

멀티패스 환경에서 이중 주파수 회피와 학습 기반 보정을 결합한 고도 추정 오차 분석

Dual-Frequency Avoidance and Learning-Based Correction for Altitude Error Analysis in Multipath Environments

박명훈 · 김 정 · 권세웅 · 황순혁 · 이소영

Myung-Hoon Park · Jeong Kim · Se-Woong Kwon · Sun-Hyeok Hwang · So-Yeong Lee

요 약

본 논문은 지상 반사로 인한 멀티패스 간섭이 저고도 표적 고도 추정에 미치는 영향을 분석하고, 이를 단순한 교란 요인이 아닌 보조 정보원으로 활용하는 새로운 기법을 제안하였다. 기존 이중 주파수 회피 기법은 평균 제곱 오차를 안정화하는 데 효과적이지만, 잔여 편향과 극단 구간의 불안정성으로 인한 한계가 존재한다. 본 연구에서 제시한 MARS(multipath-assisted radar sensing)는 스펙트럼 기반 보조 관측치를 학습하여 잔여 오차를 추정하고, 이를 회피 기반 추정과 불확실도 가중 결합함으로써 성능을 개선하였다. 시뮬레이션 결과, 제안 기법은 전반적으로 우수한 성능을 보였으며, 특히 최악 구간에서의 안정성을 확보함으로써 실제 운용 환경에서의 신뢰성을 크게 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

Abstract

This study investigates the impact of ground-reflected multipath on low-altitude target height estimation and proposes a novel approach that exploits multipath as an auxiliary information source rather than treating it solely as interference. While conventional dual-frequency avoidance reduces the root-mean-square error, it still suffers from residual bias and instability in the tail region. To overcome these limitations, we introduced Multipath-Assisted Radar Sensing (MARS), which learns spectral features to generate auxiliary corrections and fuses them with avoidance-based estimates through an uncertainty-weighted combination. The simulation results demonstrate that the proposed method consistently outperforms the baseline, avoidance, and auxiliary-only schemes in terms of the RMSE, bias, and CVaR95. In particular, MARS significantly improves estimation reliability under worst-case scenarios, thereby enhancing the operational robustness of low-altitude radar systems.

Key words: Multipath, Height Estimation, Dual-Frequency Avoidance, Uncertainty-Weighted Fusion, Learning-Based Correction

I. 서 론

멀티패스 현상은 저고도 표적 탐지에서 레이다 성능을

제한하는 대표적인 요인으로 알려져 있다. 표적까지의 직접 경로와 지표면 또는 해수면 반사경로가 동시에 수신기에 도달할 경우, 두 신호의 위상차에 의해 간섭이 발생하

LIG넥스원(LIG Nex1)

· Manuscript received September 19, 2025 ; Revised October 1, 2025 ; Accepted October 22, 2025. (ID No. 20250919-105)

· Corresponding Author: Myung-Hoon Park (e-mail: pmh604god@gmail.com)

고 수신 전력은 주파수에 따라 주기적인 진폭 변화를 보이게 된다. 특정 주파수에서는 신호가 급격히 약화되거나 소실되는 널 구간이 나타나며, 이러한 현상은 레이다 탐지 확률을 저하시킬 뿐만 아니라 고도 추정 과정에서도 체계적인 편향을 발생시킨다^{[1],[2]}. 결과적으로 저고도 표적의 위치를 안정적으로 추정하는 것이 어렵게 되며, 이는 실질적인 작전 운용에서 탐지 누락이나 추적 안정성 저하로 이어질 수 있다.

이와 같은 문제를 해결하기 위해 다양한 연구가 진행되어 왔다^{[3]-[6]}. 대표적으로 이중 주파수 운용은 서로 다른 파장에서 널 위치가 달라지는 특성을 활용하여, 특정 주파수에서 발생하는 고도 추정 오류를 다른 주파수로 보완하는 방법이다. 두 주파수에서 얻은 추정치를 적절한 가중치를 통해 융합하면 평균 오차를 줄이고 전반적인 신뢰성을 향상시킬 수 있음이 여러 연구에서 보고된 바 있다. 이외에도 드웰 간 위상 제어, 송수신 파형의 다양화, 안테나 배치 최적화 등 여러 기법들이 제안되어 멀티패스 간섭의 영향을 완화하려는 노력이 이루어져 왔다. 이러한 방법들은 멀티패스를 억제하거나 회피하는 방향에 초점을 맞추어 발전해 왔으며, 실제 시스템 운용에서도 널리 적용되고 있다.

그러나 멀티패스는 반드시 제거해야 할 교란원으로만 볼 필요는 없다. 직접경로와 반사경로가 만들어내는 스펙트럼 변동 패턴은 표적의 고도와 경로 차이에 의해 결정되므로, 이를 분석하면 추가적인 정보를 얻을 수 있다^[7]. 다시 말해, 멀티패스 신호 자체에는 고도 추정을 보완할 수 있는 유용한 통계적 특징이 포함되어 있으며, 이를 적절히 활용한다면 기존 회피 기법과는 다른 새로운 방식의 고도 추정이 가능하다.

본 논문에서는 이러한 아이디어를 구체화하여, 멀티패스 환경에서 수신된 스펙트럼의 통계적 피처(feature)를 보조 관측치로 추출하고 이를 기존 이중 주파수 운용과 결합하는 새로운 고도 추정 방법을 제안한다. 제안하는 기법은 MARS(multipath-assisted radar sensing)라 하며, 평균 성능 개선 효과가 입증된 이중 주파수 회피 방법에 보조 관측치를 융합함으로써, 전반적 정확도(RMSE)와 체계적 편향(bias), 그리고 최악 구간 안정성(CVaR95)을 동시에 개선하는 것을 목표로 한다.

본 연구에서 제안하는 MARS는 기존 회피 방법이 제공하는 평균 성능 안정화 효과를 유지하면서도, 스펙트럼 기반 보조 관측치가 추가되어 바이어스와 꼬리 위험을 줄인다는 점이다. 이를 통해 멀티패스 환경을 단순히 회피해야 할 장애 요소가 아니라, 성능 개선을 위한 보완적 정보원으로 활용할 수 있음을 확인하였다.

II. 제안기법

본 장에서는 제안하는 MARS 기법의 이론적 배경과 세부 원리를 다룬다. 먼저 두-경로 신호모델을 통해 멀티패스 환경에서 수신 신호가 형성되는 과정을 수학적으로 나타내고, 이로부터 고도 추정 과정에서 발생하는 오차를 설명한다. 이어서 이러한 문제를 보완하기 위한 MARS 구조를 제시하고, 보조 관측치의 역할과 이중 주파수 회피와의 결합 방식을 상세히 기술한다.

2-1 신호모델 및 문제정의

멀티패스 환경에서 레이다 수신 신호는 직접경로와 반사경로의 합성으로 표현된다. 송신 안테나가 고도 H_t 에 위치하고, 표적이 고도 h , 경사거리 R 에 있을 때, 직접경로와 반사경로의 길이는 식 (1)과 같다.

$$R_d = \sqrt{R^2 + (h - H_t)^2}, R_r = \sqrt{R^2 + (h + H_t)^2} \quad (1)$$

이때 $\Delta R = R_r - R_d$ 은 표적 고도에 따라 결정되며, 결과적으로 멀티패스 간섭의 위상 조건을 지배한다. 저고도 표적일수록 반사경로와 직접경로의 차이가 커지므로, 수신 신호는 더욱 강한 주기적 변동을 나타내게 된다.

일반적으로 멀티패스는 다양한 경로로부터 수신되기 때문에 식 (2)와 같이 다중 반사 성분의 합으로 표현되며, 전력 관점에서는 복수의 간섭 주기가 중첩될 수 있다.

$$E(f_c) = \sum_{k \in \{d, r_1, \dots, r_K\}} \gamma_k \alpha_k e^{j \frac{2\pi f}{c} R_k} + n \quad (2)$$

그러나 저고도 해상 감시의 낮은 입사각·완만한 거칠기 조건에서는 우세한, 거울반사한 경로가 리플의 주기·

위상을 지배하는 경우가 많아 단일 반사 근사로 재현할 수 있다. 따라서 단일 표적과 직접경로 및 우세한 단일 반사(specular)를 전제로 한 두-경로 모델을 사용하여 반송 주파수 f_c 에서 수신 전계를 나타내면 식 (3)과 같다.

$$E(f_c) = \alpha_d \exp\left(j \frac{2\pi f_c}{c} R_d\right) + \Gamma \alpha_r \exp\left(j \frac{2\pi f_c}{c} R_r\right) + n$$

$\alpha_{d,r}$: 직접/반사 경로 이득(전파/시스템 이득 포함)
 Γ : 프레넬 반사계수
 $R_{d,r}$: 직접/반사 경로 길이(m)
 c : 전파 속도(m/s)
 n : 잡음 전계(V/m)

위 식은 단순히 두 파가 합쳐진 형태이지만, 해석적으로는 두 가지 중요한 특징을 포함한다. 첫째, 두 경로의 위상차는 ΔR 에 의해 결정되며, 따라서 표적 고도에 따라 간섭의 형태가 달라진다. 둘째, 반사계수 Γ 는 입사각과 편파 조건에 따라 변하므로, 동일한 고도 조건에서도 환경 특성에 따라 간섭의 세기와 위상이 달라질 수 있다. 이는 멀티패스가 단순한 잡음이 아니라 표적 고도와 환경 정보가 함께 반영된 구조적 현상임을 의미한다. 잡음을 일시 무시하면 수신 전력은 식 (4)와 같이 표현되며 상수항과 교차항을 정리하면 \cos 간섭항이 나타난다. 이 전개로부터 전력 스펙트럼은 식 (5)와 같은 코사인 간섭 패턴을 형성한다.

$$E(f_c) = |\alpha_d|^2 + |\Gamma \alpha_r|^2 + 2Re\left\{\alpha_d (\Gamma \alpha_r)^* e^{j \frac{2\pi f_c}{c} (R_d - R_r)}\right\} \quad (4)$$

$$P(f_c) \approx A + B \cos\left(\frac{2\pi f_c}{c} \Delta R + \phi_\Gamma\right)$$

A, B : 경로 이득에 따른 상수(W)
 ϕ_Γ : 반사 위상(rad)

이 표현은 고도 변화가 ΔR 의 변화를 유도하고, 그 결과 스펙트럼 상에서 주기적인 증폭과 감쇠가 나타난다는 사실을 보여준다. 특히 B 가 클 경우 널 구간의 전력 저하는 수십 dB에 이를 수 있어, 표적 탐지 확률에 치명적인 영향을 줄 수 있다. 하지만 동시에 이 간섭 패턴은 고도에 종속된 구조적 흔적이므로, 적절히 분석하면 고도 추정에 보조적으로 활용할 수 있는 가능성을 가진다. 레이다는

일반적으로 표적 고각 θ 를 추정된 후 기하학적 관계를 통해 고도를 산출한다. 그러나 멀티패스에 의한 주기적 위상차가 반영되면 고도 추정 역시 체계적인 오차를 포함하게 된다.

직접경로(R_d)와 반사경로(R_r)의 거리차(ΔR)는 그림 1과 같이 수신 신호의 위상차를 유발하고, 이 위상차는 주파수 영역에서 $\Delta f = c/\Delta R$ 간격의 주기적 리플(spectral ripple)로 나타난다. 이러한 리플의 주기성과 위상 진동은 고각 추정 과정에도 그대로 반영되어, 특정 고도 조건에서 추정 고각이 주기적으로 변동하는 주기적 바이어스(periodic bias)를 형성한다. 즉, 두 신호의 간섭이 위상-고각-고도의 순서로 전이되며, 결과적으로 고도 추정 값이 실제 값과 일정한 주기로 차이를 보이게 된다. 이러한 현상을 정량적으로 표현하면 다음과 같으며, 멀티패스 간섭에 의해 발생하는 고각 바이어스(b_θ)와 추정 고도(\hat{h})를 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{h} = H_r + R \tan(\theta + b_\theta + \epsilon_\theta), \quad b_\theta \approx \sin\left(\frac{2\pi \Delta R}{\lambda} + \phi_r\right)$$

θ : 실제 고각(rad)
 b_θ : 멀티패스에 의한 체계적 바이어스(rad)
 ϵ_θ : 잡음성 오차(rad)
 ϕ_r : 반사 위상(rad)

이 관계는 멀티패스 환경에서 추정 고도가 주기적인 바이어스를 포함할 수밖에 없음을 보여준다. 특히 저고도 조건에서는 $\tan(\theta)$ 의 기울기가 크기 때문에 작은 각도

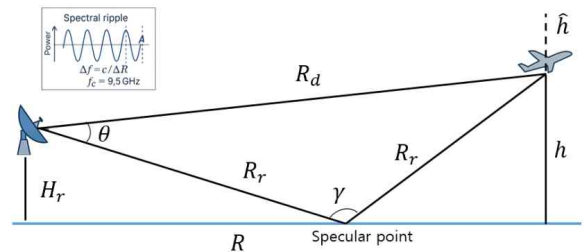


그림 1. 직접경로 및 반사경로에 따른 고각 바이어스 개념도
 Fig. 1. Conceptual diagram of elevation bias induced by direct and reflected paths.

바이어스가 큰 고도 오차로 증폭된다. 이는 평균 오차의 증가뿐 아니라 편향의 누적, 그리고 최악 구간에서의 오차 분포 꼬리 확대를 초래한다.

따라서 멀티패스는 억제해야 할 간섭원입과 동시에, 고도 추정의 불확실성을 유발하는 구조적 원인으로 볼 수 있다. 본 논문에서는 이를 단순 회피로만 다루지 않고, 스펙트럼의 변동 특성을 보조 관측치로 활용하여 이중 주파수 회피와 결합하는 새로운 고도 추정 방법을 제시한다.

2-2 제안기법

기존 멀티패스 활용 고도추정은 주로 이중 주파수 등 다이버시티 기반 회피로 평균 오차를 낮추거나, 캡스트럼/자기상관 등 스펙트럼 도메인 단일 지표로 경로차를 역추정하여 보정하는 방식이 보고되어 왔다. 이에 비해 본 연구의 MARS는 회피 추정치를 사전(prior)으로 두고, 다중 스펙트럼 피처를 학습해 잔여 고도오차(보정치)와 그 불확실도를 동시 추정된 뒤, 불확실도 가중 결합으로 단일 스템에서 융합한다. 환경 불일치 시에는 게이팅/클리핑으로 보정량을 자동 억제하도록 설계되어, 평균 성능 안정화와 꼬리 위험 완화를 동시에 달성한다는 점에서 차별적이다.

본 절에서는 제안하는 MARS의 구조와 세부 원리를 설명한다. MARS는 기본적으로 이중 주파수 운용을 통해 널 현상을 회피하면서, 동시에 멀티패스 간섭 패턴에서 추출한 보조 관측치를 결합하여 성능을 개선하는 방법이다. 이를 통해 평균 정확도, 체계적 편향, 그리고 최악 구간 안정성을 함께 향상시키는 것을 목표로 한다.

2-2-1 이중 주파수 회피(AVOID)

멀티패스 간섭은 파장에 의존하기 때문에, 서로 다른 반송 주파수를 사용하면 간섭 최소 지점이 달라지게 된다. 따라서 두 개의 주파수에서 얻은 고도 추정치를 함께 활용하면, 한쪽 주파수에서 널이 발생하더라도 다른 쪽 주파수에서 이를 보완할 수 있다. 기존 연구에서는 이러한 주파수 다이버시티(diversity) 원리를 기반으로 한 회피 기법이 널리 적용되어 왔다. 본 논문에서는 이를 단순화

하여 두 주파수 추정치를 가중 융합하는 방식으로 식 (7)과 같이 표현하였다.

$$\hat{h}_{avoid} = \frac{\omega_1 \hat{h}_1 + \omega_2 \hat{h}_2}{\omega_1 + \omega_2}$$

(7)

ω_i : 신뢰도 기반 가중치

가중치는 일반적으로 각 추정치의 분산과 바이어스 크기에 따라 설정된다. 만일 분산이 작은 주파수에는 큰 가중치를, 널 근처에서 추정 안정성이 떨어진 주파수에는 작은 가중치를 부여한다. 이 방식은 평균 오차를 줄이는데 많이 사용되며, 실제로 단일 주파수 운용에서는 특정 주파수에서 발생하는 깊은 널이 평균 성능을 저하시키지만 두 주파수를 함께 운용하면 널이 동시에 발생하지 않기 때문에 평균 성능을 안정적으로 유지할 수 있다.

그러나 이중 주파수 회피에도 한계가 존재한다. 주파수 간 융합은 평균 성능을 높이지만 특정 주파수에서 나타나는 잔여 바이어스가 완전히 제거되지 않는다. 또한 분산 기반 가중치 설계는 평균적인 추정 성능에는 효과적이지만 최악 구간에서의 꼬리 분포를 개선하는 데는 한계가 있다. 이러한 이유로 단순한 회피 기법만으로 신뢰성 있는 고도 추정을 달성하기 어렵고, 추가적인 보조 매커니즘이 필요하다.

2-2-2 보조 관측치 기반 보정(ASSIST)

이중 주파수 회피는 평균 성능을 안정화하는 데 효과적이지만, 잔여 바이어스와 꼬리 구간에서의 큰 오차는 여전히 남아 있을 수 있다. 이는 단순히 주파수를 달리해도 간섭 패턴의 주기성이 완전히 상쇄되지 않기 때문이다. 따라서 회피만으로는 한계가 있으며, 멀티패스가 만들어내는 구조적 패턴을 보조적으로 활용할 필요가 있다.

멀티패스 간섭은 주파수에 따른 전력 변동으로 나타나며, 이는 고도 및 경로 차와 직접적으로 연관된다. 즉, 수신 스펙트럼의 통계적 특성을 분석하면 고도 추정치의 바이어스 방향과 크기를 예측할 수 있다. 본 논문에서는 이를 통계적 피처로 변환하여 기존 기법 추정치를 보정하는 방법을 제안한다.

우선 dwell 구간에서 측정된 스펙트럼 $S(f)$ 로부터 다

양한 통계적 지표를 추출한다. 예를 들어 평균, 분산, 주 기성 관련 지표, 그리고 푸리에 변환을 통한 주파수 성분 등이 포함된다. 이 과정을 통해 피쳐 벡터 $\phi \in R^D$ 를 구성한다. 학습 단계에서는 이 피쳐 벡터와 기준 기법 고도 추정 오차 $\Delta h = h - \hat{h}_{base}$ 사이의 관계를 회귀(regression) 모델로 학습한다.

$$\widehat{\Delta h} = f(\phi)$$

ϕ : 스펙트럼 기반 통계적 피쳐 벡터

Δh : 기준 기법 고도 추정 오차(m)

$f(\cdot)$: 학습된 회귀 모델

(8)

운용 단계에서는 새로운 dwell 스펙트럼으로부터 피쳐 벡터를 추출하고, 학습된 함수 $f(\cdot)$ 을 통해 보정치 $\widehat{\Delta h}$ 를 계산한다. 이를 식 (9)와 같이 기준 기법 추정치에 더해 보정된 추정치를 산출한다.

$$\hat{h}_{assist} = \hat{h}_{base} + \widehat{\Delta h} \quad (9)$$

이 방식은 평균 오차를 크게 줄이지는 못할 수 있으나, 멀티패스에 의해 발생하는 체계적 바이어스를 완화하고 꼬리 분포를 개선하는 데 효과적이다^{[8],[9]}. 따라서 ASSIST는 독립적인 대안적 추정기라기보다는, 회피 기법을 보완하는 보조 모듈의 성격을 가진다. 특히 ASSIST의 장점은 계산적 단순성에 있다. 한 번 학습된 보정 모델은 새로운 시나리오에서도 빠르게 적용될 수 있으며, 기존 레이다 운용 체계에 큰 수정 없이 부가 모듈 형태로 결합할 수 있다. 이는 실질적인 적용 가능성을 높이는 요소로 볼 수 있다. 한편, ASSIST 기법의 구체적인 데이터 생성 절차와 학습 프로토콜 그리고 이를 활용한 보정 과정은 3-1절에서 상세히 기술하였다.

2-2-3 MARS 최종 구조

MARS는 이중 주파수 회피 추정을 사전으로 두고, 멀티패스 간섭 패턴에서 추출된 보조 관측치를 약한 측정(pseudo-measurement)으로 결합하여 최종고도 추정치를 산출한다. 본 결합은 동적 칼만 필터가 아니며, 회피 기반 추정치를 사전으로 두고 보조 관측(pseudo-measurement)을 정적 LMMSE 형태의 단일 스텝 가중 결합으로 융합한

것으로, 식 (10)과 같이 표현할 수 있다. 이득 K 는 회피 추정의 분산과 보조 관측의 신뢰도를 동시에 반영하여 정의된다.

$$\hat{h}_{MARS} = \hat{h}_{avoid} + K \widehat{\Delta h}_{dual}, \quad K = \frac{\sigma_{avoid}^2}{\sigma_{avoid}^2 + R_{assist}}$$

\hat{h}_{MARS} : 이중 주파수 회피 기반 추정치(m)

$\widehat{\Delta h}_{dual}$: 듀얼 주파수 피쳐 기반 보정치(m) (10)

회피 추정 분산은 두 주파수 채널의 분산을 가중 평균하여 식 (11)을 통해 계산한다.

$$\sigma_{avoid}^2 = \frac{\omega_1^2 \sigma_{h,1}^2 + \omega_2^2 \sigma_{h,2}^2}{(\omega_1 + \omega_2)^2}, \quad \sigma_{h,i}^2 \approx (R \sec^2 \theta)^2 \sigma_{\theta,i}^2$$

ω_i : 채널 가중치

$\sigma_{h,i}^2$: 채널 i 의 고도 분산(m²)

$\sigma_{\theta,i}^2$: 채널 i 의 고각 분산(rad²)

R : 경사 거리(m)

θ : 실제 고각(rad) (11)

보조 관측은 듀얼 주파수 스펙트럼 피쳐 ϕ_{dual} 을 기반으로 보정치와 불확실도를 동시에 추정한다.

$$\widehat{\Delta h}_{dual} = f(\phi_{dual}), \quad R_{assist} = g(\phi_{dual})$$

ϕ_{dual} : 듀얼 주파수 스펙트럼 기반 피쳐 벡터

$f(\cdot)$: 보정치 회귀 모델

$g(\cdot)$: 불확실도 추정 모델 (12)

최종적으로 MARS 추정치의 분산은 다음 식 (13)과 같이 감소된 형태로 나타난다.

$$Var(\hat{h}_{MARS}) = \frac{\sigma_{avoid}^2 R_{assist}}{\sigma_{avoid}^2 + R_{assist}} \quad (13)$$

이 관계는 보조 관측의 신뢰도가 높을수록 보정 효과가 강하게 반영되고, 신뢰도가 낮을 경우 회피 추정치로 수렴하도록 설계되었음을 보여준다. 따라서 평균 성능 안정화, 체계적 편향 감소, 꼬리 위험 완화를 동시에 달성할 수 있다.

실제 운용 환경에서는 보조 관측치가 잡음이나 외란으로 인해 과도하게 산출될 수 있으므로, 보정 과정의 안

정성을 보장하기 위해 추가적인 강건화 절차가 필요하다. 이를 위해 이득 K 와 보정치 $\widehat{\Delta h}_{dual}$ 에는 상·하한을 설정하고, 보조 관측 불확실도가 일정 임계치를 초과할 경우 보정을 비활성화하도록 한다. 이를 정리하면 식 (14)와 같다.

$$\hat{h}_{MARS} = \hat{h}_{avoid} + \Pi_{[K_{min}, K_{max}]} \left(\frac{\sigma_{avoid}^2}{\sigma_{avoid}^2 + R_{assist}} \right) \times \Pi_{[-\Delta h_{max}, \Delta h_{max}]}(\widehat{\Delta h}_{dual})$$

$\Pi_{[\cdot, \cdot]}$: 구간 사영(클리핑) 연산자
 $K_{min, max}$: 이득의 하한/상한
 Δh_{max} : 보정 한계(m)

이 식은 불확실도가 과도하게 커질 때 보정이 자동으로 억제되고, 추정량이 극단값에 끌려가지 않도록 안정성을 보장한다. 결과적으로 평균 성능은 유지하면서도, 바이어스와 꼬리 분포에 대한 보정 효과를 실질적으로 확보할 수 있다.

III. 시뮬레이션 및 분석

본 장에서는 제안한 MARS 추정기의 동작을 검증하기 위해 구성된 시뮬레이션 환경과 데이터 생성-학습-운용 절차를 기술한다. 신호는 II장에서 정식화한 두-경로 모델을 기반으로 합성하며, 반사계수의 입사각-편파 의존성과 잡음·클러터·위상 변동을 포함한다. 데이터셋은 넓은 파라미터 범위를 무작위 표집하여 구성하고, 동일 분포 내 평가뿐 아니라 분포 경계부(stress region)에서도 안정성을 관찰한다. 학습은 통계적 피쳐에서 보정치 Δh 를 지도 학습으로 추정하도록 설계하며, 운용 단계에서는 이중 주파수 회피 결과를 사전(prior)으로 두고 보조 관측을 불확실도 가중으로 결합한다. 결과 비교는 RMSE, bias, CVaR95로 수행하여 수치 및 그림으로 제시한다.

3-1 데이터 생성 및 학습 시나리오

3-1-1 시뮬레이션 환경 및 변수 표집

시뮬레이션 환경은 함정 고도 H_r 에 설치된 레이더와 저고도 표적을 대상으로 설정하였다. 표적의 위치는

dwell마다 무작위로 주어지며, 경사거리 10~40 km와 고도는 일정 범위 5~200 m의 균일 분포에서 표집하였다.

반송 주파수는 X-대역 운용 조건을 반영하여 f_{c1} 와 f_{c2} 는 각각 9.50, 9.85 GHz로 설정하였다. 각 채널은 60 MHz 대역폭을 가지며 256개의 톤(tones)을 포함하는 다톤 신호로 구성되었다. 이러한 설정은 멀티패스 간섭 패턴을 안정적으로 재현하면서도 주파수 해상도를 확보하기 위함이다. 수신 신호는 잡음, 클러터, 위상 드리프트를 포함하여 합성하였다. 톤 단위의 SNR은 평균 8 dB, 표준편차 4 dB의 정규 분포에서 표집 하였다. dwell 간 위상 드리프트는 평균 0, 분산 σ_ϕ^2 의 정규 분포로 모의하였다.

반사 성분은 식 (2)에 입사각과 편파에 따른 프레넬 반사계수 $\Gamma(\theta, pol)$ 를 적용하여 직접경로와 반사경로 전계를 합성하였으며, 전력 스펙트럼은 $S(f) = |E(f)|^2$ 로 계산하고, 정규화하여 보조 관측 피쳐 추출에 사용하였으며, 시뮬레이션 환경을 요약하면 표 1과 같다.

표 1. 시뮬레이션 기본 사양 요약
Table 1. Simulation baseline specifications.

Parameter	Value / Distribution
Radar installation height	20 (m)
Target altitude (per dwell)	Uniform (5, 200) (m)
Slant range (per dwell)	Uniform (10, 40) (km)
Carrier frequencies	9.50, 9.85 (GHz)
Per-channel bandwidth	60 (MHz)
Tones per channel	256
Tone-level SNR	Normal $l(\mu=8, \sigma=4)$ (dB)
Inter-dwell phase drift	Normal $(\mu=0, \sigma\phi=0.1)$ (rad)
Reflection model	Fresnel coefficient
Reflection phase	Uniform (0, 2π) (rad)
Propagation paths	Two-path (direct+single specular reflection)
Antenna gain	30 (dBi)
Antenna HPBW (az/el)	3, 3 (deg)
Polarization	Linear
Target RCS	Swerling case 1 (mean 1 (m ²))

3-1-2 각도 측정과 기준 기법 오차 라벨

멀티패스 환경에서 관측되는 고각은 실제 고각에 더해 잡음성 오차와 경로 차이에 기인한 주기적 바이어스가 중첩된 형태로 나타난다. 이는 레이다가 직접적으로 관측하는 물리적 신호가 이상적 조건과 어떻게 달라지는지를 정량화하기 위한 중요한 단계이다.

$$\tilde{\theta}_i = \theta + \varepsilon_{\theta,i} + b_{\theta,i}, \quad b_{\theta,i} = k_b \sin\left(\frac{2\pi}{\lambda_i} \Delta R + \phi_b\right)$$

$\tilde{\theta}_i$: 채널 i 의 측정 고각(rad)
 θ : 실제 고각(rad)
 $\varepsilon_{\theta,i}$: 측정 잡음 오차(rad)
 $b_{\theta,i}$: 멀티패스 바이어스(rad)
 k_b : 바이어스 크기 계수(rad)
 λ_i : 채널 i 파장(m)
 ϕ_b : 위상 난수(rad)

식 (15)는 멀티패스가 단순히 SNR을 떨어뜨리는 원인으로 그치지 않고, 관측 고각에 체계적인 주기적 오차를 부여함을 보여준다. 이러한 오차는 특정 고도에서 신호가 반복적으로 과대 또는 과소 추정되는 현상으로 이어지며, 제안 기법에서는 이 패턴을 오히려 보정의 단서로 활용한다.

고각이 결정되면 기하학적으로 표적 고도 추정치가 계산되며, 이때 얻어지는 기준 기법 고도와 실제 고도의 차이를 학습 라벨로 정의한다.

$$\hat{h}_{base,i} = H_r + R_k \tan(\tilde{\theta}_i), \quad \Delta h_k = h_k - \hat{h}_{base,1}$$

$\hat{h}_{base,i}$: 채널 i 기준 기법 고도(m)
 Δh_k : 기준 기법 오차 라벨(채널 1 기준)(m)

기준 기법 고도는 단일 주파수 채널을 활용할 때 나타나는 추정 값으로, 멀티패스 환경에서 신뢰성이 크게 저하된다. 따라서 이 라벨은 학습 단계에서 보정치 회귀 모델이 최소화해야 할 목표 값으로 사용된다.

3-1-3 이중 주파수 회피 추정 절차

단일 주파수 채널만 사용할 경우 널 구간에서 고도 오

차가 심각하게 증가한다. 이를 완화하기 위해 기존에는 서로 다른 주파수 채널에서 얻은 기준 기법 고도를 결합하는 이중 주파수 회피 방식이 사용된다. 핵심 원리는 두 채널의 추정치가 동일 위치에서 동시에 널에 빠질 확률이 낮다는 점에 있다.

$$\hat{h}_{avoid} = \frac{\omega_1 \hat{h}_{base,1} + \omega_2 \hat{h}_{base,2}}{\omega_1 + \omega_2}, \quad \omega_i \propto \frac{1}{\sigma_{\theta,i}^2 + b_{\theta,i}^2}$$

\hat{h}_{avoid} : 회피 기반 고도 추정치(m)
 ω_i : 채널 i 가중치
 $\sigma_{\theta,i}^2$: 채널 i 고각 분산(rad²)
 $b_{\theta,i}$: 채널 i 멀티패스 바이어스(rad)

식 (17)은 각 채널의 신뢰도를 가중치로 반영하여 최종 고도를 추정하는 구조를 갖는다. 고각 추정의 분산이나 바이어스가 큰 채널은 자동으로 낮은 가중치를 부여받고, 상대적으로 안정적인 채널이 결과에 더 크게 기여한다. 이는 널 구간에서의 급격한 오차 증가를 효과적으로 완화시키지만, 여전히 잔여 편향과 꼬리 위험이 남게 된다. 이러한 한계는 보조 관측과의 결합을 통해 보완된다.

3-1-4 학습 프로토콜 및 데이터셋 구성

보조 관측치 기반 학습은 멀티패스 간섭으로 인한 신호 패턴에서 반복적으로 나타나는 통계적 특징을 추측하여, 기준 기법에서 발생하는 잔여 고도 오차를 예측하고 보정하는 것을 목표로 한다. 이를 위해 시뮬레이션 환경에서 다양한 표적 거리와 고도를 무작위로 표집하여 데이터셋을 생성하였다. 각 표본에 대해 기준 기법 오차 라벨 Δh_k 를 산출하고, 이에 대응하는 스펙트럼 기반 피쳐 벡터를 구성하였다. 전체 데이터셋은 학습과 검증 단계로 분리되었으며, 학습 과정의 안정성과 재현성을 확보하기 위해 무작위 분할(seed 고정)과 동일한 분포 조건을 유지하였다.

이 과정은 다변량 회귀 문제로 정의할 수 있다. 피쳐 행렬 $X \in \mathbb{R}^{N \times D}$ 와 라벨 벡터 $Y \in \mathbb{R}^N$ 를 정의하면, 최적 회귀 계수 ψ 는 다음과 같이 추정된다. 여기서 첫 번째 항은 예측 오차 최소화를 의미하며, 두 번째 항은 정규화 항으로 과적합을 방지한다.

$$\min_{\psi} \| Y - X\psi \|_2^2 + \lambda \| \psi \|_2^2 \quad (18)$$

이 목적함수는 Ridge Regression 구조에 해당하며, 닫힌 해는 식 (19)와 같이 주어진다.

$$\psi = (X^T X + \lambda I)^{-1} X^T Y$$

X : 피쳐 행렬
 Y : 라벨 벡터(고도 오차 보정치) (m)
 ψ : 회귀 계수(m)
 λ : 정규화 계수

(19)

이렇게 학습된 회귀 모델은 새로운 환경에서 산출된 스펙트럼 피쳐를 입력받아 보정치를 예측하게 되며, 결과적으로 기준 기법 오차 라벨을 줄이는 역할을 수행한다. 데이터셋의 재현성을 확보하기 위해 동일한 표본 분포와 학습 파라미터 설정을 유지함으로써, 본 연구에서 제시하는 학습 기반 보조 관측치 모델의 성능은 일관되게 검증될 수 있다.

3-2 분석 결과

분석 결과는 신호 스펙트럼의 멀티패스 특성과, 각 기법(BASE, AVOID, ASSIST, MARS)이 고도 추정 성능에 미치는 영향을 단계적으로 보여준다. 우선 멀티패스 환경에서 나타나는 기본 현상을 제시하고, 이후 각 기법의 효과를 RMSE, bias, CVaR95 등의 지표로 비교하였다.

멀티패스의 1차적 영향은 주파수 영역에서 확인된다. 그림 2와 같이, dwell 단위 스펙트럼은 직접파와 반사파의 경로차로 인해 톤 주파수 축에서 규칙적인 리플(ripple)을 나타낸다. 멀티패스는 톤 주파수 축에서 주기적 진폭 변동을 형성한다. 두-경로 모델로부터 스펙트럼 전력은 식 (3)과 같이 근사되며, 리플 주기의 이론값은 $\Delta f \approx c/\Delta R$ 로 주어진다. 그림 1의 f_{c1} (9.50 GHz)과 f_{c2} (9.85 GHz)에서, 톤 인덱스가 증가함에 따라 대략 일정 간격(Δf)으로 피크-덱이 반복되며, 이 반복 패턴을 본 논문에서는 규칙적 리플로 정의한다. ΔR 이 달라지면 Δf 와 위상이 함께 이동하므로, 두 반송 주파수에서 유사하지만 서로 어긋난 리플 패턴이 관찰된다. 이때 자기상관/캡스트럼 기반 피쳐는 해당 주기성과 위상을 안정적으로 포착하여 보조 관측(ASSIST)의 입력 피쳐로 활용된다. 이러한 리플의 주

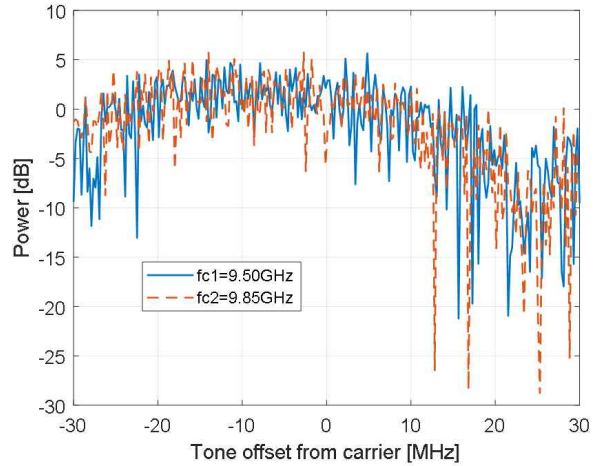


그림 2. 멀티패스 조건에서 dwell 단위 톤-주파수 스펙트럼에 나타나는 간섭 리플

Fig. 2. Interference ripple observed in per-dwell tone- frequency spectra under multipath.

기성과 위상은 경로차와 반송 주파수에 의존하므로, 자기상관/캡스트럼 등 주파수-지연 영역 피쳐가 멀티패스의 존재와 강도를 구분할 수 있는 신뢰 가능한 지표임을 알 수 있다.

보조 관측치의 학습 적합성은 그림 3에서와 같이 예측된 보정치와 기준 기법 오차 라벨 간의 상관관계로 평가

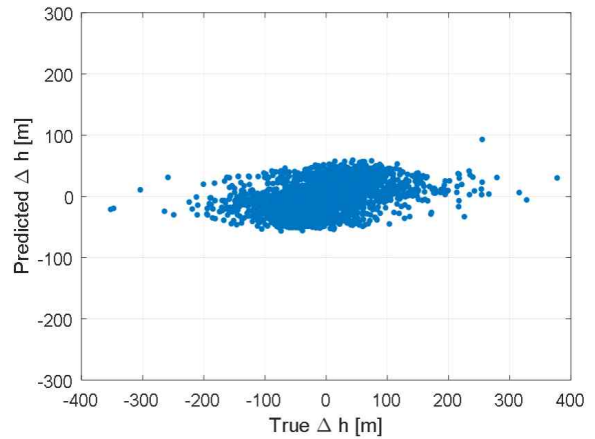


그림 3. 보조 관측치(ASSIST) 학습 적합도: 예측 보정치와 라벨 오차의 산점

Fig. 3. Training adequacy of the assistive model: scatter between predicted correction and labeled error.

된다. 산점은 유의한 상관을 보이지만, 조건에 따라 산포가 증가하는 영역이 공존한다. 이는 보조 관측치가 전 구간에서 강한 단독 추정보다는, 신뢰도(불확실도) 가중을 통한 결합 구조에서 선택적 보정량으로 활용될 때 안정적인 운용이 가능함을 의미한다. 따라서 ASSIST는 평균 오차 축소보다는 편향 성분과 특정 패턴성 오차를 줄이는 용도로 설계되는 것이 합리적이다.

각 기법에 따라 실제 고도-추정 고도 산점도를 보면 그림 4와 같다. 기준 기법은 널 인근에서 이분산적 퍼짐과 기울기 왜곡이 나타나며, 회피(AVOID)는 외측 산포를 줄여 이상적 대각선 주변으로 집적시킨다. 또한 보조 보정(ASSIST)은 특정 구간에서의 체계적 편향을 완화하는 반면, 제안 기법 MARS는 두 효과가 결합되어 산점의 조밀도와 대칭성이 동시 개선된다. 이는 평균 성능과 편향, 두 축 모두에서의 이득이 있음을 나타낸다.

오차 분포 관점에서 보면 양상은 더욱 명확해진다. 그림 5에서 볼 수 있듯이, 회피는 중심부 밀도를 증가시켜 RMSE 감소에 유리하고, 보조 보정은 분포의 비대칭을 줄이며 꼬리 두께를 완화한다. MARS는 중심부 밀집과 꼬리 억제 효과를 동시에 달성한다. 이는 평균적 상황뿐 아니라 최악 구간에서의 신뢰도까지 개선된다는 점을 함의하며, 실제 운용 관점에서 중요한 의미를 갖는다.

또한 그림 6과 같이 시간 축에서의 동적 안정성을 평가

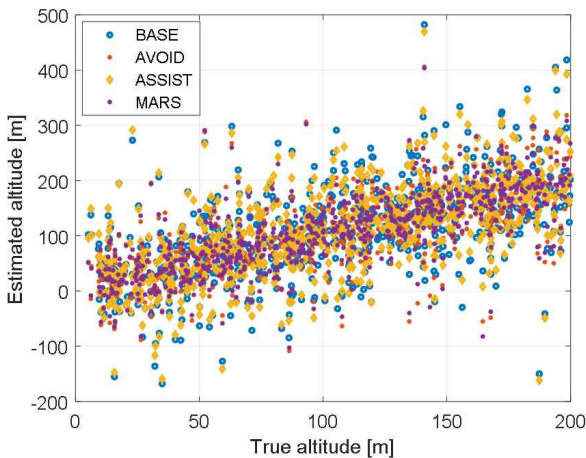


그림 4. 실제 고도 대비 추정 고도의 산점도 비교
Fig. 4. Scatter comparison of true vs. estimated altitude for baseline, avoidance, assist, and MARS.

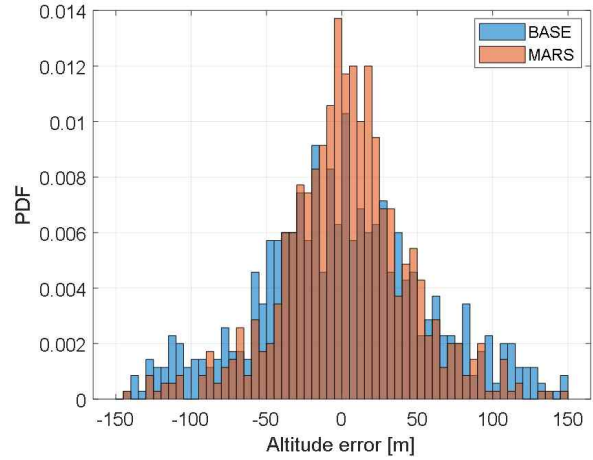


그림 5. 고도 오차 분포 결과
Fig. 5. Distributions of altitude error.

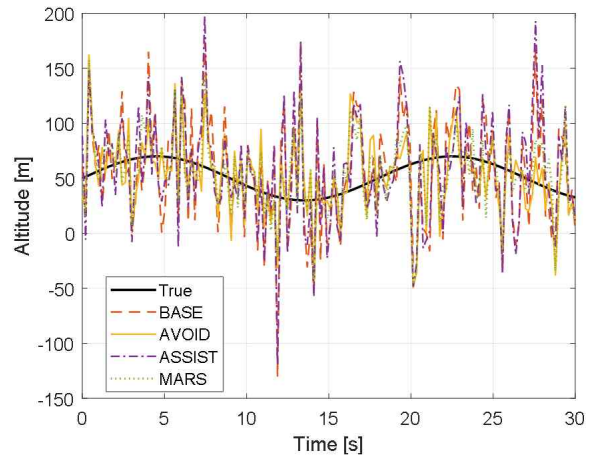


그림 6. 시간에 따른 실제/추정 고도의 비교
Fig. 6. Time-series comparison of true and estimated altitude.

하였다. 회피는 널 통과 시 발생하는 급격한 오차 피크를 억제하고, 보조 보정은 서서히 누적되는 편향을 중심선으로 복귀시키는 효과가 관찰된다. MARS는 두 축의 장점을 결합하여 오차 피크가 낮고 복귀가 빠르며, 일시적 과보정은 게이팅/클리핑에 의해 제한된다. 이는 고정 지표의 개선이 시간에 따른 멀티패스 변조에도 견디는 구조적 개선임을 뜻한다.

이와 같은 결과를 바탕으로 그림 7과 같이 세 기법 (BASE, AVOID, ASSIST, MARS)을 종합적으로 비교한 성능 지표를 요약하였으며, 그 결과는 표 2와 같다. MARS는

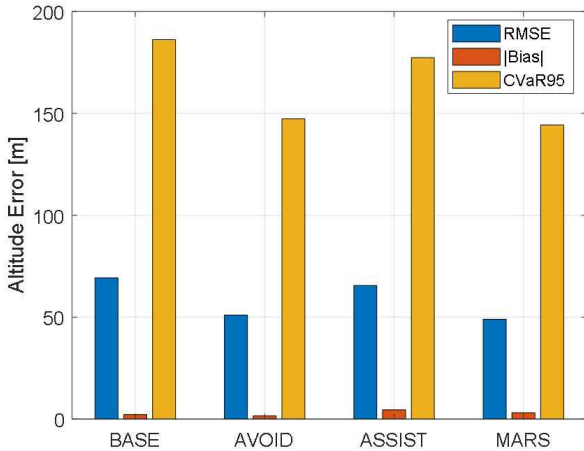


그림 7. BASE, AVOID, ASSIST, MARS 기법 간 성능 지표 비교

Fig. 7. Performance comparison for BASE, AVOID, ASSIST, and MARS.

표 2. 분석 결과 요약(단위: m)

Table 2. Summary of analysis result (unit: m).

	RMSE	Bias	CVaR95
BASE	69.25	2.20	186.24
AVOID	51.04	1.50	147.36
ASSIST	65.51	4.55	177.36
MARS	48.98	3.04	144.31

RMSE와 CVaR95가 가장 낮지만, bias는 AVOID(1.50 m)보다 크다(3.04 m). 이는 꼬리 위험 완화를 우선한 결합 설계로 인해 평균 편향을 소폭 허용한 trade-off로 볼 수 있다. 또한 CVaR95 개선은 운용자의 입장에서 중요한 의미를 갖는데, 이는 최악 구간에서의 추정 안정성을 확보한다는 점에서 실질적 운용 신뢰성을 뒷받침한다.

결과적으로 그림 2~그림 7에서와 같이, 스펙트럼 수준의 구조적 단서가 보조 관측치 설계를 가능하게 하고, 회피는 평균 오차 축소, 보조 보정은 편향·꼬리 완화에 기여한다. 불확실도 가중 결합을 적용한 MARS는 두 축의 장점을 동시에 확보하여, 평균 성능과 극단 구간 신뢰성을 함께 향상시키는 것으로 확인된다. 이는 멀티패스를 회피 대상에 한정하지 않고 활용 가능한 정보원으로 고려할 수 있음을 나타낸다.

IV. 결 론

본 논문은 지상 반사에 의해 발생하는 멀티패스 간섭이 저고도 표적 고도 추정에 미치는 영향을 분석하고, 이를 단순히 회피해야 할 교란으로 보지 않고 활용 가능한 정보원으로 재해석하는 새로운 기법을 제시하였다. 본 연구에서 제안한 MARS는 스펙트럼 기반 보조 관측치를 학습하여 오차 패턴을 추정하고, 이를 회피 기반 추정과 불확실도 가중 결합함으로써 전반적인 성능 개선 효과를 달성하였다.

시뮬레이션 결과는 기준 기법 추정의 불안정성과 AVOID, ASSIST 각각의 장단점을 명확히 보여주었으며, 제안 기법 MARS가 평균 성능 안정화, 바이어스 억제, 꼬리 위험 완화라는 상보적 이점을 동시에 확보함을 입증하였다. 특히 CVaR95 개선은 최악 구간에서의 추정 안정성을 높여, 실제 운용자가 요구하는 신뢰성 확보에 직접적으로 기여할 수 있음을 시사한다.

제안된 MARS는 시뮬레이션 데이터에서 RMSE와 CVaR95를 유의하게 개선하였으나, 학습 기반 보조 관측은 분포 외(out-of-distribution) 조건에서 일반화 성능이 저하될 수 있다. 예를 들어 해상 상태 변화(거칠기/유전율)나 플랫폼 자세 변동, 다중 반사·확산 산란이 우세한 환경에서는 $\gamma(\theta, p)$ 의 유효성이 떨어져 보정치의 편향이 증가할 수 있다. 또한 f_{c1} - f_{c2} 간 채널 상관성이 높아지는 경우(공유 경로/공용 하드웨어 오차)에는 듀얼 다이버시티 이득이 감소한다. 이를 완화하기 위해, 운용 단계에서 불확실도 게이팅/클리핑과 더불어 소량의 현장 데이터로 보조 회귀를 재적합하는 온-디바이스 적응(online fine-tuning), 바다 상태·플랫폼 자세·편파 정보를 조건으로 포함하는 조건부 모델링(conditional regression), 단일 반사 가정을 이완한 다중경로 회소 복원 기반 피쳐 확장 등을 향후 연구로 제안한다. 실제 채널 추정 기반의 학습/검증을 추가하면, 모델-환경 불일치에 대한 강건성이 한층 향상될 것으로 기대된다.

References

[1] C. D. Berube, P. R. Felcyn, K. Hsu, J. H. Latimer, and D. B. Swanay, "Target height estimation using multipath

- over land," in *2007 IEEE Radar Conference*, Boston, MA, Apr. 2007, pp. 88-93.
- [2] Y. S. Yoon, "Elevation angle estimation in a multipath environment using MIMO-OFDM signals," *Remote Sensing*, vol. 16, no. 23, p. 4490, Nov. 2024.
- [3] Y. Song, G. Zheng, "Height measurement for meter wave polarimetric MIMO radar with electrically long dipole under complex terrain," *Remote Sensing*, vol. 15, no. 5, p. 1265, Feb. 2023.
- [4] D. Kwon, H. Ko, S. Hong, K. Yoon, B. Cho, and K. S. Kim, "Elevation estimation algorithm for low-altitude targets in multipath environment," *Journal of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 24, no. 4, pp. 341-349, Jul. 2024.
- [5] M. S. Chung, D. H. Hong, and D. C. Park, "Target altitude extraction for multibeam surveillance radar in multipath environmental condition," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 18, no. 10, pp. 1203-1210, Oct. 2007.
- [6] M. H. Park, J. Kim, W. J. Jeon, S. W. Kwon, K. W. Lee, and S. H. Kim, "Radar performance analysis tool in multipath environment: Development and application," *Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 27, no. 9, pp. 1078-1086, Sep. 2023.
- [7] A. Laribi, M. Hahn, J. Dickmann, and C. Waldschmidt, "A novel target-height estimation approach using radar-wave multipath propagation for automotive applications," *Advances in Radio Science*, vol. 15, pp. 61-67, Sep. 2017.
- [8] Y. Liu, H. Liu, "Target height measurement under complex multipath interferences without exact knowledge on the propagation environment," *Remote Sensing*, vol. 14, no. 9, p. 3099, Jun. 2022.
- [9] R. Simoni, D. Mateos-Núñez, M. A. González-Huici, and A. Correas-Serrano, "Height estimation for automotive MIMO radar with group-sparse reconstruction," *arXiv preprint*, arXiv: 1904.09715, Apr. 2019.

박 명 훈 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-5217-0365>



2014년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학사)

2016년 2월: 한국항공대학교 항공전자정보공학과 (공학석사)

2016년 1월~현재: LIG넥스원 M&S팀 수석연구원

[주 관심분야] 레이더 체계설계, M&S, 안테나, 전파환경, 전파전파 등

김 정 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-4720-1374>



2004년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학사)

2011년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학석사)

2017년 2월: 한국항공대학교 항공전자공학과 (공학박사)

2016년 1월~현재: LIG넥스원 M&S팀 수석연구원

[주 관심분야] 빔 포밍, 영상 레이더, 레이더 신호처리 등

권 세 응 [LIG넥스원/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-8959-4452>



1999년 2월: 연세대학교 전파공학과 (공학사)
2002년 2월: 연세대학교 전기컴퓨터공학과 (공학석사)
2009년 8월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학박사)
2009년 7월~현재: LIG넥스원 레이더연구

소 수석연구원

[주 관심분야] 능동위상배열레이더, 전파전파 등

이 소 영 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-4850-6268>



2019년 2월: 아주대학교 전자공학과 (공학사)
2021년 2월: 아주대학교 AI 융합네트워크학과 (공학석사)
2025년 2월: 아주대학교 AI 융합네트워크학과 (공학박사)
2025년 3월~현재: LIG넥스원 레이더연구

소 선임연구원

[주 관심분야] 레이더 체계설계, M&S, 안테나 등

황 순 혁 [LIG넥스원/선임연구원]

<https://orcid.org/0009-0004-8202-5208>



2021년 2월: 광운대학교 로봇학부 정보제어전공 (공학사)
2023년 2월: 울산과학기술원 기계공학과 (공학석사)
2023년 1월~현재: LIG넥스원 레이더연구소 선임연구원

[주 관심분야] 레이더 체계설계, M&S 등