

지형 추종 레이더를 위한 주엽 신호 탐지 기법

신혁수*¹, 황정훈*², 김형석*³

Main-Lobe Signals Detection Scheme for Terrain Following Radar

Hyuksoo Shin*¹, Jeonghun Hwang*², and Hyung-Suk Kim*³

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

요 약

본 논문에서는 지형 추종 레이더(TFR, Terrain-Following Radar)의 특성에 최적화된 주엽 신호 탐지 알고리즘을 제안한다. TFR은 단일 표적을 탐지하는 일반 레이더와는 달리, 특정 지형의 반사 신호 전체를 탐지 대상으로 하므로 기존의 CFAR(Constant False Alarm Rate) 기반 탐지 방식의 적용이 어렵다. 본 연구에서는 TFR의 탐지 단계를 두 가지로 구분하고, 그 중 기존 연구가 미비한 '지형 반사 신호 탐지' 단계에 대해 새로운 탐지 기법을 제안한다. 제안된 기법은 먼저 수신 신호로부터 RCS(Radar Cross Section)을 추정하여 신호의 거리 의존성을 완화시키고, 그 후 마스킹(Masking) 기반 탐지를 통해 거리 방향 부엽(Side-lobe) 억제함으로써 탐지 결과를 정제하여 오탐지를 줄이고 TFR의 지형 정보 추정 정확도를 향상시킨다. 실제 비행시험 데이터를 통해 제안 알고리즘의 성능을 검증하였으며, 기존 방식 대비 우수한 오탐지 억제 및 정확도 향상 성능을 보였다.

Abstract

This paper proposes main-lobe signals detection algorithms optimized for the characteristics of Terrain-Following Radar (TFR). Unlike conventional radars that detect individual targets, TFR detects the entire set of reflected signals from a designated terrain, making it difficult to apply traditional Constant False Alarm Rate (CFAR)-based detection methods. The TFR detection process is divided into two stages, and this study focuses on the less explored second stage of terrain reflection signal detection. A novel detection technique is proposed: the first estimates the Radar Cross Section (RCS) from received signals to eliminate distance-dependent signal variation, and the second introduces a masking-based method to suppress false detections caused by range-direction sidelobes. The performance of the proposed algorithms was validated using actual flight test data, demonstrating superior false alarm suppression compared to conventional methods.

Keywords

terrain following, active electronically scanned array, radar, range side-lobe, main-lobe detection

* 국방과학연구소 제3기술연구원 4부(*¹ 교신저자)
- ORCID¹: <https://orcid.org/0009-0001-7105-0510>
- ORCID²: <https://orcid.org/0000-0003-4768-8642>
- ORCID³: <https://orcid.org/0000-0002-8193-1736>

· Received: Nov. 05, 2025, Revised: Dec. 18, 2025, Accepted: Dec. 21, 2025
· Corresponding Author: Hyuksoo Shin
3rd R&D Institute 4th Directorate, Agency for Defense Development,
Yuseong P.O. Box 35, Daejeon, 34186 Korea
Tel.: +82-42-821-4092, Email: hsshin@add.re.kr

I. 서 론

최근 국방 분야에서는 항공기가 산악이나 복잡한 지형에 가깝게 저고도를 유지하며 침투하여 적의 대공 레이더 망을 무력화시키는 레이더 기반 지형 추종 기술에 대한 필요성이 높아지고 있다[1][2]. 고속 비행 중 지형 또는 인공 장애물과의 충돌을 방지하고 효율적인 경로 생성을 하기 위해서는 정확하고 실시간성이 보장된 지형 정보를 요구한다. 지형 추종 레이더(TFR, Terrain Following Radar)는 이를 위해 전방 지형의 반사 신호를 분석하고, 이를 기반으로 항공기 또는 무기체계가 추종 경로를 자동으로 생성할 수 있도록 지원하는 능동형 센서 시스템으로, TFR을 이용한 지형 프로파일 생성, 최적 경로 생성 등의 연구가 활발히 이루어져 왔다 [3]-[5]. 기존의 일반적인 레이더 시스템은 특정 단일 표적(e.g. 항공기, 미사일 등)의 탐지나 추적에 초점을 두고 설계하였다. 반면, TFR은 특정 표적이 아닌 전방의 주엽 빔 폭 내 지형 전체에서 반사되는 신호를 수신하고 이를 기반으로 플랫폼 진행 방향 지형의 윤곽을 파악한다. 이러한 특성은 TFR의 신호처리 구조와 탐지 알고리즘이 기존의 일반 레이더와 다른 관점에서 설계되어야 함을 의미한다.

따라서 본 논문에서는 TFR에 적합한 두 단계 탐지 알고리즘을 제안한다. 첫 번째는 수신 신호로부터 레이더 반사 면적(RCS, Radar Cross Section)을 계산하여 주엽 신호 탐지 판단 기준으로 RCS를 사용하는 방식이다. 이는 거리에 따른 수신 신호 세기의 동적 범위 문제를 줄일 수 있게 되어 오탐지 발생 가능성을 줄인다. 두 번째는 강한 수신 신호의 거리 부엽 신호로 인해 훼손된 것으로 판단한 거리 빈들을 마스킹하는 기법이다. 이 기법은 지형적 특성으로 인해 발생하는 음영지역이나, 반사 세기가 급격하게 변하는 지형 환경에서 오탐지 된 정보를 배제할 수 있다.

이를 검증하기 위해 제안 기법 적용하여 실제 비행 시험을 수행하였고, 비행 시험 데이터 분석을 통해 상수 임계값 기반 탐지 방식과 비교하여 제안 기법이 오탐지율을 현저히 줄이고, 지형 정보의 신뢰도를 향상시키는 결과를 확인함으로써 TFR 분야

의 실용적 기여를 도모하였다.

II. TFR 주엽 신호 탐지 알고리즘

2.1 배경 설명

일반적인 레이더에서는 거리에 따라 변화하는 잡음 및 클러터 환경에서 일정한 오경보율을 확보하며 특정 세기 이상의 단일 표적을 탐지하기 위해 CFAR(Constant False Alarm Rate) 기반 탐지 알고리즘을 광범위하게 사용한다[6][7]. CFAR은 주변 잡음 환경에서의 배경 통계를 기반으로 임계값을 동적으로 설정함으로써 일정한 오탐지율을 유지하는데 효과적이다. 이를 위해서 CFAR 알고리즘은 검출 후보 셀 주변으로 레퍼런스 셀을 지정하고 해당 레퍼런스 셀들을 잡음 혹은 클러터 영역으로 가정하여 검출 후보 셀을 위한 임계값을 계산한다. 그러나 TFR의 경우 지형에 반사되어 들어오는 거리 셀 별 수신 신호, 즉 지형 클러터 신호 모두를 일단 표적으로 간주하여 처리해야 한다. 따라서 특정 표적만을 탐지하기 위해 주변 잡음 및 클러터와 비교하는 일반적인 CFAR 알고리즘의 적용은 불가능하다. 따라서 TFR은 빔의 주엽 영역으로 수신되는 모든 지형 반사 신호를 탐지할 수 있는 특화된 알고리즘을 요구한다.

TFR의 주엽 신호 탐지 구조는 크게 두 단계로 나누어 볼 수 있다. 첫 번째는 레이더 빔의 주엽(Main-lobe) 영역을 식별하여 부엽(Side-lobe)에 의한 왜곡이나 간섭 신호를 제거하는 과정이고, 두 번째 단계는 빔의 주엽 영역으로 식별된 신호들 중에서 음영 지역을 제외하고 실제 지형으로부터 반사된 신호만을 탐지하는 과정이다. 첫 번째 단계를 위해서 부엽 억제(SLB, Side-lobe Blanking), 부엽 제거(SLC, Side-lobe Canceling), 적응형 빔형성(ABF, Adaptive Beamforming) 기술 등 다양한 기법이 적용될 수 있으며, 이와 관련한 연구가 많이 수행되었다 [8][9]. 반면, 두 번째 단계인 주엽 영역 내 유의미한 지형 반사 신호 탐지는 현재까지 공개된 연구가 거의 존재하지 않는다.

2.2 문제 정의 및 기존 방식의 한계

TFR은 항공기 기동 방향의 지형 정보 획득을 위해 전방의 특정 방위각 방향에 대해서 일정한 고각 범위를 다수의 빔으로 나누어 수직 방향으로 스캔한다[2]. 각 빔들은 해당 빔에 할당된 드웰 시간 동안 명령받은 조향 방향으로 다수의 펄스를 송신한 후, 반사된 수신 신호에 대해 독립적으로 신호처리를 수행하여 1차로 드웰 지형 정보를 획득한다. TFR은 전체 범위에 대한 스캔 수행 후 각 빔들로부터 획득한 드웰 지형 정보들을 병합하여 최종 한 스캔에 대한 스캔 지형 정보를 획득한다. 이때 각 드웰 별로는 그림 1과 같이, 펄스 압축, 펄스 누적 등 일반적인 레이더 신호처리 과정을 거친 뒤 주엽 신호 탐지를 수행하고 탐지된 신호들로부터 지형 정보를 생성한다.

그 중 주엽 신호 탐지 관련하여, TFR의 탐지 대상은 단일 표적이 아닌 주엽으로 수신되는 광역의 지형 반사 신호이다. 이를 고려한 가장 단순하면서도 TFR에 적합한 탐지 방법은 거리별 수신 신호 전력이 잡음 신호 전력 대비 특정 임계값 이상일 경우 지형 반사 신호로 판단하는 방식이다. 수신 신호의 각 거리 bin 인덱스를 n 이라고 하고, 한 드웰의 최대 거리 bin N_{Rbin} 에 대해서 거리 bin별 누적 처리 결과를 $S(n), n=1, \dots, N_{Rbin}$ 라고 할 때, 식 (1)과 같이 아래 조건을 만족하는 거리 bin 인덱스들의 집합 I_{ML} 을 주엽 신호 거리 bin 집합으로 정의한다.

$$I_{ML} = \{n | S(n)|^2 > \eta P_{noise}\} \tag{1}$$

이때, P_{noise} 는 잡음 신호 전력, η 는 잡음 신호 전력 대비 일정 수준 이상 전력의 신호를 주엽으로 판별하기 위한 임계값이다.

한편, 레이더 수신 신호는 필연적으로 거리 방향으로 부엽이 발생하는데, 예를 들어 LFM 기반 레이더의 경우 단일 표적에 대해서 펄스 압축 및 윈도우 적용 후에 피크 신호 대비 약 20~40 dB 낮은 수준의 거리 방향 부엽을 형성한다. 침투 값의 탐지를 목표로 하는 일반적인 레이더와 달리, TFR의 경우에는 그림 2와 같이 가장 전력이 강한 신호 기준으로 20~40 dB 이하의 신호 또한 지형으로부터 반사된 수신 신호로 탐지될 수 있기 때문에 거리 부엽에 의한 탐지 결과가 해당 거리 bin의 지형 수신 신호와 함께 나타날 수 있다.

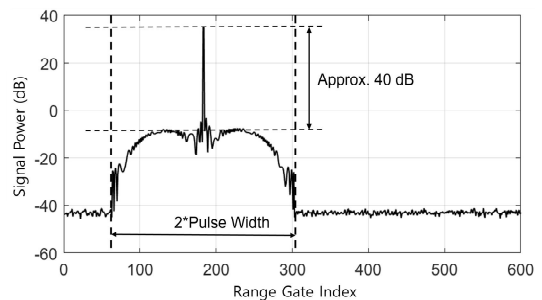


그림 2. 이상적인 모의 점표적에 대한 거리 부엽 예시
Fig. 2. Example of range side-lobe for Ideal simulated point target

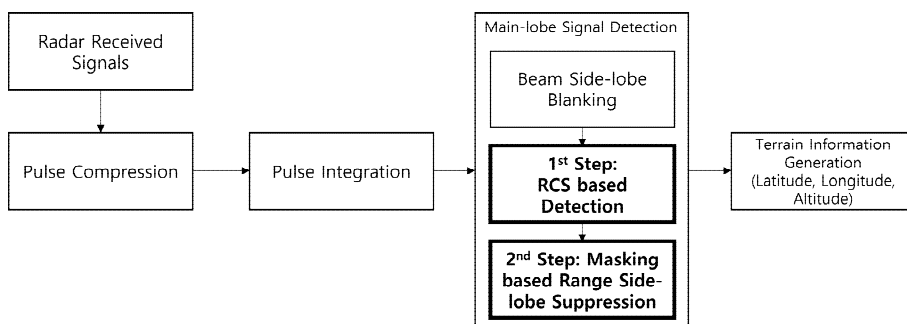


그림 1. TFR 신호처리 블록도
Fig. 1. Block diagram of TFR signal processing

거리 부엽이 문제를 일으키는 원인은 수신 신호 전력의 동적 영역이 매우 크기 때문이다. 그리고 수신 신호의 동적 영역이 큰 원인은 다음과 같이 두 가지로 분류할 수 있다.

2.2.1 거리에 의한 수신 신호 전력 감쇄

이론적으로 레이더 수신 신호 전력은 거리의 4제곱에 반비례한다. 따라서 TFR과 같이 처리해야 하는 거리 구간이 매우 길 경우, 거리에 의한 수신 신호 동적 범위는 매우 넓어진다. 특히 CFAR 알고리즘을 적용할 수 없는 상황에서 신호가 비교적 약한 원거리 구간 기준으로 상수 임계값을 설정할 경우 근거리 구간에서 과도한 오탐지가 발생할 수 있다.

2.2.2 탐색하는 지형의 특성

산악 지형과 같이 봉우리, 계곡에 의한 그림자 영역이 많이 발생하는 경우, 산악 지형 반사 신호의 거리 부엽이 그림자 영역에서 유효 탐지된 거리 bin으로 나타나 수신되어 거리 부엽에 의한 인한 오탐지가 발생할 수 있다. 또한 음영지역이 아닌 반사 신호가 존재하는 거리 bin에서도 인접한 지형이 매우 강한 반사 계수를 가질 경우, 강한 반사 신호의 거리 부엽이 간섭 신호로 작용하여 지형 정보 추정 성능이 열화될 수 있다.

따라서 위와 같이 분석한 원인들에 대해서 2단계로 구성된 거리 주엽 신호 탐지 기법을 제안한다.

2.3 1단계: RCS 기반 주엽 신호 탐지

첫 번째 단계는 수신 신호의 전력 대신 RCS를 판단 대상으로 사용하는 RCS 기반의 탐지 단계이다. n 번째 거리 bin에서의 RCS인 $\sigma(n)$ 는 식 (2)와 같이 레이더 방정식 기반으로 계산할 수 있다[10].

$$\sigma(n) = \frac{(4\pi)^3 R(n)^4 k T_s B L}{P_t G_t G_r \lambda^2} SNR(n) \quad (2)$$

이때, k 는 볼츠만 상수, T_s 는 시스템 온도, B 는 수

신 대역폭, L 은 각종 레이더 손실, P_t 는 송신 출력 전력, G_t 와 G_r 은 각각 송수신 안테나 이득, 그리고 λ 는 파장, $SNR(n)$ 은 n 번째 거리 bin의 신호 대 잡음 비(SNR, Signal-to-Noise Ratio), $R(n)$ 은 n 번째 거리 bin의 경사 거리를 나타낸다. 또한 n 번째 거리 bin의 SNR은 식 (3)과 같이 획득할 수 있다.

$$SNR(n) = \frac{|S(n)|^2}{P_{noise}} \quad (3)$$

식 (4)의 조건을 만족하는 거리 bin, n ,들의 집합, $I_{ML,RCS}$ 를 주엽 신호 거리 bin 집합으로 정의한다.

$$\sigma(n) > \eta_\sigma \quad (4)$$

이때, RCS 기반 탐지를 위한 임계값, η_σ 는 최대 탐지 거리 bin(N_{Rbin})에서 수신 신호의 전력이 가장 작다는 가정 하에, 식 (1)의 판단 조건과 동일한 조건이 되도록 아래 식 (5)와 같이 계산한다.

$$\eta_\sigma = \eta \frac{(4\pi)^3 R^4(N_{Rbin}) k T_s B L}{P_t G_t G_r \lambda^2} \quad (5)$$

이 기법의 특징은 RCS 계산 시 수신 신호 전력으로부터 거리의 네 제곱 항을 보상함으로써 RCS의 동적 범위를 상대적으로 줄여준다는 점이다. 즉 거리에 의한 수신 신호 전력 감쇄 영향성을 최대한 배제하여, 상수 임계값 η_σ 에 대해서 근거리 구간에서의 오탐지 발생 가능성을 억제한다.

2.4 2단계: 마스크 기반 거리방향 부엽 억제

두 번째 단계는 탐색하는 지형의 급격하게 변하는 반사 계수 특성으로 인한 거리 방향 부엽 탐지 결과로 인해 훼손 되었다고 판단한 거리 bin들을 마스크하는 단계이다.

송신 파형 펄스 폭의 샘플 개수를 N_{pw} 라 할 때, $[\max(1, n - N_{pw}), \min(N_{Rbin}, n + N_{pw})]$ 범위 내의 최대 수신 신호 전력 $P_{max}(n)$ 는 식 (6)으로 구한다.

$$P_{\max}(n) = |S(i'(n))|^2 \quad (6)$$

이때, 거리 빈 인덱스 $i'(n)$ 는 식 (7)과 같다.

$$i'(n) = \underset{i \in [\max(1, n - N_{pw}), \min(n + N_{pw}, N_{Bin})]}{\operatorname{arg\,max}} |S(i)|^2 \quad (7)$$

수신 신호 전력이 아래 식 (8)의 조건을 만족하는 거리 빈 n 들의 집합, $I_{ML,RSLB}$ 를 주엽 신호 거리 빈 집합으로 판단한다.

$$|S(n)|^2 > \frac{P_{\max}(n)}{10^{0.1\alpha}} \quad (8)$$

여기서 α 는 거리 부엽이 피크 신호 대비 20-40 dB 약한 것을 감안하여 설정한 거리 부엽 마진이며 레이다 시스템에서 사용하는 변조 방식, 윈도우 종류, 레이다 시스템 성능에 따라 조정 가능한 변수이다. 제안한 1, 2단계를 거친 최종 주엽 탐지 거리 빈들의 집합, $I_{ML,PROPOSED}$ 은 다음 식 (9)와 같다.

$$I_{ML,PROPOSED} = I_{ML,RCS} \cap I_{ML,RSLB} \quad (9)$$

위와 같이 각 단계에서 획득한 결과들의 교집합만을 취할 경우, 거리에 의한 수신 신호 전력 변화, 탐색하는 지형의 특성으로 인해 발생할 수 있는 거리 방향 부엽에 의한 오탐지를 억제할 수 있다.

III. 시험 결과 및 분석

3.1 시험 환경

제안한 기법의 실효성을 확인하기 위하여 실제 FTB(Flight Test Bed) 비행시험[11]에서 획득한 데이터를 이용하여 분석을 수행하였다. 그림 3과 같이 제안한 기법의 효과가 두드러질 것으로 추정되는 산악 지형, 육지와 호수가 맞닿아 있는 지형에 대해서 스캔을 수행하며 실제 데이터를 수집하였다.

3.2 성능 지표 및 평가 방법

평가는 다음 지표를 기준으로 수행하였다.

3.2.1 고각 추정 정확도

TFR로 획득한 지형 정보의 정확도를 판단하기 위해서는 판단을 위한 정량적 지표가 필요하다. 특히 저고도 비행 경로를 생성해야 하는 지형 추종 기능은 획득한 지형 정보 중 고도 정보의 높은 정확도를 요구한다. 따라서 획득한 데이터의 고도 정확도를 확인하기 위한 기준값으로 미국지질조사국(USGS, United State Geological Survey)에서 오픈 소스로 제공하는 30미터 해상도의 SRTM(Shuttle Radar Topography Mission) 기반 DEM(Digital Elevation Map)을 사용하였다[12].

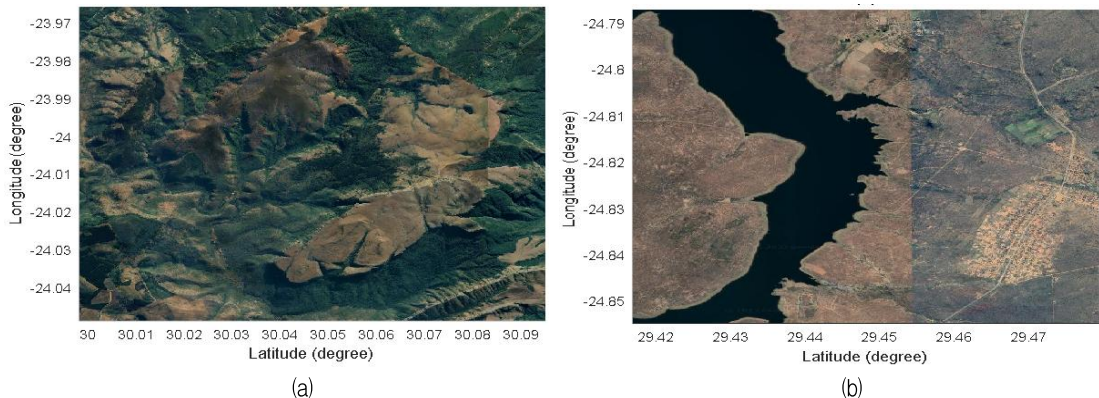


그림 3. 비행 시험 데이터 획득 지형 지도
(a) 산악 지역 (b) 호수 지역

Fig. 3. Terrain map for flight test data acquisition
(a) Mountainous area (b) Lakeside area

비행시험에서 획득한 지형 정보 데이터는 각 거리 빈마다 위도, 경도, 고도로 구성되는 Geodetic 좌표계로 저장되며, 각 거리 빈의 고도를 평가하기 위한 DEM 고도는 해당 거리 빈에서 추정된 위경도 기반 2차원 내삽법을 통해 획득하였다[13]. 통계적으로 유효한 데이터를 획득하기 위해 다수의 스캔 데이터를 이용하였으며, 각 스캔 데이터의 인덱스를 총 스캔 개수, N_{scan} , 에 대하여 $i = 1, \dots, N_{scan}$ 라 할 때, 거리 인덱스 n , 스캔 인덱스 i 에서 추정된 거리 및 고도를 각각 $R(n, i)$, $h(n, i)$ 이라 하고, 2차원 내삽법을 통해 계산한 DEM 고도 정보를 $h_{DEM}(n, i)$ 이라 표현할 수 있다. 이때 각 거리 빈, 스캔 인덱스 별 고각 편차 $\epsilon(n, i)$ 는 식 (10)과 같이 구할 수 있다.

$$\epsilon(n, i) = \left| \text{asin} \left(\frac{h(n, i) - h_{DEM}(n, i)}{R(n, i)} \right) \right| \quad (10)$$

고각 추정 정확도 오차는 아래 식 (11)에 나타낸 것처럼 식 (10)으로부터 RMSE 지표, ϵ 를 이용하여 평가하였다.

$$\epsilon = \sqrt{\frac{1}{N_{scan} N} \sum_{i=1}^{N_{scan}} \sum_{n=1}^N \epsilon^2(n, i)} \quad (11)$$

3.2.2 오탐지율

단일 표적을 대상으로 하는 레이더에서는 표적이 통제된 환경에서 반복 시험을 통해 시험을 위해 배치된 표적 외에 탐지된 플롯들의 빈도를 이용하여 통계적으로 쉽게 획득 가능하다. 그러나 TFR의 경우 표적의 통제가 불가능하기 때문에 오탐지율 성능을 판단하기 위한 새로운 방법이 필요하였다. 먼저 식 (3)에서 계산한 SNR을 이용하여 해당 거리 빈의 데이터가 이론적으로 가질 수 있는 고각 추정 정확도를 아래 식 (12)와 같이 계산한다[14].

$$\sigma(n, i) = \frac{\theta_{3dB}(n, i)}{k_m(\theta_s(n, i)) \sqrt{2SNR(n, i)}} \quad (12)$$

여기서 $\theta_{3dB}(n, i)$ 와 $\theta_s(n, i)$ 는 각각 거리 빈 n , 스

캔 인덱스 i 번째 지형 정보를 획득할 때 사용된 고각 방향 3 dB 빔폭과 조향각을 의미하고, $k_m(\cdot)$ 은 레이더 안테나 형상에 의해 결정되는 레이더 안테나 오차 상수이다. 통계적으로 추정치의 오차가 3σ 를 벗어나는 경우는 희귀 사건에 해당하므로 수식 (10)에서 계산한 오차가 3σ 를 벗어나는 경우, 즉, $\epsilon(n, i) > 3\sigma(n, i)$ 에 해당하는 거리 빈 n , 스캔 인덱스 i 의 데이터를 오탐지로 판단하였고, 샘플 개수($N_{scan} \times N$)가 4,000개 이상이 되도록 충분히 스캔 데이터를 누적하여 통계적인 오탐지율을 계산하였다.

3.2.3 탐지손실율

오탐지를 줄이기 위해 탐지 결과를 정제하는 과정에서 의도치 않게 탐지가 잘 된 결과들을 손실할 수 있다. 특히 시험을 통해 경험적으로 결정하는 임계값 파라미터들을 설정할 때, 과도하게 보수적으로 임계값을 설정할 경우, 오탐지율을 현저하게 낮출 수 있지만 반대로 정상 탐지된 결과를 잃게될 수 있다. 따라서 임계값 설정에 따른 탐지 손실율을 함께 확인해야한다. 탐지손실율은 앞선 오탐지와 유사하게 4,000개 이상의 데이터 샘플을 이용하여, 비교 기준이 되는 기법인 신호의 전력을 이용하여 탐지된 결과들 중 식 (10)에서 계산된 오차가 1σ 이내, 즉, $\epsilon(n, i) \leq \sigma(n, i)$ 임에도 불구하고 제안된 기법 적용 시 탐지되지 않은 거리 빈들의 수를 계산하였다.

3.3 시험 결과 및 분석

그림 4의 (a), (b), (c)는 산악 지형을 스캔한 1개 스캔 데이터를 각각 신호 전력 기반, RCS 기반, RCS 반 + 마스킹 기법을 이용해 처리한 탐지 결과를 DEM과 비교한 측면도이다. 신호 전력 기반일 경우, 근거리 구간에서 다수의 오탐지가 발생하며, 산봉우리 뒤의 음영지역에서도 일부 오탐지가 발생하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 그림 4의 (b), (c)에서 볼 수 있듯이 제안한 기법을 적용할 경우 오탐지가 단계적으로 감소하는 것을 직관적으로 확인할 수 있다.

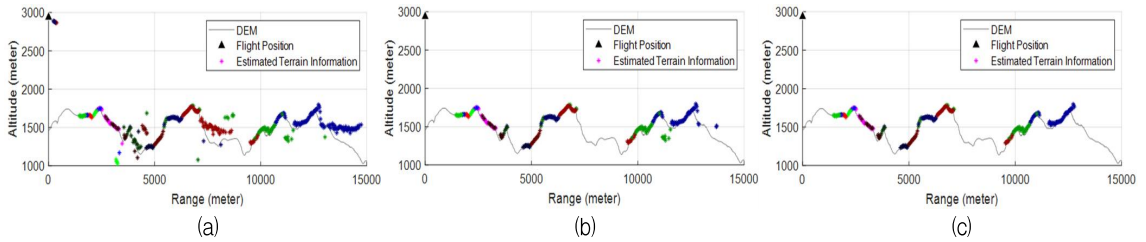


그림 4. 산악 지역에 대한 탐지 기법 별 지형 정보 획득 결과 측면도 예시
 (a) 신호 전력 기반 (b) RCS 기반 (c) RCS 기반 + 마스킹 기법

Fig. 4. Example of side-view of terrain information acquisition results by detection method for mountainous area
 (a) Signal power based (b) RCS based (c) RCS based + masking method

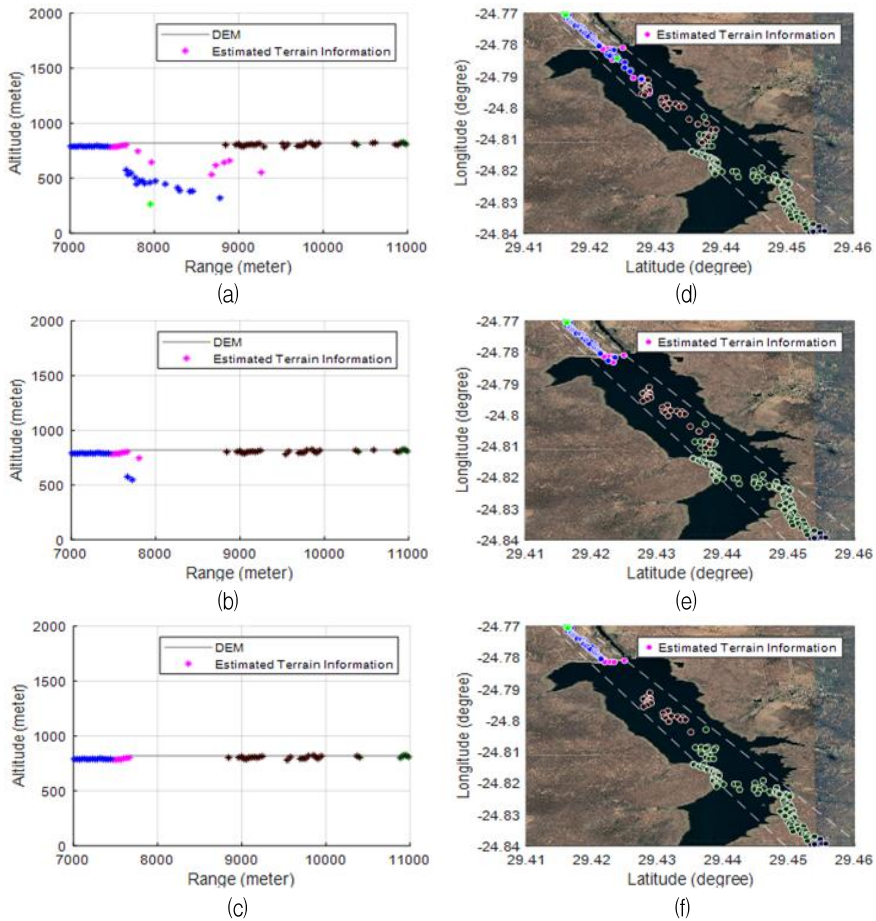


그림 5. 호수 지역에 대한 탐지 기법 별 지형 정보 획득 결과 예시
 - 평면도 (a) 신호 전력 기반 (b) RCS 기반 (c) RCS 기반 + 마스킹 기법
 - 측면도 (d) 신호 전력 기반 (e) RCS 기반 (f) RCS 기반 + 마스킹 기법

Fig. 5. Example of terrain information acquisition results by detection method for lakeside area
 - Top-view (a) Signal power based (b) RCS based (c) RCS based + masking method
 - Side-view (d) Signal power based (e) RCS based (f) RCS based + masking method

이와 같은 현상은 호수와 지표면이 인접한 지역에서 더 두드러지게 나타난다. 그림 5의 (a), (d)는 각각 호수 지형을 스캔한 1개 스캔 데이터를 신호

전력 기반으로 처리한 탐지 결과를 지도 위에 도시한 평면도와 DEM과 비교한 측면도이다. 평면도를 보면 호수 지역에 다수의 탐지 결과가 마치 정상적

으로 생성되고 있는 것처럼 보이지만 측면도를 보면 호수 영역에 해당하는 탐지 결과들은 육상 지형 반사 신호의 거리 방향 부엽에 의해 신호가 훼손되어 육상 지역 결과에 비해 매우 낮은 고각 정확도를 가지는 것을 볼 수 있다. 그림 5의 (c), (d), (e), (f)는 각각 동일한 데이터를 제안한 RCS 기반, RCS 기반 + 마스킹 기법을 이용해 처리한 결과이다. 그림에서 볼 수 있듯이 성능이 저하된 호수 지역의 탐지 결과들이 단계적으로 제거되는 것을 확인함으로써, 고도

추정 정확도 성능 향상을 기대할 수 있었다.

그림 6, 7, 8은 각각 산악 지형, 호수 지형에 대하여 식 (8)에서 사용한 거리 방향 부엽 마진, α ,를 20 dB ~ 40 dB까지 5dB 간격으로 변화시키면서 획득한 오탐지율, 지형 고각 추정 정확도, 탐지 손실율이다. 그림 6을 통해 제안 기법을 적용 시, 단계적으로 오탐지 성능이 향상되는 것을 확인할 수 있었으며 특히 산악 지역의 경우 오탐지율이 최대 15% 이상 현저하게 감소하는 것을 확인하였다.

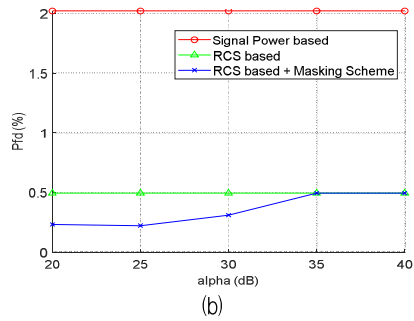
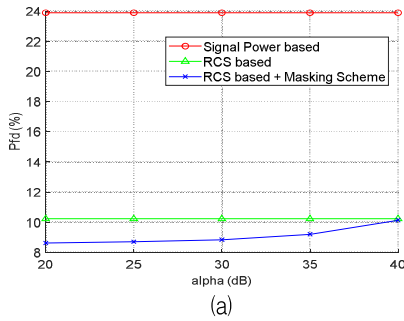


그림 6. 거리 방향 부엽 마진에 따른 오탐지율 (a) 산악 지역 (b) 호수 지역

Fig. 6. False-alarm rate with respect to range side-lobe margin (a) Mountainous area (b) Lakeside area

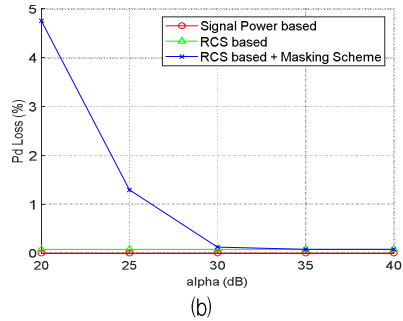
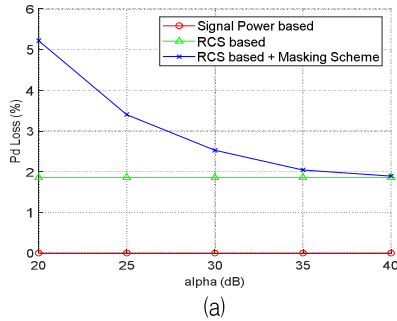


그림 7. 거리 방향 부엽 마진에 따른 탐지 손실율 (a) 산악 지역 (b) 호수 지역

Fig. 7. Detection loss probability with respect to range side-lobe margin (a) Mountainous area (b) Lakeside area

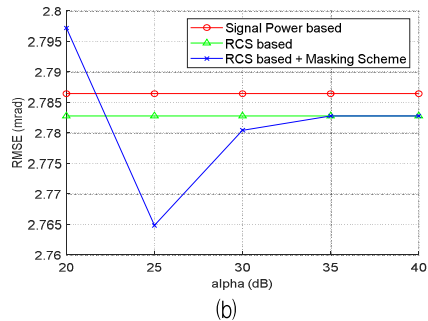
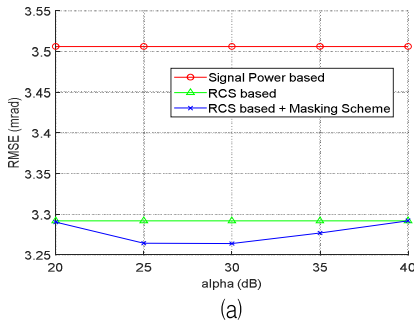


그림 8. 거리 방향 부엽 마진에 따른 탐지 손실율 (a) 산악 지역 (b) 호수 지역

Fig. 8. Detection loss probability with respect to range side-lobe margin (a) Mountainous area (b) Lakeside area

마찬가지로 그림 7의 고각 정확도의 경우에도, 두 지역 모두 거리 부엽 마진이 25 dB 이상일 경우 거리 부엽에 의해 훼손된 탐지 결과가 제거되면서 고각 정확도 성능이 향상되었으며, 특히 호수 지역의 경우 두드러진 고각 정확도 성능 향상을 관측할 수 있었다. 반면 탐지 손실율의 경우에는 두 지역 모두 최대 5% 이하로 오탐지 확률 감소 및 고각 정확도 성능 향상 효과에 비해 미미한 수준인 것을 확인했다. 다만, 그림 8에서 볼 수 있듯이 두 지표 모두 α 값이 20 dB이하가 될 경우 유효한 데이터까지 과도하게 제거하면서 탐지 손실율이 증가하고 고각 정확도 성능 또한 저하될 수 있으므로 적절한 거리 부엽 마진 설정이 필요하다. 다만 본 연구에서 수행한 것과 같이 비행 시험 데이터 분석 등을 통해 적절한 거리 부엽 마진 임계값을 설정하여 제안된 기법을 적용할 경우, 제안된 기법을 통해 오탐지율 감소 및 고각 정확도 향상을 기대할 수 있을 것으로 보인다.

IV. 결 론

본 논문에서는 TFR의 탐지 알고리즘에 대해 고찰하고, 기존 레이다 기반 탐지 방식의 한계점을 분석한 후 이를 보완할 수 있는 두 단계 주엽 신호 탐지 기법을 제안하였다.

첫 번째 단계에서는 RCS 기반 탐지를 수행하여 거리 별 수신 신호 전력의 차이를 보상하고, 거리에 독립적인 임계값 적용을 통해 오탐지를 감소시켰다. 두 번째로, 거리 방향 부엽 억제를 위한 마스킹 기법을 제안하여 강한 반사 신호에 의해 인접 거리에서 발생하는 오탐지 결과들을 효과적으로 제거하여 성능을 향상시켰다.

향 후 과제에서는 충분한 비행 시험 데이터를 획득하여, 본 연구에서는 시험 데이터의 한계로 인해 확인하지 못했던 다양한 형태의 지형에 대한 제안 기법의 유효성을 검증할 계획이다. 또한 마찬가지로 다양한 지형에 대한 시험 데이터 분석 결과를 통해 제안한 기법에 필요한 최적 거리 부엽 마진 임계값을 획득을 목표로 연구를 수행할 예정이다.

References

- [1] P. C. Oxley, "Terrain Following and Terrain Avoidance Algorithms", IEEE Colloquium on Navigation, Guidance, and Control on Aerospace, pp. 1-2, Nov, 1989.
- [2] J. Hwang, H. Shin, S. Lim, H. Kim, and B. Cho, "Beam Steering Method of AESA for Terrain Following Mode", The Journal of KIIT, Vol. 24, No. 1, pp. 133-144, Jan. 2026. <http://doi.org/10.14801/jkiit.2026.24.1.133>.
- [3] W. Jiang, Y. Huang, J. Wu, W. Li, and J. Yang, "A New Approach for Terrain Following Radar Based on Radar Angular Superresolution", Proc. of the Third International Conference on Communications, Signal Processing, and Systems, Lecture Notes in Electrical Engineering, Vol. 322, pp. 223-231, Nov. 2015. https://doi.org/10.1007/978-3-319-08991-1_23.
- [4] M. Yoo, S. Kang, H. Lee, D.-S. Jang, and S. Lee, "A Study on a Terrain Scan Data Generation Algorithm Using Digital Terrain Elevation Data (DTED)", Int. J. Aeronaut. Space Sci, Vol. 24, pp. 1418-1429, Aug. 2023. <https://doi.org/10.1007/s42405-023-00641-0>.
- [5] D.-Y. Choi, et al, "Development of a Terrain Scan Data Generation Algorithm Using DTED", The Proceedings of the 2021 Asia-Pacific International Symposium on Aerospace Technology (APISAT 2021), Singapore, Vol. 2, pp. 1111-1124, Sep. 2023. https://doi.org/10.1007/978-981-19-2635-8_81.
- [6] A. Jalil, H. Yousaf, and M. I. Baig, "Analysis of CFAR techniques", 13th International Bhurban Conference on Applied Sciences and Technology (IBCAST), Islamabad, Pakistan, pp. 654-659, Jan. 2016. <https://doi.org/10.1109/IBCAST.2016.7429949>.
- [7] H. Rohling, "Ordered statistic cfar technique-an overview", 12th International Radar Symposium (IRS), Leipzig, Germany, pp. 631-638, Sep. 2011.
- [8] R. S. Narasimhan, A. Vengadarajan, and K. R.

Ramakrishnan, "Mitigation of sidelobe clutter discrete using sidelobe blanking technique in airborne radars", 2018 IEEE Aerospace Conference, Big Sky, MT, USA, pp. 1-12, Mar. 2018. <https://doi.org/10.1109/AERO.2018.8396403>.

- [9] D. A. Shnidman and S. Toumodge, "Sidelobe blanking with integration and target fluctuation", IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems, Vol. 38, No. 3, pp. 1023-1037, Jul. 2002. <https://doi.org/10.1109/TAES.2002.1039418>.
- [10] B. R. Mahafza and A. Z. Elsherbeni, "Matlab Simulations for Radar Systems Design", Chapman & Hall/CRC, pp. 237-238, Dec. 2003.
- [11] T. Jeong, W. Lee, S. Park, D. Kwon, and B. Cho, "A Study on the Land and Island Target Rejection Method for Airborne Maritime Surveillance Radar", Journal of KIIT, Vol. 22. No. 10, pp. 97-104, Oct. 2024. <https://doi.org/10.14801/jkiit.2024.22.10.97>.
- [12] U. S. Geological Survey(USGS) 1-arc SRTM based DEM Data, <https://earthexplorer.usgs.gov/>. [accessed: 2025.10.27.].
- [13] H. Lee, S. Hahn, and S. Lee, "Generation of Terrain Profile for Terrain Following", 33rd Congress of the International Council of the Aeronautical Sciences, Stockholm, Sweden, Sep. 2022.
- [14] M. I. Skolnik, "Radar Handbook 3rd", McGraw-Hill, pp. 9-42, 2008.

황 정 훈 (Jeonghun Hwang)



2003년 2월 :한양대학교
전자전기컴퓨터공학부(공학사)
2005년 2월 : KAIST 전기 및
전자공학과(공학석사)
2020년 2월 : 충남대학교
전자공학과(공학박사)
2005년 2월 ~ 현재 :

국방과학연구소 책임연구원
관심분야 : 항공기 탑재 레이더/SAR 체계 설계 및
신호처리

김 형 석 (Hyung-Suk Kim)



1997년 2월 : 경북대학교
전자공학과(공학사)
1999년 2월 : 경북대학교
전자공학과(공학석사)
2006년 7월 ~ 현재 :
국방과학연구소 책임연구원
관심분야 : 항공기 탑재

레이더/SAR 시스템

저자소개

신 혁 수 (Hyuksoo Shin)



2011년 2월 : 고려대학교
컴퓨터통신공학부(공학사)
2020년 2월 : 고려대학교
전파통신공학과(공학박사)
2019년 12월 ~ 현재 :
국방과학연구소 선임연구원
관심분야 : 항공기 탑재 레이더

체계 설계 / 신호처리