

신호처리 및 추적 알고리즘을 고려한 항공기탐재 레이다 거리 분해 성능 검증

A Study of Range Resolving Performance for Airborne Radar Based on Signal Processing and Tracking Algorithm

박연희 · 김용민
국방과학연구소

Yeonhee Pak · Yong-min Kim

Agency for Defense Development, Daejeon 34060, Korea

[요 약]

레이다의 주요 성능 규격 중 하나인 거리 분해능은 동일한 속도 및 각도의 두 표적을 거리 상으로 분해할 수 있는 성능과 관련된 지표이다. 일반적으로 레이다 성능 규격에 정의된 분해능은 실제 두 표적 분해 관점이 아닌 송신 펄스 폭으로 정의된다. 송신 펄스 폭 수치는 설계 측면의 성능 규격일 뿐, 두 표적을 분해할 수 있는 최소 거리를 의미하는 것이 아니다. 본 논문에서는 송신 펄스 폭과 레이다 알고리즘을 동시에 고려하여 동일한 속도 및 각도 정보를 가지는 두 신호가 거리 차이로 분해되어 개별 추적개시로 이어질 수 있는 최소 거리차이에 대해 분석한다. 분해능 이외의 다른 외부 간섭을 배제하기 위해 비콘(Beacon) 신호를 활용한 루프랩(Roof-lab) 환경에서 지상시험을 수행하였고, 탐지 단계에서는 신호처리 알고리즘에 의해 개별 탐지 성능이 결정되고, 추적 형성 단계에서는 데이터 연관을 통한 중복성 검사 알고리즘에 의해 분해 성능이 결정되는 것을 확인하였다.

[Abstract]

Range resolution is the ability to distinguish different targets placed in same angular direction but at different distances from the radar. Normally, Range resolution requirement is defined as the width of transmitting pulse. The width of transmitting pulse does not mean the ability to distinguish two different targets. Range resolution performance to detect and track targets separately depends on the signal processing and tracking algorithm not only the width of transmitting pulse. This paper analyzes the processing steps in algorithms to affect the range resolution performance and verifies the results by roof-lab ground test using beacon signal. As a result, to track targets with the same angular position separately, it is desirable to have larger range difference than plot-track association test gate.

Key word : Airborne radar, Range resolution, Roof-lab test, Signal processing, Track acquisition.

<http://dx.doi.org/10.12673/jant.2023.27.5.568>



This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License (<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

Received 21 September 2023; Revised 12 October 2023
Accepted (Publication) 24 October 2023 (30 October 2023)

*Corresponding Author; Yeonhee Pak

Tel: *** - *** - ****

E-mail: yhpak@add.re.kr

I. 서론

속도 및 거리 정보로 표적을 탐지하는 펄스 도플러 레이더는 한 빔 내에 동일한 속도 및 거리를 가지는 두 표적을 구분할 수 없다는 한계가 있다. 이러한 펄스 도플러 레이더에서 유사한 두 표적을 분리하여 탐지할 수 있는 최소 거리차이 성능을 거리 분해능이라고 정의한다[1]. 이론적으로 송신 파형의 3 dB 펄스 압축 폭을 레이더 성능 요구사항 측면의 분해능으로 정의하지만, 신호처리 및 추적 알고리즘의 영향으로 실제 두 표적이 분해되어 탐지 추적이 가능한 최소 거리는 이론적으로 정의된 분해능 수치보다 크다.

본 논문에서는 동일 각도에 밀집해있는 두 표적 신호를 거리 차이로 구분해 탐지하고 개별로 추적을 개시할 수 있는 성능에 영향을 미치는 알고리즘 요소에 대해 정리한다. 또한 이러한 알고리즘의 영향으로 파형적으로 정의된 이론적인 거리 분해능 수치 대비 실제 두 표적 분해가 이루어지는 운용성 측면에서의 거리 분해 성능을 검증한다. 거리 분해 성능 이외의 외부 간섭 요소를 배제하기 위하여 비콘(Beacon) 신호를 활용한 루프랩(Roof-lab) 환경에서 데이터를 획득하고 분석을 수행하였다.

II. 본론

2-1 거리 분해 성능에 영향을 미치는 알고리즘

레이더 공대공모드의 알고리즘 처리 흐름은 다음 그림 1. 과 같다[2]. 그림 1.과 같이 레이더로 수신된 신호는 펄스 압축, 도플러 처리 등 신호의 가공을 통해 원하는 정보를 추출하여 최종 추적형성에 이르게 된다. 이러한 처리 과정에서 표적의 거리 분해 성능에 영향을 미치는 과정은 펄스 압축, 히트 클러스터링 (Hit clustering), 플롯(Plot) 추출, 데이터 연관 블록이다.

(1) 펄스 압축

3 dB 펄스 압축폭으로 정의되는 거리 분해능은 펄스폭이 작을수록 성능이 향상된다. 그러나 무조건 펄스폭이 작은 파형을 사용하는 것은 신호 전력 측면에서 바람직하지 않으므로 펄스 압축 과정을 통해 거리 분해능을 향상시킬 수 있다[3]. 그림 2와 같이 펄스 압축 기법은 선형 주파수 변조된 신호를 송신 후 송신 신호와 수신 신호간의 상관 연산을 수행하는 정합필터 (matched filter) 연산을 통해 이루어진다[4].

(2) 히트 클러스터링 (Hit clustering)

RD 맵(range-Doppler map)에서 여러 셀에 걸쳐 탐지된 결과들을 적절한 단위로 분류하여 정확한 표적 수 추정과 분류된 추적 정보를 획득하는 과정이다. 그림 3은 x축은 도플러 속도, y축은 거리인 RD 맵을 나타내며, 밝은 색으로 표시된 것은 표

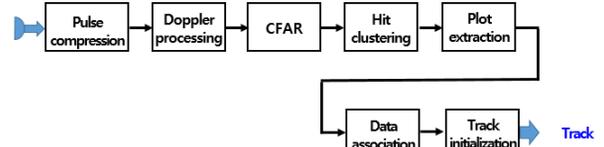


그림 1. 공대공모드 알고리즘 블록도
Fig. 1. Block Diagram of air-to-air radar algorithm

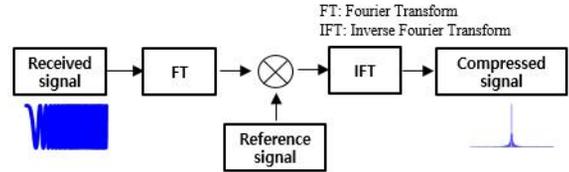


그림 2. 펄스 압축 과정
Fig. 2. Pulse compression

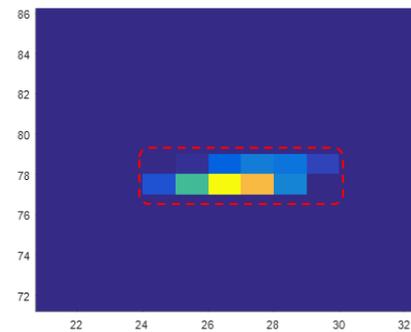


그림 3. 히트 클러스터링 과정의 예 (x축 : 도플러, y축 : 거리)
Fig. 3. Example of hit clustering (x axis : Doppler, y axis : range)

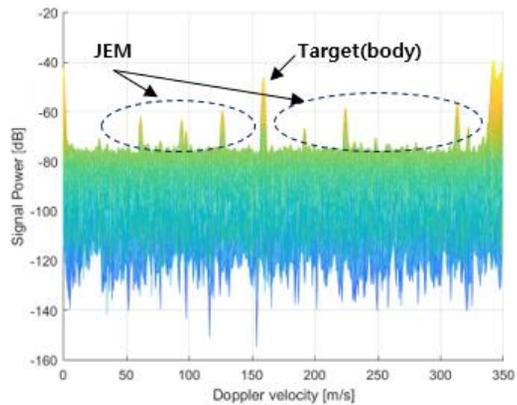


그림 4. JEM 신호의 예
Fig. 4. Example of JEM signal

적 탐지를 위한 임계값을 넘는 신호가 수신된 셀을 나타낸다. 이 때 신호가 탐지된 모든 셀을 각각의 신호로 판단하는 것이 아니라 밝은 점선으로 표시한 것과 같이 인접한 여러 셀에서의 탐지 결과를 묶어 하나의 신호로 판단한다. 그러므로 두 표

적의 거리 정보가 매우 유사할 경우 히트 클러스터링 과정에서 신호가 하나로 합쳐져 분해가 불가능할 수 있다. 따라서 히트 클러스터링 과정에서 신호가 분리될 수 있도록 적절한 거리 차이가 필요하다.

(3) 플롯 추출 (Plot 추출)

플롯 추출 단계에서는 불필요한 JEM (jet engine modulation)[5] 신호를 제거하기 위해 도플러 (Doppler) 축으로 가장 전력기강한 신호를 기준으로 특정 거리 범위 이내인 신호는 삭제하는 과정이 수행된다. JEM 신호란 제트 엔진을 운영하는 항공기 표적에서 발생하는 현상으로, 표적의 몸체에서 반사되는 본 신호 외에 제트 엔진의 날개에 의해 동일 거리, 다른 도플러 정보를 가지는 원치 않는 신호가 탐지되는 것을 말한다. 그림 4는 JEM 신호가 탐지된 예시이며, 중앙의 전력이 가장 센 신호가 표적의 본 신호, 주파수 축으로 비교적 전력이 낮은 여러 신호가 탐지된 것이 제트 엔진에 의한 불필요한 신호이다. 즉, 히트 클러스터링 단계에서 표적 신호가 분리되더라도 본 로직에 의해 JEM 신호 제거 범위 이내로 거리가 유사한 신호는 삭제되므로 개별 추적 개시로 이어지지 못한다.

위의 과정을 통과해 최종적으로 탐지된 결과를 플롯이라 한다.

(4) 데이터 연관을 통한 중복성 검사

데이터 연관 과정은 신규 탐지된 플롯과 기존 추적과의 비교를 통해 중복 추적개시를 방지하기 위한 과정이다. 신규 탐지된 플롯에 대해 중복성 검사를 수행하지 않고 바로 추적개시한다면, 한 개의 표적에 대한 여러개의 중복추적이 형성되어 조종사가 임무를 수행하는 데 혼돈을 줄 수 있다. 두 표적 중 한 표적이 먼저 추적에 진입하고 남은 표적이 추적으로 개시되어야 하는 상태를 가정한다. 이때 추적 진입 전인 표적의 탐지 플롯과 먼저 개시된 추적과의 비교를 수행하는데, 두 표적의 정보가 매우 유사하여 기 추적중인 표적과 동일한 신호라고 판단될 경우, 실제로 서로 다른 표적이라고 하더라도 중복성 검사를 통과하지 못하고 플롯이 삭제되고 만다. 결론적으로, 두 표적의 신호가 각각 탐지되더라도 각각의 추적이 형성되기 위해서는 중복성 검사를 통과하기 위한 범위 이상의 거리 차이를 보유해야 한다. 플롯과 추적 간의 연관은 NDS (normalized distance squared) 거리를 비교하는 검사를 통해 수행되며, 플롯 및 추적의 측정값과 필터를 통한 예측값 등을 활용해 계산된다. 해당 과정에 대해서는 기존 연구[6]에서 다뤄졌으며, 본 논문의 범주에서는 제외한다.

즉, 레이더가 다수의 표적 신호를 구분하여 탐지하고 추적하는 성능은 단순히 이론적으로 정의된 3 dB 펄스 압축폭만으로 정의되는 것이 아니라 이러한 알고리즘 수행을 통해 최종적으로 결정되는 것으로 볼 수 있다.

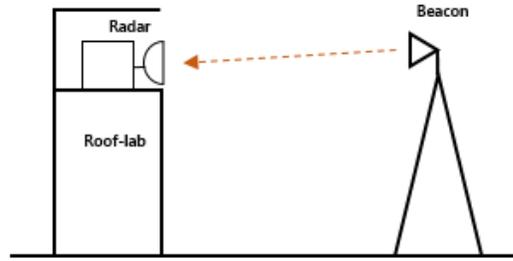


그림 5. 비콘 신호 모의기와 레이더로 구성된 루프랩 시험환경
Fig. 5. Roof-lab environment with beacon tower and radar

2-2 시험 환경

2-1 절에서 설명한 알고리즘을 바탕으로 표적의 거리 차이에 따른 개별 추적 성능을 확인하기 위해 그림 5와 같은 루프랩 환경에서 지상시험을 수행하였다. 본 논문에서 수행한 지상시험 환경은 알고리즘이 모두 적용된 레이더 시스템을 루프랩과 모의 표적신호 방사를 위한 비콘타워로 구성된다. 루프랩에 설치된 레이더의 안테나장치를 통해 외부로 RF(Radio Frequency) 신호를 방사하면 비콘 안테나가 레이더 신호를 수신한다. 이 때, 비콘은 모의 표적 신호를 방사해 레이더가 신호를 수신하여 처리하게 한다. 이러한 지상시험 환경은 항공기에 탑재하여 시험하기 전 지상에서 레이더의 운용성, 요구사항 충족여부 등 사전 검증에 용이하다는 장점이 있다. 분해능 검증을 위해서는 거리와 속도 정보가 모두 동일한 비콘신호 두 개를 모의하는 것이 이상적이거나, 비콘의 제한으로 동일 각도에서 동일 속도를 가지는 표적 모의가 불가하였다. 따라서, 두 모의표적의 속도 차이를 다양하게 설정해가며 개별추적에 성공하는 거리 차이를 확인하는 방법으로 성능을 검증하였다.

2-3 시험 결과

본 시험에 사용된 파라미터는 표 1과 같다. 공대공모드 운용모드 중 전 방향 표적의 탐지 및 추적을 목적으로 하는 AAST (All Aspect Search and Track) 탐색과형을 사용하였다.

표 1. 시험에 사용된 파라미터

Table. 1. Parameters for the roof-lab test

Parameter	Value
Pulsewidth(Before compression)	5 us
Pulsewidth(After compression)	0.2 us
JEM rejection range in plot extraction step	30 m
Start range	85 km
Velocity of target 1	-165 m/s (closing)
Velocity of target 2	-170 m/s, -166.5 m/s, -166 m/s (closing)

해당 파형의 펄스 폭은 약 5 us 이며, LFM(linear frequency modulation)과 정합필터(matched filter)를 사용한 펄스 압축을 통해 5MHz 대역폭, 즉 이론적인 3 dB 압축 폭은 30 m가 된다.

두 표적 간 속도 차이가 존재하므로 시험 시나리오가 진행될수록 표적 간 거리가 벌어지게 된다. 거리 차이가 벌어지는 상황에서 두 표적이 각각 플롯으로 탐지 선언되고, 궁극적으로 개별 추적으로 이어지는 성능을 확인하고자 하는 것이다.

(1) 시나리오 1: 두 표적의 속도 차 5 m/s

첫 번째 시나리오는 두 표적의 속도 차이가 5 m/s인 경우이다. 그림 6은 거리 차이(ΔR)에 따른 RD 맵 상의 표적 신호이다. x축은 거리 셀, y축은 도플러 속도 셀이고, 밝은 노랑색 신호가 표적 신호이다. 그림 6.(a)의 경우 RD 맵 상에서 신호가 분리된 것처럼 보이나 2-1절에서 설명한 플롯 추출 단계의 JEM 신호 제거 로직에 의해 최종적으로 1개의 플롯만 탐지 선언되었다. 이때 두 표적의 거리 차이는 30 m 미만이다. 반면, 그림 6.(b)의 경우 RD 맵 상에서도 신호가 분리되고 각각 플롯 탐지 선언도 성공하였다. 이때, 두 표적의 거리차이는 32.36 m로 5 m/s 속도차이에서는 이론적인 분해능 수치와 알고리즘에 의한 제거 범위를 살짝 초과한 경우에서도 두 신호의 개별 탐지 선언이 가능함을 알 수 있다.

그러나 추적 개시로 이어지기 위해서는 데이터 연관을 통한 중복성 검사를 통과해야 한다. 그림 7은 시험 시나리오에 따른 추적 표적의 속도이다. 먼저 개시된 표적 1은 파랑색, 나중에 개시된 표적 2를 빨강색으로 표시하였다. 표적 1이 추적 번호 21로 먼저 개시되고 표적 2가 추적 번호 22로 추적 개시에 성공한 시점은 그로부터 약 20초가 지나 거리차이가 113.98 m로 한참 벌어진 후이다. 즉, 본 시험에 사용된 알고리즘 기준으로, 추적 개시를 위해 중복성 검사를 통과하기 위해서는 100 m 가 넘는 충분한 거리 차이가 필요하다는 의미이다.

(2) 시나리오 2: 두 표적의 속도 차 1.5 m/s

두 번째 시나리오는 두 표적의 속도 차이가 1.5 m/s인 경우이다. 그림 8은 해당 속도 차이에서 거리 차이에 따른 RD 맵 상의 표적 신호를 나타낸다. 시나리오 1 대비 속도 축으로 신호가 밀집해있는 경향을 보인다. 그림 8.(a)의 경우 줄어든 속

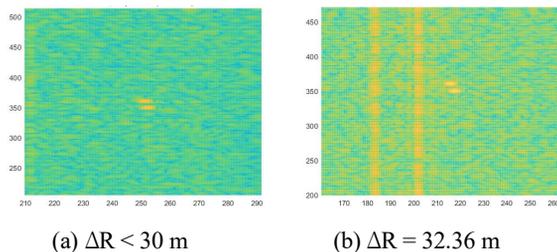


그림 6. 속도 차이 5 m/s인 두 표적의 RD 맵 신호
Fig. 6. RD map results of velocity difference with 5 m/s

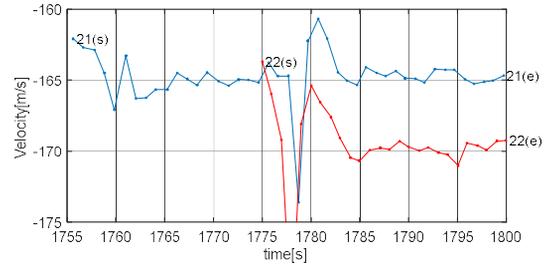


그림 7. 속도 차이 5 m/s인 두 표적의 추적 결과 (파랑색: 선 개시된 추적, 빨강색: 분해되어 후 개시된 추적)
Fig. 7. Track results of velocity difference with 5 m/s (blue line: first initiated track, red line: second initiated track)

도 차이로 인해 표적 2의 신호가 표적 1에 합쳐져 한 개의 플롯만이 탐지되었다. 이 때 두 표적의 거리 차이는 72.42 m 미만이다. 즉, 속도 차이가 작으면 거리차이가 더 크더라도 신호를 분해하여 개별 탐지하는 것이 어렵다는 의미이다. 그림 8.(b)의 경우 RD 맵 상에서도 신호가 분리되고 실제로 플롯도 각각 탐지 선언되었다. 이 때, 두 표적의 거리차이는 80.65 m로 속도차이가 줄어든 경우엔 훨씬 큰 이격거리에서 플롯 분해가 가능하다는 것을 알 수 있다.

그림 9를 보면 표적 1이 추적번호 25로 먼저 개시되고 표적 2가 추적번호 26으로 추적 개시에 성공한 시점은 그로부터 약 70초가 지난 후이다. 이 때 두 표적의 거리는 103.93 m로 한참

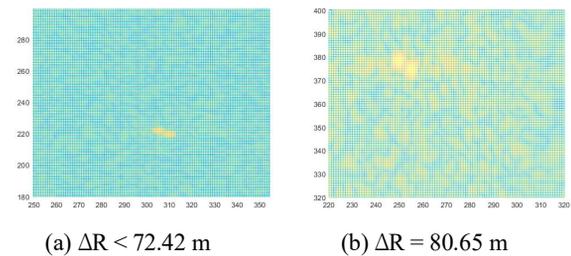


그림 8. 속도 차이 1.5 m/s인 두 표적의 RD 맵 신호
Fig. 8. RD map results of velocity difference with 1.5 m/s

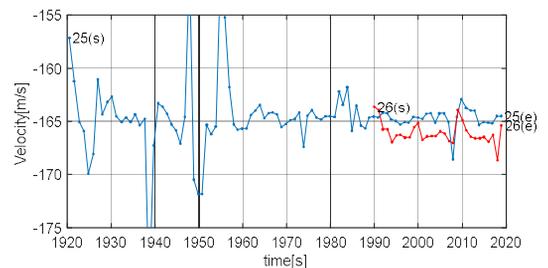
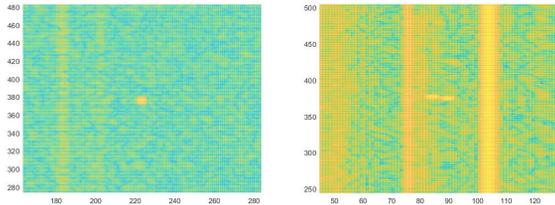


그림 9. 속도 차이 1.5 m/s인 두 표적의 추적 결과 (파랑색: 선 개시된 추적, 빨강색: 분해되어 후 개시된 추적)
Fig. 9. Track results of velocity difference with 1.5 m/s (blue line: first initiated track, red line: second initiated track)



(a) $\Delta R < 76.51 \text{ m}$ (b) $\Delta R = 79.09 \text{ m}$

그림 10. 속도 차이 1 m/s인 두 표적의 RD 맵 신호
 Fig. 10. RD map results of velocity difference with 1 m/s

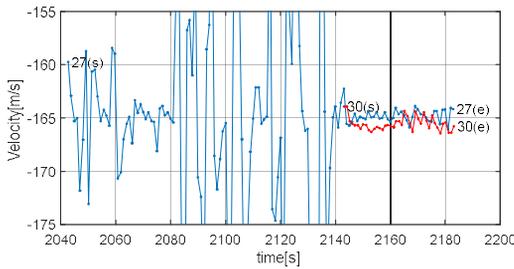


그림 11. 속도 차이 1 m/s인 두 표적의 추적 결과 (파랑색: 선 개시된 추적, 빨강색: 분해되어 후 개시된 추적)
 Fig. 11. Track results of velocity difference with 1 m/s (blue line: first initiated track, red line: second initiated track)

벌어진 후이다. 시나리오 1의 결과와 마찬가지로 적은 거리차이로 두 표적의 개별 탐지 선언이 이루어졌다고 하더라도 추적 개시를 위해 중복성 검사를 통과하기 위해서는 훨씬 큰 거리 차이가 필요하다는 의미이다.

(3) 시나리오 3: 두 표적의 속도 차 1 m/s

세 번째 시나리오는 두 표적의 속도 차이가 1 m/s인 경우이다. 그림 10은 해당 속도 차이에서 거리 차이에 따른 RD 맵 상의 표적 신호를 나타낸다. 그림 10.(a)의 경우 작은 속도 차이로 인해 두 신호가 하나로 합쳐져 보인다. 이때 두 표적의 거리 차이는 76.51 m 미만이다. 그림 10.(b)에서는 RD 맵 상에서도 신호가 분리되고 각각 플롯 선언에 성공하였다. 이때, 두 표적의 거리차이는 79.09 m로 시나리오 2의 결과보다 근소하게 작은데, 이는 시나리오 3의 속도차이가 더 작아 거리 차이 역시 더 천천히 벌어지기 때문인 것으로 판단된다.

그림 11를 보면 표적 1이 추적번호 27로 먼저 개시되고 표적 2가 추적번호 30으로 추적 개시에 성공한 시점은 그로부터 약 90초가 지나 110.24 m로 한참 벌어진 후이다. 이전 시나리오의 결과와 마찬가지로 개별 추적에 성공하기 위해서는 중복성 검사를 통과할 수 있는 충분한 거리차이가 필요하다는 의미이다.

표 2. 결과 요약

Table 2. Summary of ground test result

Velocity difference	Resolving range for plot	Resolving range for track
5 m/s	32.36 m	113.98 m
1.5 m/s	80.65 m	103.93 m
1 m/s	79.09 m	110.24 m

결론적으로, 두 표적의 개별 탐지선언을 위해서는 이론적인 3 dB 분해능 값 이상의 거리 차이가 필요하며, 두 표적의 속도 차이가 작을수록 표적 분해를 위해서는 더 큰 거리 차이가 필요하다. 또한, 개별 플롯 탐지 이후 추적까지 이어지기 위해서는 데이터 연관 과정을 거치는데, 이 과정에서 중복성 검사를 통과하기 위해서는 보다 큰 거리 차이가 필요하다. 본 결과는 외부 간섭영향을 배제한 루프랩 환경에서 이상적인 비콘 신호를 활용한 결과이며, 실제 항공기 탑재 비행시험을 수행할 경우 다른 영향 요소에 의해 이와는 다른 결과를 얻을 수 있다.

III. 결 론

항공기 탑재 레이더의 공대공 모드 운용 시 밀집해있는 표적을 분리하여 탐지 및 추적하는 것은 전장에서 우위 확보를 위해 매우 중요하다. 두 표적의 분해 성능이란 RD 맵 상에서 육안으로 분리가 가능한 관점, 신호처리 알고리즘을 거쳐 최종 플롯으로 각각 탐지가 가능한 관점, 분리된 플롯이 데이터 연관 과정을 거쳐 개별 추적에 성공하는 관점으로 나눌 수 있다. 본 논문에서는 신호처리 및 추적 알고리즘 측면에서 거리 분해 성능에 영향을 미치는 요소를 정리하고, 시험을 통해 단계마다 표적이 분해되는 거리를 관찰하였다. 그 결과, 거리 분해능은 두 표적 간 속도 차이에 따라 달라짐을 확인하였다. 30m의 이론적인 거리 분해능을 가지는 파형을 사용할 때, 충분한 속도차이를 가지는 두 표적의 경우 이론적인 분해능 수치와 유사한 수준의 거리 차이에서 신호가 분해되었다. 반면, 두 표적의 속도 차이가 유사할 경우 히트 클러스터링 과정에서 신호가 하나로 합쳐져 분해가 불가하므로 이론적인 분해능 수치의 2배 이상인 이격 거리에서 두 신호로 분리가 가능함을 알 수 있다. 또한 탐지 플롯을 추적으로 개시하기 위해서는 추적의 중복개시를 막기 위해 비교를 수행하는 데, 이론적인 수치의 3배 이상인 거리 차이에서 중복성 검사를 통과해 개별 추적으로 개시됨을 확인하였다. 본 논문에서 제시한 결과는 지상시험 환경에서 비콘을 통해 검증한 결과이며, 추후 항공기 탑재 시험을 통해 실제 운용 환경과 유사한 공중 환경에서 추가 검증시험을 수행할 예정이다.

Acknowledgments

이 논문은 2023년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(274190001)

References

- [1] M. I. Skolnik, *Introduction to Radar Systems*, 3rd Edition, McGraw-Hill, 2001.
- [2] M. I. Skolnik. *Radar Handbook*, 3rd Edition, McGraw-Hill, 2008.
- [3] B. R. Mahafza, *Radar System Analysis and Design using MATLAB*, 3rd Edition, CRC Press, 2013.
- [4] S. Lee, Y. Jung, Y. Jung, “Design of Multi-Mode Radar Signal Processor for UAV Detection,” *The Journal of Korea Navigation Institute*, Vol. 23, No. 2, pp.134-141, 2019.
- [5] M. R. Bell, Robert A. Grubbs, “JEM modeling and measurement for radar target identification,” *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, Vol. 29, No. 1, pp.73-87, 1993.
- [6] J. Fu , J. Sun, S. Lu, X. Zhang, , “Debiased converted position and Doppler measurement tracking with array radar measurements in direction cosine coordinates,” *IET Radar, Sonar & Navigation*, Vol. 10, No. 1, pp.155-165, 2015.



박연희 (Yeonhee Pak)

2014년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)
 2016년 2월 : 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
 2016년 2월 ~ 현재 : 국방과학연구소 항공기레이다체계단
 ※관심분야 : 항공기 레이더, 공대공 모드 알고리즘, 레이더 신호처리



김용민 (Yong-min Kim)

1994년 3월 : 공군사관학교 기계공학과 (공학사)
 2004년 11월 ~ 2015년 3월 : 공군 항공SW지원소 전투기 MC SW 개발
 2010년 3월 : 한서대학교 컴퓨터공학과 (이학석사)
 2017년 1월 ~ 현재 : 국방과학연구소 항공기레이다체계단
 ※관심분야 : 항공전자 시스템, 미사일 데이터 링크, Terrain Following