

복합 클러터 환경 내 표적 보존 및 연산 최적화를 위한 실시간 히트 우선순위 스코어링 기법

Real-Time Hit Priority Scoring Technique for Target Preservation and Computational Optimization in Complex Clutter Environments

김 준 석¹

Jun-Seok Kim¹

요 약

본 논문에서는 레이더 탐지 데이터 포화 환경에서 유효 표적의 손실을 방지하고 하드웨어 처리 부하를 최소화하기 위한 초경량(*ultra-lightweight*) 히트 우선순위 스코어링 선별 기법을 제안한다. 기존의 단일 속성 기반 선별 방식과 달리, 제안 기법은 히트의 진폭, 예상 위치 기반 인접성, 그리고 국부 밀집도 정보를 결합한 다차원 속성 모델을 설계하였다. 특히, 실시간 임베디드 환경에서의 연산 효율성을 극대화하기 위해 복잡한 비선형 정규화 과정을 배제하고, 특징값의 자릿수를 일치시키는 방식의 연산 경량화(*lightweight computing*) 구조를 적용하였다. 모의 신호를 이용한 성능 분석 결과, 제안 기법은 데이터 포화 상황에서도 유효 표적을 안정적으로 보존함과 동시에 기존 방식 대비 약 6.5 %의 연산 시간을 단축하여 실시간 시스템 내 적용 타당성을 입증하였다.

Abstract

This paper proposes an *ultra-lightweight* hit priority scoring and selection technique to prevent the loss of valid targets and minimize hardware processing loads in radar detection data saturation environments. Unlike conventional single-attribute selection methods, the proposed technique designs a multidimensional attribute model that combines hit amplitude, proximity based on predicted positions and local density information. In particular, to maximize the computational efficiency in real-time embedded environments, a *lightweight* computing architecture was applied by excluding complex nonlinear normalization processes, and instead employing a method that synchronizes the orders of magnitude of feature values. Performance analysis using simulated signals demonstrate that the proposed technique stably preserved valid targets even under data saturation, while reducing the computation time by approximately 6.5 % compared to conventional methods, thereby verifying its feasibility for real-time system implementation.

Key words: Radar Signal Processing, Data Saturation Control, Lightweight Algorithm, Real-Time Systems, Priority Scoring

I. 서 론

최근 고해상도 레이더 시스템은 복합 클러터 유입 시 CFAR 탐지 임계치를 초과하는 데이터(이하 히트, *hit*) 포화

현상에 직면한다^[1]. 기존 진폭 기반의 단순 선별 방식은 고 진폭 클러터에 의해 유효 표적이 밀려나 표적의 군집 형상이 파괴되는 치명적인 문제가 있다. 최근 연구들은 이를 해결하기 위해 AI 및 머신러닝 기반의 탐지 기법을 제안하고

한화시스템(Hanwha Systems)

1: 선임연구원(<https://orcid.org/0009-0009-4587-9489>)

· Manuscript received April 16, 2026 ; Revised May 3, 2026 ; Accepted May 21, 2026. (ID No. 20260416-036)

· Corresponding Author: Jun-Seok Kim (e-mail: junseok951220@gmail.com)

있으나, 연산 복잡도가 과도하여 실시간 하드웨어 제약이 있는 임베디드 체계에 적용하기에는 한계가 있다^{[2],[3]}.

이러한 한계를 극복하기 위해, 본 논문에서는 하드웨어 자원의 부하를 최소화하면서도 후단 클러스터링(예: DBSCAN)을 위한 표적의 형태학적 특성을 보존하는 초경량 다차원 스코어링 기법을 제안한다. 제안 기법은 통계기의 표적 예상 위치(거리-속도 인접성), 신호의 진폭, 지역적 밀집도를 활용하되, 복잡한 부동소수점 정규화 연산 없이 데이터의 동적 영역을 평탄화하여 단순 선형 결합만으로 우선순위를 산출한다. 이를 통해 유효 표적의 형상을 보존하여 탐지 성능을 유지하고, 부분 정렬 알고리즘을 채택하여 실시간 연산 효율을 극대화한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 제안하는 초경량 다차원 스코어링 모델을 설명하고, III장에서는 모의 환경에서의 탐지 성능 및 연산 최적화 결과를 분석한다. 마지막으로 IV장에서 결론을 맺는다.

II. 다차원 가중치 기반 히트 우선순위 관리 기법

본 장에서는 복합 클러스터 환경에서 유효 표적 정보를 보존하고 실시간 신호처리 효율을 향상시키기 위한 히트 선별 알고리즘을 제안한다. 제안 기법은 다차원 속성 기반의 우선순위 스코어링과 부분 정렬을 결합한 이중구조로 설계되었다.

그림 1은 제안하는 전체 히트 처리 시퀀스를 나타낸다. 입력된 신호는 도플러 필터링 및 CFAR 탐지 과정을 거쳐 초기 히트를 생성한다. 이때 유효 히트 수(M)가 시스템의 수용 가능 버퍼 크기(N)를 초과하는 포화 상황($M \gg N$)이 감지되면, 제한된 자원 내에서 최적의 데이터 보존을 위한 선별 로직이 수행된다. 본 제안 기법은 크게 히트의 중요도를 평가하는 스코어링 단계(2-1절)와 연산 부하를 최소화하며 데이터를 추출하는 정렬 단계(2-2절)로 구성된다.

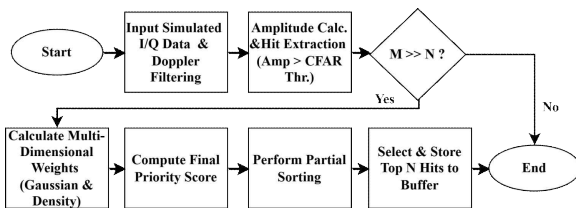


그림 1. 제안하는 우선순위 기반 히트 처리 시퀀스
Fig. 1. Proposed priority-based hit processing sequence.

2-1 다차원 히트 속성 및 스코어링 모델 설계

본 논문에서는 실시간 데이터 선별을 위해 개별 히트 H_i 를 진폭, 인접성, 밀집도로 구성된 3차원 속성 벡터로 정의한다. 우선, 히트의 신호 세기를 나타내는 진폭(A_i)은 표적의 물리적 존재 확률과 직결되는 핵심 요소이다. 둘째로, 레이다 통계기로부터 제공되는 예상 위치 정보를 기반으로 한 인접성 스코어(P_{dist})는 아래 식 (1)의 가우시안 확률 모델을 통해 계산된다(α_R, α_V : 거리/속도 측 허용 오차 파라미터).

$$P_{dist} = \exp\left(-\left(\frac{(R_i - \hat{R})^2}{\alpha_R^2} + \frac{(V_i - \hat{V})^2}{\alpha_V^2}\right)\right) \quad (1)$$

여기서 R_i, V_i 는 히트의 거리 및 속도 좌표이며, $\hat{R}, \hat{V}$ 는 통계기 제공 예상 좌표이다. 마지막으로, 국부 밀집도(D_i)는 해당 히트를 중심으로 인접한 8개 셀에 존재하는 유효 히트의 개수를 카운팅하여 산출한다. 제안 기법은 이처럼 물리적 특성과 외부 정보를 융합한 3차원 속성을 선형 결합함으로써, 복잡한 비선형 연산 없이도 데이터 선별의 신뢰성을 확보하였다.

위 세 가지 속성을 바탕으로, 최종 히트 우선순위 스코어 S_i 를 산출하는 목적 함수는 식 (2)와 같이 시스템의 실시간 연산 부하를 최소화하기 위해 복잡한 부동소수점 정규화 연산을 배제한 선형 결합으로 설계되었다.

$$S_i = W_A \times A_i + W_R \times P_{dist} + W_D \times D_i \quad (2)$$

W_A : 진폭 가중치 스케일링 팩터

A_i : 히트의 진폭 값

W_R : 거리-속도 인접성 가중치 스케일링 팩터

P_{dist} : 거리-속도 인접성 오차에 대한 가우시안 확률 스코어

W_D : 밀집도 가중치 스케일링 팩터

D_i : 해당 히트의 인접 셀(adjacent cell) 개수

이 수식 구조는 히트의 진폭 값에 대한 가중치(W_A), 타겟 예상 위치 기반 거리-속도 인접성(가우시안 확률 최대화)에 대한 가중치(W_R), 동시에 레이다 표적 특유의 3×3 윈도우 내 밀집 특성(D_i)에 대한 추가 가중치(W_D)를 적용한다. 이를 통해 복잡한 연산 없이도 표적의 형상을 보존하고 클러스터와 실표적을 스코어상에서 명확하게 분리할 수 있다.

2-2 부분 정렬 기반의 연산 최적화

대규모 히트 데이터를 실시간으로 처리하기 위해서는 알고리즘의 계산 복잡도를 제어하는 것이 필수적이다. 본 논문에서는 생성된 모든 히트(M)를 대상으로 전체 정렬을 수행하는 대신, 산출된 스코어(S_i)가 높은 상위 히트 N 개의 히트만을 효율적으로 추출하여 최대 용량 버퍼에 수용하는 부분 정렬 알고리즘을 적용하였다.

기존의 퀵 소트(quick sort) 기반 전체 정렬이 평균 $O(M \log M)$ 의 연산 복잡도를 갖는 반면, 제안 기법은 퀵 셀렉션(quick selection)을 활용하여 연산 복잡도를 평균 $O(M \log N)$ 수준으로 개선하였다. 이는 히트 발생량이 급증하는 포화 환경($M \gg N$)에서도 하위 순위 데이터에 대한 불필요한 비교 연산을 과감히 생략함으로써 시스템의 결정성(determinism)을 보장한다. 결과적으로 제한된 타임 슬롯 내에 신호처리 루프를 완료해야 하는 임베디드 소프트웨어 환경에서 안정적인 실시간 성능을 확보하였다. 이를 검증하기 위한 구체적인 실험 환경 및 성능 분석 결과는 III장에서 기술한다.

III. 실험 및 성능 검증

3-1 실험 환경 및 시나리오

본 연구에서 제안한 알고리즘의 유효성을 검증하기 위해, 실제 레이더 수신 환경을 정교하게 모사한 모의 신호 데이터를 활용하였다. 실험 데이터는 그림 2와 같이 신호 처리 체인의 특성을 반영하여 도플러 필터링이 완료된

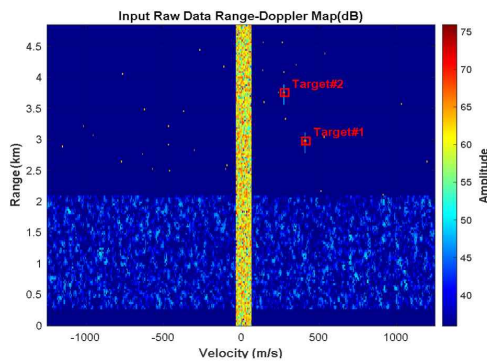


그림 2. 모의 입력 신호의 거리-도플러 분포

Fig. 2. Range-Doppler distribution of the simulated input signal.

표 1. 모의 실험 환경 및 레이더 파라미터

Table 1. Simulated environment and radar parameters.

Parameter	Value
Carrier frequency	3.0 GHz (S-band)
Bandwidth / F_s	5.0 MHz
PRF (HPRF mode)	50 kHz
FFT size	512
Range resolution	30 m
Velocity resolution	4.88 m/s
Target & clutter model	Extended target (2ea), Rayleigh clutter & AWGN
Signal environment	Background SNR ~ 35 dB, Local SCR 0 ~ 25 dB

형태의 I/Q 신호로 생성되었으며, 강한 클러터와 유효 표적 신호를 혼재시켜 복합적인 환경을 구축하였다.

또한, 본 성능 검증 시뮬레이션에서는 제한된 실시간 처리 환경을 고려하여 부동소수점 기반의 복잡한 정규화 연산을 배제하였다. 대신, 각 특징 데이터가 최종 스코어에 미치는 기여도를 균등하게 정렬하기 위해, 데이터의 동적 영역 스케일을 보정하는 자릿수 평탄화(order of magnitude equalization) 기법을 적용하여 가중치 비율 ($W_A=1$, $W_R=1,000$, $W_D=100$)을 도출하였다.

상세한 모의 신호 생성 및 레이더 파라미터는 표 1과 같다. 특히, 그림 2에서 관찰되는 특정 거리 빈(bin) 이후의 신호 감소 현상은 안테나 빔폭 내에 유입되는 근거리 지표면 클러터의 비선형적 거리 감쇠 물리 모델을 가혹한 데이터 포화 조건으로 모의 환경에 반영하였기 때문이다.

성능 평가는 실제 운용 환경과 유사한 실시간 운영체제에서 가상 머신을 통해 수행되었다. 약 1,100개의 포화 히트 데이터(M)가 유입되는 상황을 가정하였으며, 다중 태스크의 간섭을 배제한 단일 노드 및 단일 태스크 점유 환경에서 알고리즘의 순수 연산 부하와 결정성을 정밀하게 측정하였다.

그림 2 및 그림 3은 성능 분석의 가시성을 위해 표적이 밀집된 관심 영역(ROI)을 발췌(crop)하여 도시하였고, 송수신 전환 시간 및 근거리 수신기 보호를 위한 blanking 구간을 고려하여 약 0.3 km 이후부터 유효 히트를 추출하였으며 클러터 밀도가 높은 5 km 이내의 근거리 영역을 집중적으로 분석하였다.

3-2 성능 분석 결과

성능 분석 결과는 그림 3과 같으며, 기존 방식은 버퍼

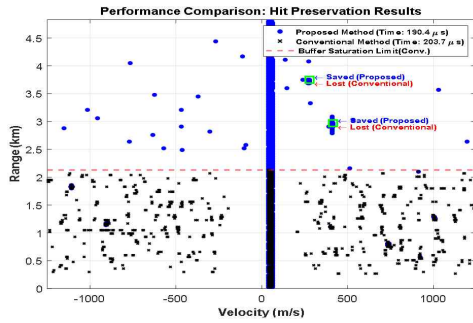


그림 3. 기존 및 제안 기법의 히트 보존 성능 비교

Fig. 3. Performance comparison of hit preservation between conventional and proposed methods (overlayed view).

포화로 유효 표적이 유실되었으나 제안 기법은 상위 1,000개(N) 내에 표적을 안정적으로 보존하였다. 또한 연산 시간을 약 6.5 % 단축하여 실시간성을 입증하였다. 이는 데이터 폭증 시에도 시스템의 결정성을 보장하는 핵심 근거가 된다.

다양한 환경 변수를 고려한 반복 성능 검증 결과, 제안 기법은 국부 신호 대 클러스터비가 0 dB 수준인 가혹한 클러스터 환경에서도 단순 진폭 기반 선별 방식 대비 유효 표적의 탐지 확률(P_d) 저하 없이 클러스터에 의한 오염지을을 현저히 억제함을 확인하여 본 알고리즘의 탐지 성능을 교차 검증하였다.

또한 부분 정렬 기법을 적용함으로써 기존 방식 대비 연산 시간을 약 6.5 % 단축하였다. 이는 데이터 폭증 시에도 불필요한 연산을 효과적으로 생략하여, 정해진 시간 내에 처리를 완료하는 실시간 성능을 확보하였음을 입증한다.

그림 4의 누적 분포 함수(CDF) 비교 결과는 제안 기법

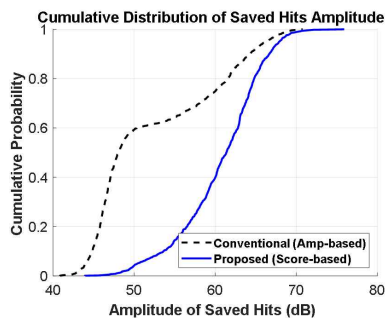


그림 4. 선별된 히트의 진폭 누적 분포(CDF) 비교

Fig. 4. Cumulative distribution function (CDF) comparison of the selected hits.

의 통계적 우월성을 입증한다. 기존 방식은 저출력 클러스터 점유로 인해 누적 확률이 약 42 dB 지점부터 급격히 상승하는 반면, 제안 기법은 하위 스코어 데이터를 선행 배제함으로써 곡선이 전체적으로 약 5 dB 우측으로 전이되었다. 이는 제한된 버퍼 내 데이터의 평균 SNR을 향상시켜 결과적으로 표적 탐지 성능을 높이는 근거가 된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 하드웨어 버퍼 용량이 제한된 레이다 시스템에서 강클러스터로 인한 데이터 포화가 발생할 경우, 제한된 버퍼 내에 유효 표적 데이터를 우선적으로 보존하기 위한 다차원 히트 스코어링 기법을 제안하였다.

제안하는 기법은 진폭, 인접성, 밀집도로 구성된 다차원 속성 값에 가중치를 반영해 동적 범위를 평탄화하고, 이를 합산하여 종합적인 스코어를 산출한다. 이를 통해 국부 신호 대 클러스터비가 0 dB 수준까지 떨어지는 가혹한 환경에서도 유효 표적의 탐지 성능이 안정적으로 유지됨을 확인하였다.

또한, 제안 기법은 기존 단일 속성 기반 선별 방식 대비 연산 시간을 약 6.5 % 단축하였으며, 이를 통해 하드웨어 자원이 제한된 실시간 임베디드 레이다 체계에 적용하기 위한 실무적 타당성을 입증하였다. 향후 본 알고리즘을 실제 레이다 하드웨어에 이식하여 복합 클러스터 환경에서 표적 탐지 성능을 추가로 검증할 예정이다.

References

- [1] M. A. Richards, *Fundamentals of Radar Signal Processing*, 2nd ed., New York, NY, McGraw-Hill, 2014.
- [2] 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, p. 7000504, Mar. 2019.
- [3] S. Liang, R. Chen, G. Duan, and J. Du, "Deep learning-based lightweight radar target detection method," *Journal of Real-Time Image Processing*, vol. 20, p. 61, May 2023.