적의 정확한 위치 추정과 안정적인 탐지를 동시에 달성하기 위해 모노펄스(monopulse) 처리 기법^{[5]-[8]}이 널리 활용된다. 모노펄스 기법은 단일 펄스 수신으로 높은 각도 정확도를 제공하고 빠른 응답 속도를 확보할 수 있다는 장점을 가진다^[1].

그러나 기존 모노펄스 기반 펄스 도플러 레이더 시스템은 부엽(sidelobe) 간섭에 취약하다는 근본적인 한계를 지닌다. 부엽에서 유입되는 강한 간섭 신호나 잡음은 주엽(mainlobe) 표적과 혼동을 일으켜 오탐지(false alarm) 및 성능 저하를 초래할 수 있다. 이를 보완하기 위해 보조 안테나를 이용한 부엽 억제 기법^{[9],[10]}, 적응형 빔포밍(adaptive beamforming)^[11], 디지털 빔 스티어링(digital beam steering) 기반의 간섭 제거 기법^{[12],[13]} 등이 제안되어 왔다. 하지만 이러한 방법들은 추가적인 안테나 채널, 복잡한 신호처리 연산, 고성능 하드웨어를 요구하여 시스템의 규모와 비용을 증가시키는 문제가 있다. 특히, 다수의 배열 소자가 필요한 경우 소형·경량화를 요구하는 항공 플랫폼에는 적용이 제한적이다. 또한 보조 안테나 추가로 인한 배열 소자 간 상호 결합(mutual coupling)^{[14]-[16]}, 보정(calibration) 문제 등으로 인해 실제 환경에서 기대 성능을 확보하는 데 많은 시간과 비용이 필요하다는 점도 지적된다.

본 논문에서는 이러한 문제를 해결하기 위하여 모노펄스 비율(monopulse ratio)의 각도 특성을 활용한 주엽 표적 탐지 기법을 제안한다. 제안 기법은 보조 안테나를 사용하지 않고도 부엽을 강인하게 억제할 수 있으며, 기존 하드웨어 구조를 단순하게 유지할 수 있다는 장점을 가진다. 또한 추가적인 빔포밍 연산이나 복잡한 적응형 처리 과정이 필요하지 않으므로 실시간 운용에 유리하다. 이를 통해 펄스 도플러 레이더 시스템의 소형화, 제작 비용 절감, 안정적인 성능 확보를 동시에 달성할 수 있다.

제안 기법의 실효성은 실제 비행시험(flight test)을 통해 검증하였다. 시험에서는 다양한 고각 및 방위각 조건에서 표적 탐지 성능을 평가하였으며, 주엽 표적을 안정적으로 탐지하고 부엽 표적을 제거할 수 있음을 확인하였다. 특히 본 연구에서는 탐지된 표적의 유효성을 검증하는 절차를 포함하여, 제안 기법이 단순히 탐지 확률 향상에 그치지 않고 실전 운용 환경에서도 신뢰성 있는 결과를 제공할 수 있음을 입증하였다.

따라서 본 논문은 펄스 도플러 레이더 시스템에서 모노펄스 비율 기반 탐지 기법의 이론적 배경과 설계 원리를 제시하고, 실제 비행시험을 통한 실효성 검증 결과를 통해 차세대 항공 플랫폼에서의 실용적 적용 가능성을 제시한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 모노펄스 비율 기반 주엽 표적 탐지 기법과 유효성 검증 기법을 소개한다. III장에서는 실제 항공기 펄스 도플러 레이더 비행시험을 통해 제안 기법의 실효성을 검증하며, IV장에서 결론을 제시한다.

II. 주엽 표적 탐지 기법 및 유효성 검증 기법

2-1 주엽 표적 탐지 기법

본 논문에서는 보조 안테나를 사용하지 않고 레이더 배열 안테나의 모노펄스 비율 특성을 직접 활용하여 주엽 표적을 탐지하는 새로운 기법과 탐지된 표적의 유효성을 검증하는 기법을 제안한다. 기존의 부엽 표적 제거 방식은 보조 안테나의 설계 및 제작이 필수적이었으며, 이로 인해 시스템 복잡성과 비용이 증가하는 한계가 있었다. 반면, 제안하는 방법은 배열 안테나 자체가 갖는 고유의 모노펄스 특성을 활용하므로, 추가적인 하드웨어 없이도 주엽 표적을 효과적으로 식별할 수 있는 장점이 있다.

주엽 표적 탐지 기법은 방위각과 고각에서 관측되는 모노펄스 비율의 분포 특성을 이용한다. 표적의 위치에 따라 모노펄스 비율은 주엽과 부엽에서 다른 양상을 나타내며, 이러한 차이를 판별 기준으로 활용할 수 있다. 그림 1은 표적 위치에 따른 모노펄스 비율의 특성을 보여주며, 이를 기반으로 본 논문에서는 식 (1)과 같은 판별식을 정의하였다.

$$\left\{ \text{Im} \left(\frac{\Delta_a}{\Sigma} \right) \right\}^2 + \left\{ \text{Im} \left(\frac{\Delta_c}{\Sigma} \right) \right\}^2 \leq 1 \quad (1)$$

식 (1)에서 Δ_a 와 Δ_e 는 각각 표적 탐지 후보군의 방위각 차 채널과 고각 차 채널의 값이며, Δ 는 합 채널의 값이다.

차/합 채널의 복소 비율은 다음과 같이 진폭과 위상 성분을 동시에 포함한다. 이때 실수부는 채널 간 이득 불균형, 온도 변화, 보정 오차와 같은 시스템 요인의 영향을 직접적으로 받아, 동일한 표적이라 하더라도 환경 변화에 따라 값이 크게 변동될 수 있다. 반면 허수부는 위상 차에 주로 의존하며, 주엽 영역에서는 이론적으로 0 부근으로 수렴하고 부엽 영역에서는 상대적으로 큰 값을 갖는 특징을 보인다. 따라서 허수부를 중심으로 판별식을 구성할 경우, 하드웨어 보정 오차에 대한 민감도를 낮추면서 주엽/부엽 판별 성능을 안정적으로 유지할 수 있다.

식 (1)에서 사용된 임계값 1은 정규화된 모노펄스 비율 공간에서 단위원에 해당하는 기준으로 설정되었다. 이는 주엽 영역에서 나타나는 정상적인 모노펄스 비율 범위를 포함하면서, 부엽이나 외란 신호를 효과적으로 배제할 수 있는 단순한 판별 경계이다. 본 연구에서는 실제 비행시험 데이터를 기반으로, 단위원 경계가 주엽 표적과 부엽 표적 사이에서 합리적인 절충점을 제공함을 확인하였으며, 따라서 본 논문에서는 이를 경험적으로 결정된 기본 임계값으로 채택하였다.

다만, 임계값은 고정적인 절댓값으로 간주되기보다는 시스템 구조, 보정 상태, 운용 목적에 따라 조정 가능한 파라미터로 해석하는 것이 타당하다. 따라서 실제 운용

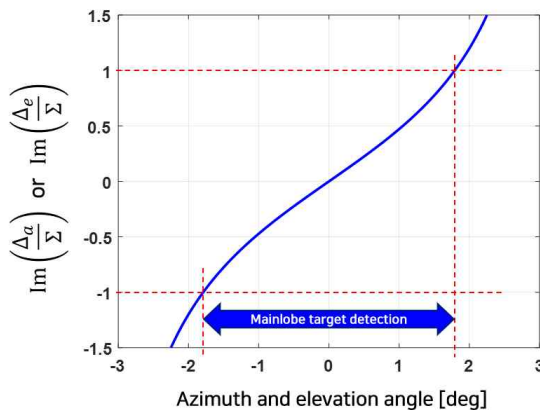


그림 1. 표적 위치에 따른 모노펄스 비율 특성
Fig. 1. Monopulse ratio characteristics for different target locations.

환경에서는 초기 운용 시험이나 교정 데이터를 바탕으로 임계값을 소폭 변경하여, 사용자의 요구 성능에 맞추어 최적화할 수 있다.

식 (1)의 조건을 만족하는 경우 해당 표적은 주엽 내에 존재하는 것으로 판단하고, 조건을 만족하지 않는 경우에는 부엽에 위치한 표적으로 간주하여 제거한다. 이 과정은 복잡한 연산을 요구하지 않으며, 상대적으로 단순한 계산만으로 수행 가능하다는 점에서 구현 효율성이 높다.

2.2 유효성 검증 기법

탐지된 표적이 실제로 의미 있는 표적인지를 추가로 검증하기 위해, 본 논문에서는 식 (2)의 유효성 검증 기법을 제안한다.

$$u^2 + v^2 \leq 1 \tag{2}$$

위 식에서 u 와 v 는 각각 u/v 도메인에서 표적이 위치한 u 값 및 v 값이며, 식 (3)과 같이 계산할 수 있고, 방위각과 고각과는 식 (4)의 관계가 있다.

$$u = u_0 + \Delta u, v = v_0 + \Delta v \tag{3}$$

$$u = \cos(el) \sin(az), v = \sin(el) \tag{4}$$

식 (3)에서 u_0 와 v_0 는 각각 u/v 도메인에서 안테나의 빔 지향 값이며, Δu 와 Δv 는 각각 빔 지향점에서 벗어난 표적의 위치값이다. 식 (4)에서 az 와 el 는 각각 표적의 방위각 및 고각의 값이다.

식 (2)의 조건을 만족하는 경우, 탐지된 표적은 유효한 것으로 판정하며, 조건을 만족하지 않을 경우에는 잡음, 클러터, 또는 허위 표적(false target)으로 간주하여 제거한다. 이 검증 과정은 식 (1)과 동일하게 단순한 연산으로 수행 가능하므로, 제안 기법은 낮은 연산 복잡도를 유지하면서도 탐지 신뢰성을 크게 향상시킬 수 있다.

실제 레이더 운용 환경에서는 다양한 요인으로 인해 $u^2 + v^2 > 1$ 인 값이 발생할 수 있으며, 이는 물리적으로 불가능한 영역임에도 불구하고 신호처리 과정에서는 종종 발생한다. 첫째, 레이더와의 거리가 충분히 확보되지 않은 근접장 표적(near-field target)의 경우 파면이 곡면 형태

를 띠게 되며, 평면과 가정에 기반한 u/v 도메인 해석에서는 비물리적인 좌표계 계산될 수 있다. 예를 들어, 이륙 직후의 항공기 레이더는 활주로 주변 차량이나 조류, 지형지물에서 강한 근접 반사를 수신하게 되며, 이때 일부 신호는 $u^2+v^2>1$ 로 투영될 수 있다. 둘째, 신호 대 잡음비(signal to noise ratio)가 낮은 미세 표적을 탐지할 때 모노펄스 비율 추정치의 왜곡으로 인해 이러한 오탐지 표적이 발생할 수 있다. 셋째, 지상이나 해수면 반사에 따른 다중경로(multipath) 신호 역시 원거리 평면과 조건을 벗어난 비정상적인 경우를 발생시킬 수 있다. 해상 탐지 레이더에서는 해수면 산란이 강한 다중경로를 만들어내며, 항공기 레이더는 저고도에서 산 능선이나 건물 반사로 인해 비물리적인 표적을 검출할 수 있다.

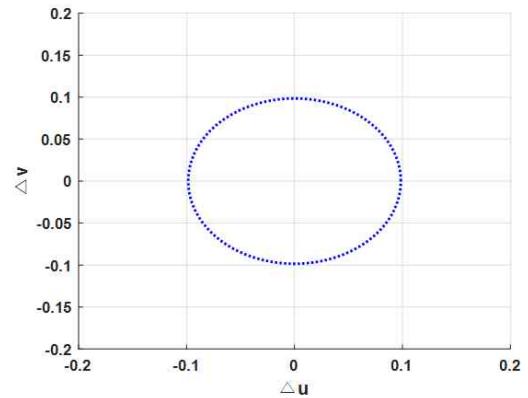
따라서 본 논문에서 제안하는 식 (2)의 조건은 원거리 평면과 가정을 기반으로 한 유효성 검증 기준으로서 매우 효과적이다. 특히 장거리 표적 탐지가 주목적인 환경에서는 잡음, 다중경로, 허위 표적을 단순하고 효율적으로 제거할 수 있다. 그러나 근접장 표적이나 저고도 위협체와 같이 레이더 근방에서 탐지해야 하는 경우에는, 본 조건을 그대로 적용할 경우 실제 유효 표적을 제거할 위험이 존재한다. 따라서 본 조건은 독립적인 절대 기준이라기보다는 CFAR(constant false alarm rate) 검출 기반의 탐지 방법, 다중경로 보정 기법과 같은 보조 처리와 결합하여 사용될 때 큰 효과를 발휘한다. 즉, 제안된 검증 조건은 구현의 단순성과 연산 효율성을 유지하면서도 잡음 억제 및 신뢰성 향상에 기여할 수 있으며, 실제 운용 환경에서는 표적 특성 및 레이더 모드에 따라 선택적으로 적용하는 것이 바람직하다.

한편, 식 (2)는 원거리 평면과 가정을 기반으로 유도되었으므로, 근접장 영역이나 저고도 비행, 그리고 강한 다중경로가 존재하는 환경에서는 해당 가정이 완전히 성립하지 않을 수 있다. 이와 같은 상황에서는 일부 유효 표적 신호가 간섭 성분과 함께 제거되어, 탐지 성능이 저하될 가능성이 존재한다. 따라서 실제 운용에서는 운용 조건에 따라 다음과 같은 보완 절차를 적용하는 것이 도움이 될 수 있다. 첫째, 근접장 모드 또는 저고도 환경에서는 임계값을 다소 완화하여 유효 표적의 누락 가능성을 최소화한다. 둘째, 제안 기법을 단독으로 사용하기보다는 CFAR

기반 검출 및 추적 알고리즘과 결합하여, 시간적 일관성을 활용한 재확인 과정을 추가할 수 있다. 셋째, 강한 지상 반사나 수면 반사로 인한 다중경로가 예상되는 경우에는, 별도의 다중경로 보정 기법과 병행 적용함으로써 표적 신호의 왜곡을 감소시키는 것이 효과적이다. 이러한 운용 가이드는 본 논문에서 제시된 방법의 적용 범위를 명확히 하고, 다양한 실제 운용 환경에서의 안정적인 활용을 지원하기 위한 것이다.

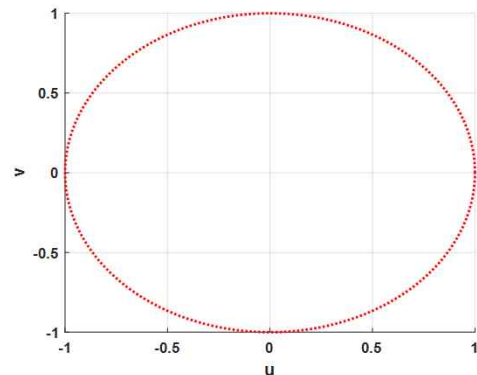
2-3 u/v 도메인에서의 제안 기법 특성

그림 2는 제안한 주엽 표적 탐지 기법(식 (1))과 유효성



(a) 주엽 표적 탐지

(a) Mainlobe target detection



(b) 유효성 검증

(b) Validity verification

그림 2. u/v 도메인에서 제안 기법

Fig. 2. Illustration of the proposed methods in the u/v domain.

검증 기법(식 (2))을 w/v 도메인에서 시각적으로 나타낸 그림이다. 식 (1)의 판별 조건을 적용한 경우 주엽 영역에 존재하는 표적이 안정적으로 탐지될 수 있음을 볼 수 있으며, 이를 통해 제안 기법이 부엽 신호를 효과적으로 억제하고 주엽 표적만을 선택적으로 식별할 수 있음을 알 수 있다. 또한, 식 (2)의 조건을 적용하면 물리적으로 타당한 영역 내의 표적만이 유효한 것으로 판별됨을 확인할 수 있다. 즉, 이 그림은 제안 기법이 단순한 수학적 판별식을 통해 주엽 표적 탐지와 물리적 유효성 검증을 각각 확인할 수 있음을 시각적으로 보여주는 예시라 할 수 있다.

III. 비행시험 기반 제안 기법의 실효성 검증

3-1 비행시험 환경 및 레이더 시스템

제안한 주엽 표적 탐지 기법 및 유효성 검증 기법의 실효성을 평가하기 위해, 능동 전자 주사 배열(AESA, active electronically scanned array) 레이더를 시험 항공기(FTB, flying test bed)에 탑재하여 실제 비행시험을 수행하였다 [17],[18]. 사용된 레이더 시스템과 시험 항공기는 그림 3에 나타나었고, 비행시험에 적용된 레이더 운용 관련 파라미터의 대략적인 수치를 표 1에 정리하였다. 본 표에는 운용 주파수 대역, PRI(pulse repetition interval), PRF(pulse repetition frequency), 항공기 고도와 속도, 그리고 대표적인 표적 경사 거리(slant range) 등 시험 환경과 직접적으로 관련된 핵심 파라미터를 포함하여, 이후 제안 기법의 성능 해석에



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

표 1. 비행시험에서의 레이더 운용 파라미터
Table 1. Radar operating parameters in the flight test.

Parameter	Value
Operating frequency band	X-band
Pulse repetition interval (PRI)	200 us (approx.)
Pulse repetition frequency (PRF)	5 kHz (approx.)
Aircraft altitude	1.5 km (approx.)
Aircraft speed	150 m/s (approx.)
Target slant range	5 km (approx.)

필요한 전제 조건을 명확히 제시하고자 하였다.

시험 항공기는 민간 항공기 B-737을 기반으로 개조된 플랫폼으로, 기수(노즈) 전방부에 전용 레이더를 장착하고 내부에 AESA 레이더를 설치하였다. 본 시험 항공기는 국내 최초로 구축된 전용 레이더 시험 플랫폼으로서, 다양한 고도·속도·비행 조건에서 레이더 성능을 직접 검증할 수 있도록 설계되었다. 이를 통해 실제 운용 환경에서 발생할 수 있는 다양한 전자기적·기상적 변수들을 반영한 검증이 가능하며, 신뢰성 있는 AESA 레이더 개발을 위한 필수적인 시험 환경을 제공한다.

탑재된 AESA 레이더는 X 밴드 주파수 대역을 사용하며, 전자적으로 빠른 빔 조향이 가능하다. 이와 같은 시험 환경은 제안 기법이 실제 운용 환경과 유사한 조건에서 성능을 발휘할 수 있는지를 평가하는 데 필수적이며, 본 연구에서는 확보된 비행시험 데이터를 기반으로 제안 기법의 적용 가능성과 실효성을 검증하였다.

비행시험은 고도 약 1.5 km, 기체 속도 약 150 m/s 범위에서 수행되었으며, 강수는 없는 비교적 안정한 기상 조건에서 진행되었다. 시험 구간은 해상과 내륙 지역을 모두 포함하도록 구성하여, 수면 반사에 의한 다중경로 영향과 지형에 따른 지상 반사 변화가 함께 반영되도록 하였다. 이와 같은 조건은 실제 운용 환경에서 발생 가능한 전자기적 변화를 일정 수준 반영하면서, 기상 변수에 따른 불확실성을 최소화하기 위한 목적에서 설정되었다.

3-2 비행시험 데이터 기반 제안 기법 적용 및 결과 분석

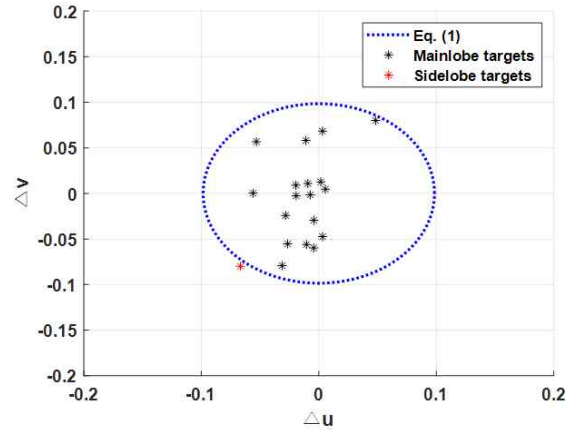
비행시험으로부터 획득된 데이터를 대상으로, 본 연구에서 제안한 주엽 탐지 기법과 유효성 검증 기법의 적용

결과를 분석하였다. 우선, 비행시험 환경에서 수집된 원시 레이더 데이터를 전처리한 뒤, 거리-도플러 영역으로 변환하여 표적 탐지를 수행하였다. 탐지 과정에는 레이더 신호처리 분야에서 널리 활용되는 CFAR 탐지 기법을 적용하였으며, 이를 통해 주엽 표적과 부엽 표적이 혼재된 초기 탐지 결과를 확보하였다.

제안한 주엽 탐지 기법을 비행시험 데이터에 적용하여, 탐지된 표적을 식 (1)의 판별 기준에 따라 주엽 표적과 부엽 표적으로 구분하였다. 그 결과, 기존 CFAR 탐지 결과에서 혼재되어 나타나던 부엽 표적이 효과적으로 억제되었으며, 주엽 방향의 표적이 잘 나타남을 확인할 수 있었다. 이는 제안 기법이 단순한 표적 검출을 넘어, 탐지된 표적 내에서 의미 있는 주엽 표적을 선별하는 데 효과적임을 보여준다.

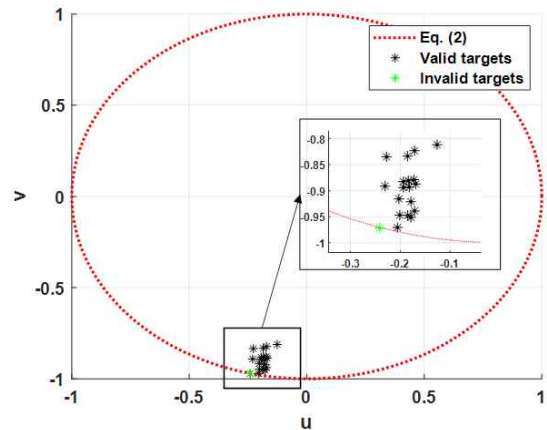
이어, 탐지된 표적에 대해 식 (2)의 유효성 검증 기법을 적용하여 허위 표적 여부를 판별하였다. 실제 비행시험 데이터에서 비물리적인 허위 표적이 포함되는 경우가 있었으며, 제안 기법은 식 (2)를 만족하지 않는 신호를 허위 표적으로 정확히 식별하여 제거하였다. 이를 통해 제안된 유효성 검증 절차가 단순한 개념적 제안에 그치지 않고, 실제 환경에서도 허위 표적을 억제하는 실질적인 성능을 가짐을 확인하였다.

이러한 분석 결과는 그림 4에 제시하였다. 그림 4(a)는 주엽 표적 탐지 기법 적용 결과로, 주엽 표적(식 (1) 만족)을 검은색 별, 부엽 표적(식 (1) 불만족)을 빨간색 별로 표시하였다. 또한, 파란색 점선은 식 (1)에서 정의한 판별 경계를 시각적으로 나타내어, 제안 기법이 주엽 표적과 부엽 표적을 효과적으로 분리함을 직관적으로 확인할 수 있다. 그림 4(b)는 유효성 검증 기법 적용 결과를 보여주며, 유효한 표적(식 (2) 만족)을 검은색 별, 허위 표적(식 (2) 불만족)을 녹색 별로 구분하였다. 또한, 빨간색 점선은 식 (2)에서 정의한 판별 경계를 시각적으로 나타낸다. 이를 통해 제안 기법이 실제 비행시험 데이터에서도 유효한 표적과 허위 표적을 구분할 수 있음을 실험적으로 입증하였다. 더 나아가, 본 결과와 유효성 검증 기법의 이론적 근거를 종합해 볼 때 향후, 클러터, 다중 반사, 전자전 환경과 같은 복잡한 운용 조건에서도 비물리적 탐지를 효과적으로 제거하는 데 기여할 수 있을 것으로 기대된다.



(a) 주엽 표적 탐지

(a) Mainlobe target detection



(b) 유효성 검증

(b) Validity verification

그림 4. 비행시험 데이터에 제안 기법을 적용한 결과
Fig. 4. Results of applying the proposed method to flight test data.

본 연구에서는 제안 기법의 개념적 타당성과 실운용 가능성 확인에 초점을 맞추어, 비행시험 데이터를 기반으로 주엽 표적 탐지 성능 및 허위 표적 억제 성능을 중심으로 분석하였다. 한편, 기존 CFAR와의 성능 차이를 보다 정량적으로 평가하기 위해서는 탐지 확률-오경보 확률 곡선과 같은 통계적 지표가 유용하나, 신뢰성 있는 곡선을 도출하기 위해서는 다양한 운용 시나리오를 포함하는 대량의 데이터가 요구된다. 본 연구에서 확보된 비행시험 데이터는 실제 운용 환경을 충실히 반영한다는 장점이 있으나, 안전 및 운용 제약으로 인해 데이터 규모가

제한되어, 현 단계에서 탐지 확률-오경보 확률 곡선을 제시할 경우 통계적 신뢰도가 충분하지 않을 수 있다. 따라서 본 논문에서는 해당 결과 제시는 생략하고, 향후 확대된 비행시험 데이터와 시뮬레이션 기반 데이터 세트를 결합하여 보다 체계적인 정량 비교 연구를 수행할 예정이다.

종합하면, 제안된 기법은 비행시험 데이터를 통해 주엽 표적 탐지 성능과 부엽 억제 성능을 명확히 입증하였으며, 동시에 유효성 검증 기법이 허위 표적 제거에 효과적으로 작용함을 확인하였다. 단순한 연산 구조로 실시간 적용 가능성이 충분하고, 다양한 환경에서 탐지 신뢰성을 보장할 수 있는 핵심 절차로 기능할 수 있다. 따라서 본 연구 결과는 제안 기법이 AESA 레이더를 포함한 펄스 도플러 레이더 운용 환경에서도 실질적인 주엽 표적 탐지 및 유효성 검증 절차로 활용될 수 있음을 보여주며, 향후 다양한 운용 조건에서의 추가 검증을 통해 그 적용 범위가 더욱 확대될 것으로 기대된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 펄스 도플러 레이더 시스템에서 추가적인 하드웨어 없이 주엽 표적을 정밀하게 탐지하고 부엽 간섭을 효과적으로 억제하기 위한 모노펄스 비율 기반의 판별 기법과 u/v 도메인의 물리적 특성을 활용한 유효성 검증 기법을 제안하였다. 제안된 기법은 안테나 배열 고유의 모노펄스 비와 좌표계의 기하학적 제약 조건을 수식화함으로써, 기존의 보조 안테나 방식이 가졌던 하드웨어적 복잡도와 배열 소자 간의 상호 간섭 및 보정 문제 등을 근본적으로 해결하였다. 특히, 복잡한 적응형 알고리즘 대신 단순하면서도 직관적인 수식 판별을 통해 부엽 표적과 비물리적 허위 신호를 배제할 수 있는 이론적 토대를 마련하였으며, 이는 연산 자원이 제한된 소형 플랫폼 환경에서도 실시간 신호처리가 가능함을 시사한다.

국내 최초의 전용 레이더 시험 플랫폼인 FTB에 탑재된 AESA 레이더를 활용한 실제 비행시험 결과, 제안 기법은 기존 CFAR 방식에서 발생하는 부엽 오탐지를 획기적으로 줄이면서도 주엽 방향의 유효 표적을 안정적으로 탐지하는 신뢰성 있는 성능을 입증하였다. 이는 제안된 이

론이 단순히 수치 시뮬레이션에 그치지 않고, 복합적인 클러터와 전자기적 변수가 존재하는 실제 운용 환경에서도 그 실효성을 충분히 확보하고 있음을 보여준다. 이러한 결과는 경량화와 저비용화가 필수적인 차세대 항공 플랫폼 및 레이더 시스템 설계에 실용적인 대안을 제시하며, 향후에는 다중 표적 상황 및 극심한 전자전 환경으로의 확장을 통해 레이더의 운용 안정성을 더욱 고도화할 예정이다.

References

- [1] G. Morris, L. Harkness, *Airborne Pulsed Doppler Radar*, Norwood, MA, Artech House, 1996.
- [2] M. I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, New York, NY, McGraw-Hill, 2001.
- [3] C. Alabaster, *Pulse Doppler Radar*, New York, NY, SciTech Publishing, 2012.
- [4] W. L. Melvin, J. A. Scheer, *Principles of Modern Radar Vol. III: Radar Applications*, New York, NY, SciTech Publishing, 2014.
- [5] Y. J. Kong, S. H. Sohn, H. W. Moon, D. G. Yoo, Y. H. Jang, and E. Yang, "Clustering method using a monopulse for divided detection of closely spaced airborne targets," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 32, no. 6, pp. 566-574, Jun. 2021.
- [6] J. Choi, I. S. Koh, and J. Jung, "Airborne monopulse radar echo signal generation from surface clutter including weather clutter effect," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 33, no. 8, pp. 626-634, Aug. 2022.
- [7] T. H. Kim, J. H. Park, J. T. Park, M. I. Kang, and H. S. Lee, "Study on the precise measurement of sea level altitude of monopulse radar on a ship," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 34, no. 6, pp. 477-488, Jun. 2023.
- [8] J. Chun, J. Jung, J. Woo, and S. Park, "Circular mean of scatterers' angles as the mode of angle estimates with monopulse radar," *The Journal of Korean Institute of*

- Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 34, no. 8, pp. 647-650, Aug. 2023.
- [9] I. J. Gupta, J. Ward, "Effects of desired signal on the performance of a sidelobe canceller," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 37, no. 9, pp. 1109-1115, Sep. 1989.
- [10] X. Yang, P. Yin, T. Zeng, and T. K. Sarkar, "Applying auxiliary array to suppress mainlobe interference for ground-based radar," *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol. 12, pp. 433-436, Mar. 2013.
- [11] Y. Wang, D. Zhu, G. Jin, Q. Yu, P. Wang, and S. Niu, "A robust digital beamforming on receive in elevation for airborne MIMO SAR system," *IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing*, vol. 60, pp. 1-19, Aug. 2022.
- [12] R. Miura, "Spatial utilization and suppression of multipath signals by maximal-ratio-combining digital beamformer for mobile radios," in *1997 IEEE 47th Vehicular Technology Conference. Technology in Motion*, Phoenix, AZ, May 1997, pp. 1508-1512.
- [13] Y. Lu, B. K. Yeo, "Adaptive wide null steering for digital beamforming array with the complex coded genetic algorithm," in *Proceedings 2000 IEEE International Conference on Phased Array Systems and Technology*(Cat. No. 00TH8510), Dana Point, CA, May 2000, pp. 557-560.
- [14] Z. Sipus, S. Skokic, M. Bosiljevac, and N. Burum, "Study of mutual coupling between circular stacked-patch antennas on a sphere," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 56, no. 7, pp. 1834-1844, Jul. 2008.
- [15] Y. I. Wu, G. P. Arada, W. Y. Tam, and K. T. Wong, "Mis-modeling and mis-correction of mutual coupling in an antenna array: A case study in the context of direction finding using a linear array of identical dipoles," in *2016 IEEE International Conference on Signal and Image Processing(ICSIP)*, Beijing, Aug. 2016, pp. 447-451.
- [16] T. Bird, *Mutual Coupling Between Antennas*, Hoboken, NJ, John Wiley & Sons, 2021.
- [17] 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 Korean Institute of Information Technology*, vol. 23, no. 4, pp. 135-143, Apr. 2025.
- [18] H. Ju, D. Kim, T. Jeong, and B. Cho, "Study on a hit clustering algorithm for separating ground clutter signals in FTT of airborne radar," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 36, no. 7, pp. 665-673, Jul. 2025.

정 태 희 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-6427-8410>



2009년 2월: 한양대학교 전자통신컴퓨터공학부 (공학사)
 2011년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
 2024년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학부 (공학박사)
 2011년 1월~현재: 국방과학연구소 3기술

연구원 4부 선임연구원

[주 관심분야] 레이더 신호처리, 표적 탐지, 레이더 시스템

김 소 연 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-2424-0095>



2012년 2월: 세종대학교 지구정보공학과 (공학사)
 2014년 8월: 세종대학교 지구정보공학과 (공학석사)
 2015년 9월~현재: 국방과학연구소 3기술연구원 4부 선임연구원
 [주 관심분야] 레이더 신호처리, 레이더

시스템

김진욱 [한화시스템/전문연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-7162-0974>



2012년 2월: 충남대학교 메카트로닉스공학과 (공학사)
2014년 7월: 충남대학교 기계설계메카트로닉스공학과 (공학석사)
2017년 2월~현재: 한화시스템 항공레이다 체계팀 전문연구원
[주 관심분야] 레이더 신호처리, 레이더

시스템 설계

김영주 [한화시스템/전문연구원]

<https://orcid.org/0009-0003-1829-9039>



2006년 2월: 상명대학교 소프트웨어컴퓨터공학과 (공학사)
2006년 5월~2012년 2월: Digitalcraft 선임연구원
2012년 4월~2016년 6월: 한컴MDS 책임연구원
2016년 7월~현재: 한화시스템 SW팀 전문

연구원

[주 관심분야] 레이더 데이터처리, 운영체제

최민준 [한화시스템/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-9362-479X>



2019년 2월: 한양사이버대학교 컴퓨터공학과 (공학사)
2022년 2월: 한서대학교 항공전자공학과 (공학석사)
2013년 3월~2023년 11월: 공군 항공소프트웨어지원소
2023년 12월~현재: 한화시스템 항공레이

다체계팀 선임연구원

[주 관심분야] 레이더 신호처리, 레이더 시스템 설계

조현호 [한화시스템/전문연구원]

<https://orcid.org/0009-0001-7800-5616>



2010년 2월: 건국대학교 인터넷미디어공학 (공학사)
2010년 7월~2016년 3월: LG전자 주임연구원
2016년 4월~현재: 한화시스템 SW팀 전문연구원
[주 관심분야] 레이더 제어, 표적 탐지, 레

이다 시스템

장지연 [한화시스템/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-4763-7458>



2022년 2월: 인하대학교 전기공학과 (공학사)
2024년 2월: 인하대학교 전기컴퓨터공학과 (공학석사)
2023년 8월~현재: 한화시스템 항공레이다 체계팀 선임연구원
[주 관심분야] 레이더 신호처리, 레이더

시스템 설계

원종민 [한화시스템/전문연구원]

<https://orcid.org/0009-0007-6411-9042>



2012년 2월: 숭실대학교 정보통신전자공학부 (공학사)
2014년 2월: 숭실대학교 전자공학과 (공학석사)
2020년 3월: 한화에어로스페이스 종합연구소 주임연구원
2020년 4월~현재: 한화시스템 SW팀 전문

연구원

[주 관심분야] 레이더 신호처리, 레이더 시스템

조 병 래 [국방과학연구소/책임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-9160-3362>



1999년 2월: 경북대학교 전자전기공학부
(공학사)

2001년 2월: 포항공과대학교 전자전기공
학과 (공학석사)

2005년 2월: 포항공과대학교 전자전기공
학과 (공학박사)

2006년 1월~현재: 국방과학연구소 3기술
연구원 4부 책임연구원

[주 관심분야] 레이더 신호처리, 영상레이더