

저고도 다중경로 레이다 환경에서의 표적 RCS 추정 기법

Target RCS Estimation in Low-Altitude Multipath Radar Environments

오 현 수 · 정 대 교* · 김 혜 지*

Hyun-Su Oh · Dae-Kyo Jeong* · Hye-Ji Kim*

요 약

다중경로 환경에서 레이다 수신 신호는 표적의 직접 신호와 지면 또는 구조물에 의한 반사 신호가 중첩되어 수신되며, 이로 인해 표적의 RCS 추정 성능이 크게 저하된다. 정확한 RCS 추정은 표적 식별, 위협도 평가, 레이다 시스템 운용의 신뢰성을 확보하기 위한 핵심 요소이다. 정확하고 신뢰성 높은 수신 신호를 확보하기 위해 다중 스냅샷 기반의 신호 분석 알고리즘들이 많이 연구되었지만, 고기동 또는 비협조 표적의 정보를 빠르게 획득해야 하는 단일 펄스 기반의 추적 레이다에서는 다중 스냅샷을 필요로 하는 기존 고분해능 각도 추정 및 공분산 기반 빔포밍 기법의 적용에 한계가 있다. 본 논문에서는 단일 스냅샷 수신 신호를 이용하여 다중경로 환경에서 표적 신호와 반사 신호를 분리하고, 표적의 RCS를 추정하는 알고리즘을 제안한다. 제안 방법에서는 matrix pencil method를 적용하여 단일 펄스 수신 신호로부터 표적과 반사 신호의 도래각을 추정하고, 추정된 각도 정보를 기반으로 LCMV 빔포머를 설계하여 반사 신호 방향에 null을 형성함으로써 간섭을 억제하는 방안을 제안한다. 시뮬레이션 결과를 통해 제안 방법이 다중경로 환경에서 반사 신호의 영향을 억제하고, 기존 배열 빔 대비 향상된 RCS 추정 성능을 제공함을 검증하였다.

Abstract

In multipath environments, signals received from radars are composed of direct target return and reflected signals from the ground or surrounding structures, which degrades the accuracy of the RCS estimation. Accurate RCS estimation is essential for target identification, threat assessment, and reliable radar operation. Although multi-snapshot-based signal processing methods have been studied extensively, their applicability is limited to single-pulse tracking radars. This study proposes a single-snapshot-based algorithm that separates the target and reflected signals using the matrix pencil method, and suppresses interference via an LCMV beamformer designed with the estimated directions of arrival. Simulation results verify that the proposed method effectively mitigates multipath effects and improves the RCS estimation performance compared to conventional array beamforming.

Key words: Radar, Multipath, Matrix Pencil Method, LCMV Beamforming

I. 서 론

레이다 시스템에서 표적의 레이다 단면적(RCS, radar

cross section)은 표적의 크기, 형상, 재질 및 자세 특성을 반영하는 핵심 물리량으로, 표적 식별, 위협도 평가, 추적 성능 향상 및 레이다 시스템 성능 분석에 중요한 역할을

「본 논문은 2025년 정부(방위사업청)의 재원으로 국방과학연구소의 지원을 받아 수행된 연구임(UC250013SD).」
한화시스템(Hanwha Systems)

*국방과학연구소(Agency for Defense Development)

· Manuscript received December 21, 2025 ; Revised January 13, 2026 ; Accepted February 2, 2026. (ID No. 20251221-158)

· Corresponding Author: Hyun-Su Oh (e-mail: hyunsu.oh@hanwha.com)

한다^[1]. 실제 레이더 운용 환경에서는 지면, 해면, 건물 등으로 인한 다중경로 현상이 빈번하게 발생하며, 이로 인해 표적의 직접 반사 신호와 반사 경로를 통해 유입된 간섭 신호가 중첩되어 수신된다. 특히 저고도 해면 비행하는 표적 반사 신호의 반사각은 표적의 직접 경로의 도래각(DOA, direction of arrival)과 인접하고 표적 신호와 반사 신호가 중첩되는 형태의 복합 수신 신호를 형성한다^[2]. 반사파는 직접 경로의 신호와 비교하여 전파가 진행한 경로 길이의 차이와 반사되는 매질(유전율)의 차이로 인해 크기와 위상이 변하게 되며, 측정하는 환경과 조건에 따라 민감하게 반응하기 때문에 반사파로 인한 간섭은 지속적으로 변하게 된다. 이러한 복합신호 환경에서 DOA를 추정할 때, 신호의 진폭(또는 전력)을 사용하는 모노펄스와 같은 추적 방식에 문제를 일으킨다^[3]. 기존의 추적 레이더에서 자주 사용되는 모노펄스 방식은 합(Σ) 채널과 차(Δ) 채널의 비율을 이용하여 단일 표적의 DOA를 빠르게 산출하도록 설계되어 있지만, 표적 신호와 반사 신호가 인접할 경우 합·차 채널의 전력 및 위상 구조가 왜곡되면서 DOA의 오차가 발생한다^{[4]-[6]}. 이 오차는 직접 경로의 신호와 반사파의 관계에 간섭 정도에 따라 계속해서 변하게 되고, 이는 레이더의 추적 성능 저하로 이어진다.

표적 신호와 반사 신호를 고해상도 각도 추정 기법으로 분리하는 방법으로 MUSIC^[7], ESPRIT^[8]와 같은 공분산 기반 적응 빔포밍 기법이 제안되어 왔다. 그러나 이러한 기법들은 다중 스냅샷 기반 공분산 행렬 추정을 전제로 하며, 고기동 표적, 비정상 다중경로 환경 또는 저지연 운용 조건에서는 적용에 한계가 있다^[9]. 또한 스냅샷 간 위상 비코히런스과 환경 변화로 인해 신뢰할 수 있는 공분산 추정이 어려운 경우가 많다.

이에 본 논문에서는 단일 스냅샷 수신 신호만을 이용하여 다중경로 환경에서 표적 신호와 반사 신호를 분리하고, 표적의 RCS를 추정하는 알고리즘을 제안한다. 제안 방법은 MPM(matrix pencil method)^{[10],[11]}을 활용하여 단일 펄스 수신 신호로부터 표적 및 반사 신호의 도래각을 추정하고, 추정된 각도 정보를 기반으로 LCMV(linearly constrained minimum variance)^[12] 빔포머를 설계하여 반사 신호 방향에 null을 형성함으로써 간섭을 억제한다.

단일 스냅샷 조건에서 공분산 행렬을 직접 추정할 수 없는 문제를 고려하여, 백색 잡음 공분산을 가정한 모델 기반 LCMV 빔포밍을 적용하였다. 또한 LCMV 빔포밍 적용 시 발생하는 빔 왜곡에 따른 beam shape loss를 정량적으로 분석하였다. 주빔 이득의 감소, 부엽 레벨 상승과 같은 빔 패턴의 열화 지표를 확인하고, 빔 왜곡이 허용 가능한 범위 내에 존재하는 조건에서만 LCMV 빔포밍을 적용하도록 적용 구간을 제한하였다.

기존의 저고도 다중경로에 대한 LCMV 빔포머에 대한 기존 연구에서는 추적 중인 표적 각도와 해수면의 관계를 기하학적 분석을 통해 반사 신호의 각을 계산한 후 LCMV 빔포머를 적용하는 방식^[13]을 사용했다. 하지만 해수면의 높이는 시간과 날씨 환경에 따라 시시각각 변화해 단순 거리, 고도만으로 도래각을 추정하는 데 한계가 있다. 반면, 본 논문에서 제안하는 방법은 수신 신호로부터 표적 신호와 반사 신호의 도래각을 직접 추정하는 절차를 포함하고 있으며, 추정된 각도 정보를 기반으로 빔포머를 설계함으로써 다중경로 환경에서 적용성을 향상시킨다는 점에서 기존 연구와 차별성을 갖는다.

II. 다중경로 현상과 신호 생성

2-1 신호 모델링

본 절에서는 등 간격 배열 ULA(uniform linear array)를 기준으로 배열 안테나가 수신하는 신호 모델을 기술하고, 다중경로 환경에서 발생하는 간섭 신호에 대하여 작성하였다.

배열 안테나의 소자 개수를 M , 소자 간 간격을 d , 중심주파수의 파장을 λ 라 할 때, 단일 평면파가 배열에 입사할 때 m 번째 소자에 도달하는 신호는 식 (1)과 같은 위상 지연을 갖는다^[6].

$$\tau_m(\theta) = \frac{d(m-1)}{c} \sin\theta \tag{1}$$

여기서 θ 는 입사각, d 는 배열의 간격, c 는 빛의 속도이다. 이를 복소 지수 형태로 표현하면 m 번째 배열 안테나의 수신 신호 x_m 는 식 (2)~식 (5)와 같다.

$$x_m(t) = s(t - \tau_m) \approx s(t) \times e^{-j2\pi \frac{d}{\lambda} (m-1) \sin\theta} \tag{2}$$

$$s_d(t) = \sqrt{SNR} \times e^{j2\pi f t} \quad (3)$$

$$s_{refl}(t) = \Gamma \sqrt{SNR} \times e^{j2\pi f (t - \tau_{refl})} \quad (4)$$

$$SNR = \frac{P_t G_t G_r \lambda^2 \sigma}{(4\pi)^3 R^4 k T_0 B F_n L} \quad (5)$$

식 (3)에서 $s_d(t)$ 는 직접 경로 신호, 식 (4)의 $s_{refl}(t)$ 는 반사파의 신호를 의미한다. 반사파의 수식에서 τ_{refl} 은 그림 1에서 표현한 것과 같이 반사파와 직접 경로의 거리 차이로 인한 시간지연을 의미한다. 반사 계수 Γ 는 반사면의 유전율(ϵ_r)과 반사각도(θ_{refl})와 관련 있는 값으로 아래의 식 (6)으로 계산할 수 있다^[14].

$$\Gamma = \frac{\cos\theta_{refl} - \sqrt{\epsilon_r - \sin^2\theta_{refl}}}{\cos\theta_{refl} + \sqrt{\epsilon_r - \sin^2\theta_{refl}}} \quad (6)$$

식 (2)의 벡터 형태로 정리하면 신호 벡터는 다음과 같은 스티어링 벡터(steering vector) $\mathbf{v}(\theta)$ 로 표현할 수 있다.

$$\mathbf{x}(t) = s(t)\mathbf{v}(\theta), \quad \mathbf{v}(\theta) = \begin{bmatrix} 1 \\ e^{-j2\pi \frac{d}{\lambda} \sin\theta} \\ \dots \\ e^{-j2\pi \frac{d}{\lambda} (M-1) \sin\theta} \end{bmatrix} \quad (7)$$

배열 안테나에 수신된 신호가 K 개의 평면파로 구성된다고 가정하면, m 번째 배열요소에서의 수신 신호는 식 (8)과 같이 표현된다.

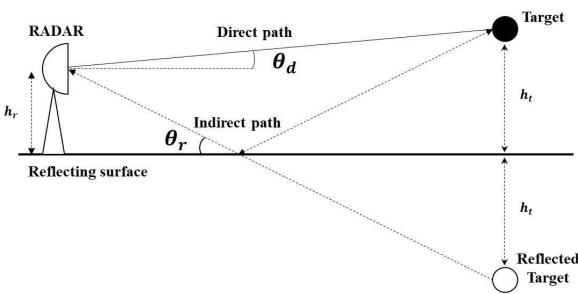


그림 1. 다중경로 현상에 대한 기하학적 구조
Fig. 1. Multipath propagation geometry.

$$x_m(t) = \sum_{k=1}^K s_k(t) \times e^{-j2\pi \frac{d}{\lambda} (m-1) \sin\theta_k} \quad (8)$$

다중경로 환경에서 배열 면에 도달하는 신호는 복수의 평면파의 합의 형태로 나타난다. 지표면에 의한 반사파가 1개라고 가정하면 식 (9)와 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{x}_{sum}(t) = s_d(t)\mathbf{v}(\theta_d) + s_r(t)\mathbf{v}(\theta_r) + \mathbf{n}(t) \quad (9)$$

다중경로 성분 추가로 인해 배열 안테나에서 수신되는 신호 데이터는 단일 표적이라도 복수의 공간(도래각) 성분을 포함하는 다중지수 모델로 표현되며, 이는 후술할 기법인 MPM를 통해 추정이 가능하다.

2.2 다중경로 환경에서 신호 간섭의 영향

저고도에서 운용하는 레이더의 수신 신호는 직접 경로 외에 지표에서 반사된 신호가 혼합되는 다중경로 환경에 놓이게 된다. 본 절에서는 이러한 환경에서 배열 안테나가 수신하는 신호 구조를 수학적으로 정의하고, 직접파와 반사파로 구성된 신호 모델을 제시한다.

레이다로부터 송신된 전파는 표적에 도달한 후 반사되어 수신기에 돌아오는 직접 경로(direct path)는 전파의 이동 경로의 길이가 가장 짧고, 표적의 실제 방향에 해당하는 DOA를 가진다. 반면, 반사된 전파가 지표면에 반사된 반사파(reflected path)는 레이더→표적→지표면→레이다 또는 레이더→지표면→표적→레이다의 경로를 따라 도달하므로 전파 경로의 길이는 직접 경로에 비해 증가하고 이로 인한 시간지연과 전파가 지표면에 반사되는 과정에서 신호의 크기 및 위상이 변하게 된다.

그림 1은 저고도 표적에 의해 발생하는 신호의 위치를 표현한 그림이다. 실제 레이더 환경에서는 분석할 경우 지구 곡률을 고려한 모델^[15]을 많이 사용하지만, 본 논문에서 분석하는 표적은 150 m 이하의 저고도로 제한하여, 직선 시야 거리(line of sight)가 상대적으로 짧다. 따라서 계산의 간편성과 직관적인 이해를 위해, 지구 곡률 효과를 고려하지 않고 평평한 반사면을 가정하여 반사 신호를 분석하였다.

반사면에 의한 허상 표적(ghost target 또는 reflected target)은 반사면에 대칭인 위치에 생기며, 레이더 입장에

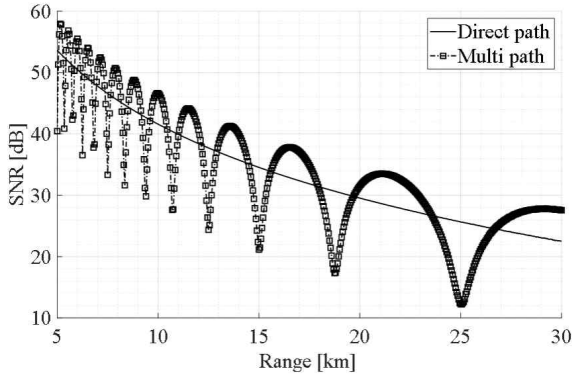


그림 2. 다중경로 간섭에 따른 SNR 영향
Fig. 2. Variation of SNR due to multipath interference.

서는 이 반사 신호가 직접 경로의 신호와 간섭을 일으키게 된다. 물론 직접 경로와 반사파의 경로에 따른 시간 지연이 충분히 클 경우, 직접 경로와 반사파는 각각의 표적으로 분리가 가능하지만, 저고도 표적의 경우에는 수 m 이하로 일반적인 레이더의 분해능으로는 분리가 어려워 [16] 하나의 신호로 합쳐진다. 이러한 원인으로 저고도 다중경로 신호의 DOA 추정에 어려움이 있다.

그림 2는 표 1의 레이더 파라미터에서 레이더의 높이 (h_r) 75 m에서 고도(h_t) 50 m에서 접근하는 표적이 다중경로 현상에 의한 반사 신호의 간섭으로 수신 신호가 표적과 레이더 사이의 거리가 변화함에 따라 흔들리는 모습을 나타낸다.

표적의 직접 경로의 신호만 있는 경우(direct path) 표적과 레이더의 거리가 가까워짐에 따라 신호의 크기가 일정하게 증가함을 알 수 있다. 반면 반사파의 간섭이 있는 경우에는 간섭(보강 또는 상쇄)에 따라 신호의 크기가 흔들리는 것을 확인할 수 있다. 이처럼 신호가 변동하는 환경에서의 레이더로부터 추정된 RCS 또한 변동성이 발생하여 정확한 추정이 어렵게 된다.

III. ABF 기반의 RCS 추정 방법

3-1 Matrix Pencil Method 기반의 DOA 추정

반사파의 입사각에 null을 만들기 위해서는 높은 각도 해상도로 표적 신호와 반사파의 입사각을 추정해야 한다.

표 1. 시뮬레이션 파라미터
Table 1. Simulation parameters.

Symbol	Parameter	Value	Unit
f_c	Frequency	3	GHz
M	Number of antenna elements	250	ea
L	Pencil size	125	-
σ	RCS	3	m^2
h_r	Radar height	15	m
h_{min}	Minimum target height	50	m
h_{Max}	Maximum target height	120	m
Δh	Target height spacing	10	m
R_{min}	Minimum target range	1	km
R_{Max}	Maximum target range	30	km
ΔR	Target range spacing	10	m
ϵ_r	Relative permittivity	$7-5j$	F/m
P_t	Transmit power	20	W
G_t	Transmit gain	34.8	dBi
G_r	Receive gain	34.8	dBi
k	Boltzmann constant	1.380649×10^{-23}	J/K
T_0	Standard temperature	290	K
F	Noise figure	3	dB
B	Bandwidth	1	MHz

본 절에서는 수신 신호로부터 DOA를 추정하기 위해 MPM을 적용하는 방법에 대해 기술하였다. MPM은 신호를 복소 지수 성분의 합으로 모델링하고, 시공간 데이터의 선형 구조를 이용하여 각 성분의 고유 특성을 추정하는 방법으로, 다수의 평면파가 존재하는 환경에서 높은 분해능의 결과를 얻을 수 있다. 다양한 고해상도 DOA 추정 기법 중 대표적으로 MUSIC과 ESPRIT가 있다. 두 알고리즘은 subspace 기반 도래각 추정 기법으로 공분산 행렬의 안정적인 추정을 위해 일반적으로 다중 스냅샷을 필요로 하므로, 단일 스냅샷 환경에서는 직접적인 적용에 한계가 있다[13]. 반면, MPM은 단일 스냅샷 수신 신호에 적용 가능하여 단일 펄스 기반 레이더 신호 처리에 보다 적합하다[17],[18]. 따라서 본 연구에서는 단일 펄스 기반 레이더 환경을 고려하여 MPM을 적용하였다.

MPM은 식 (10)을 기반으로 공간 샘플 벡터를 Hankel matrix 형태로 구성하고, 두 개의 펜슬 행렬(pencil matrices) X_1, X_2 를 구성한다.

$$H = \begin{bmatrix} x_1 & x_2 & \cdots & x_L \\ x_2 & x_3 & \cdots & x_{L+1} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ x_{M-L+1} & x_{M-L+2} & \cdots & x_M \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$X_1 = H(1:M-1, :), X_2 = H(2:M-1, :) \quad (11)$$

위 수식에서 M 은 안테나 소자의 수, L 은 펜슬 계수(pencil parameter 또는 pencil size)로 Hankel matrix의 크기를 결정하는 값으로 추정 가능한 신호의 수, 수치 안정성, 해상도 및 계산량에 영향을 준다. 신호의 개수를 K 라 할 때, 일반적으로 사용하는 L 의 크기는 식 (12)의 조건을 만족하는 값으로 선택한다.

$$K < L < M - K + 1 \quad (12)$$

수신 신호 x_m 은 잡음이 존재하는 신호이므로 행렬 H 는 이상적인 랭크를 갖지 않는다. 이를 보정하기 위해 SVD를 적용한다.

$$H = U \Sigma V^H \quad (13)$$

여기서 U, V 는 특이행렬(signal subspace), Σ 는 특이값 대각행렬이다. 이때 신호 성분은 Σ 의 대각성분의 상위 K 개의 값에 집중된다. 본 논문에서는 신호는 직접 경로와 반사파 2개를 가정하여 $K=2$ 이지만, 간섭신호가 2개 이상이거나 신호의 개수를 알지 못하는 경우 Σ 의 대각성분을 사용하여 신호의 개수를 추정할 수 있다. 그림 3은 Σ 의 대각성분의 예시이다. 모의한 상황은 직접 경로와 반사파 2개의 신호가 존재하기 때문에 1~2번째 신호의 크기가 다른 번호의 인덱스에 비해 크기가 크게 나타남을 알 수 있다. 신호의 개수는 Σ 의 크기가 급격하게 감소하는 인덱스를 찾아 신호 성분으로 식별하였다.

K (여기서는 2)개의 특이값에 대응하는 특이벡터만을 선택하여 차원이 축소된 U_K, V_K 를 다음과 같이 구성한다. 이 축소된 행렬을 이용하여 펜슬 행렬 X_1, X_2 에 투영함으로써, 차원이 $K \times K$ 로 압축된 펜슬 행렬 X_{1c}, X_{2c} 를 구성한다.

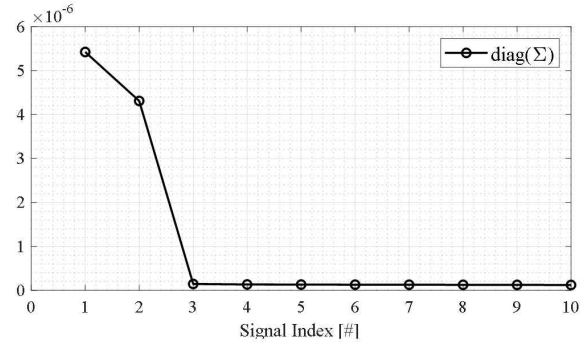


그림 3. Σ 의 대각성분
Fig. 3. Singular values of Σ .

$$U_K = U(:, 1:K), V_K = V(:, 1:K) \quad (14)$$

$$\begin{aligned} X_{1c} &= U_K(1:end-1, :)^H X_1 V_K \\ X_{2c} &= U_K(1:end-1, :)^H X_2 V_K \end{aligned} \quad (15)$$

이렇게 압축된 펜슬 행렬을 기반으로 일반화 고유값을 추출하면 K 개의 고유값을 얻을 수 있으며, 추출된 고유값의 위상은 표적 신호의 입사각(DOA)에 대응한다.

$$\Lambda = eig(X_{2c}, X_{1c}) \quad (16)$$

$$\hat{\theta} = \sin^{-1} \left(\angle \Lambda \times \frac{\lambda}{2\pi \times d} \right) \quad (17)$$

3-2 LCMV Beamformer를 이용한 RCS 추정

본 절에서는 3-1절에서 추정된 표적의 입사각 정보를 이용하여 표적의 RCS를 추정하는 내용에 대하여 기술하였다. LCMV(linearly constrained minimum variance) 빔포머는 원하는 신호 성분에 대해 선형 제약 조건을 만족시키면서, 출력 전력을 최소화하도록 배열 가중치를 설계하는 공간 필터링 기법이다^[19]. 또 다른 대표적인 빔포머로는 MVDR(minimum variance distortionless response) 빔포머가 있다. MVDR 빔포머는 샘플 공분산 행렬에 의존하므로 스넵샷 수가 제한적인 경우 성능 저하가 발생할 수 있다. 반면, LCMV는 선형 제약 조건을 통해 배열 응답을 직접 제어하므로 공분산 추정 오차에 대해 상대적으로 안정적인 특성을 가진다^[20].

LCMV 빔포머의 최적화 문제는 식 (18) 및 식 (19)와 같이 정의된다.

$$\min_w w^H R w \tag{18}$$

subject to $C^H w = f$ (19)

여기서 w 는 배열 가중치 벡터, R 은 수신 신호의 공분산 행렬, C 는 제약 조건을 나타내는 조향 벡터 행렬, f 는 각 제약에 대한 응답 벡터이다. 일반적으로 공분산 행렬은 다수의 스냅샷에 대한 통계적 평균을 통해 추정되므로 신뢰도 있는 공분산 행렬을 계산하기 위해서는 여러 개의 스냅샷이 필요하다. 하지만 본 연구에서는 단일 스냅샷 환경을 고려하므로 통계적으로 유의미한 공분산 행렬을 추정하는 것은 불가능하다. 이에 적응 빔포밍을 위한 공분산 정보를 사용하지 않고, 최소 가정하에 제약조건으로 공분산 행렬을 단위행렬로 설정($R=I$)하여 제약조건 기반의 LCMV 빔포머를 설계하였다^[13].

$$w_{LCMV} = R^{-1} C (C^H R^{-1} C)^{-1} f \tag{20}$$

그림 4는 $M=250$, $d=0.5 \lambda$ 인 배열에 Taylor window를 적용하여 부엽을 -30 dB 수준으로 설정한 결과이다. 상단의 그림처럼 null의 위치가 조향각과 떨어져 있을 경우 null과 부엽은 설계한 대로 동작하는 것을 확인할 수 있

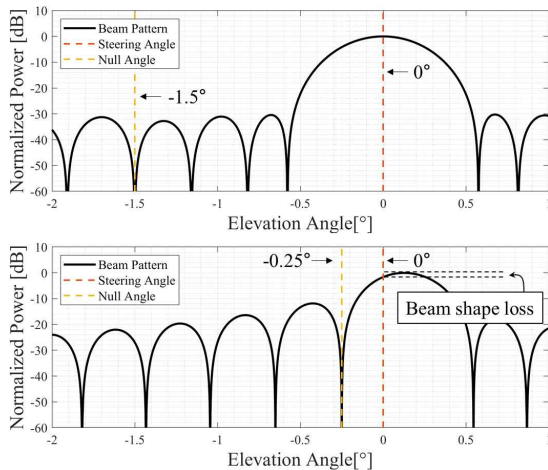


그림 4. 조향각과 null 위치에 따른 빔 패턴
Fig. 4. Beam pattern for steering and null angles.

다. 하지만 하단 그림과 같이 null과 조향각이 인접할 경우 null의 위치는 설계한 위치에 생성되지만 부엽의 크기는 상승하고 빔 조향각이 틀어지면서 빔 형상 손실(beam shape loss)가 발생하게 된다.

그림 5는 null과 조향각의 차($\Delta\theta$)에 따른 빔 형상 손실의 변화를 나타낸다. $\Delta\theta$ 가 감소함에 따라 메인 빔의 조향 방향이 점차 왜곡되었으며, 두 각도 간격이 반전력빔폭(HPBW)에 도달했을 때 빔 형상 손실은 약 2.8 dB가 발생하고 조향은 약 1.8°가 틀어짐을 확인하였다. 이보다 각도 간격이 더 감소할 경우, 메인 빔이 설계된 조향 방향에서 크게 벗어나 그림 6과 같이 심각한 빔 왜곡이 발생한다.

그림 5와 그림 6의 결과를 바탕으로 $\Delta\theta$ 를 따라 3개 구간으로 나누어 표 2와 같이 $\Delta\theta$ 구간에 따라 배열 가중치와 빔 형상 손실 보상 여부를 다르게 반영했다.

구간 1은 $\Delta\theta$ 가 충분히 크기 때문에 메인 빔 밖에 반사

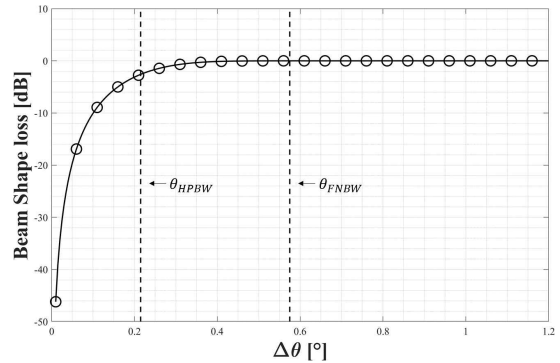


그림 5. $\Delta\theta$ 에 따른 빔 형상 손실
Fig. 5. Beam shape loss as $\Delta\theta$.

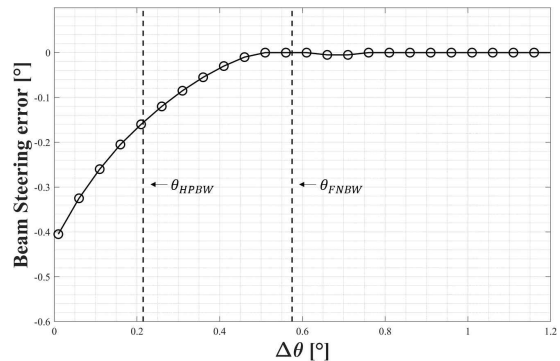


그림 6. $\Delta\theta$ 에 따른 beam Steering 오차
Fig. 6. Beam steering error as $\Delta\theta$.

표 2. 구간별 배열 가중치 및 RCS 계산 수식
Table 2. Beamforming weight and RCS calculation.

Case 1	$\Delta\theta \geq \theta_{FNBW}$
$\hat{s}(t)$	$w_{LCMV}^H x(t)$
$\hat{\sigma}$	$ \hat{s}(t) ^2 \times \frac{(4\pi)^3 R^4 k T_0 B F_n L}{P_t G_t G_r \lambda^2}$
Case 2	$\theta_{HPBW} \leq \Delta\theta < \theta_{FNBW}$
$\hat{s}(t)$	$w_{LCMV}^H x(t)$
$\hat{\sigma}$	$ \hat{s}(t) ^2 \times \frac{(4\pi)^3 R^4 k T_0 B F_n L}{P_t G_t G_r \lambda^2} \times \hat{L}_{BS}$
Case 3	$\Delta\theta < \theta_{HPBW}$
$\hat{s}(t)$	$v^H x(t)$
$\hat{\sigma}$	$ \hat{s}(t) ^2 \times \frac{(4\pi)^3 R^4 k T_0 B F_n L}{P_t G_t G_r \lambda^2}$

신호의 각도가 위치하여 반사각에 null을 생성하더라도 메인 빔의 왜곡은 크지 않는 구간이다. 따라서 별도의 보상 없이 LCMV를 적용했다. 구간 2는 $\Delta\theta$ 에 따라 빔 형상 손실이 발생하므로 그림 5의 $\Delta\theta$ 에 따른 \hat{L}_{BS} 를 curve fitting하여 예측한 손실만큼 신호의 크기를 보정한 후 RCS를 계산한다. 구간 3의 경우 LCMV에 의한 왜곡이 반사파에 의한 왜곡보다 커질 수 있다고 판단하여 null을 생성하지 않고 MPM에서 추정된 입사각($\hat{\theta}$)으로 표적에 대응하는 조향 벡터 $v(\hat{\theta})$ 를 구성하였다.

IV. 시뮬레이션 결과

LCMV 기반 저고도 다중경로 환경에 의한 간섭 제거의 성능 검증을 위해 표 1과 같이 시스템을 설계하였다.

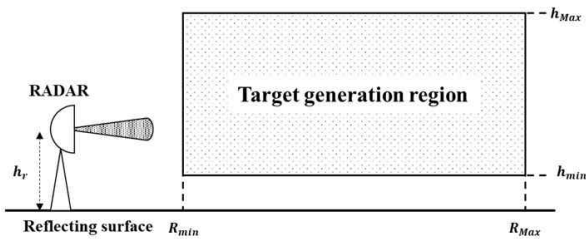


그림 7. 모의시험 시나리오
Fig. 7. Simulation scenario.

또한 그림 7 같이 표적을 설정한 범위에 거리, 높이를 10 m의 일정한 간격으로 표적을 배치하고 표적의 RCS는 3 m² 모의하여 제안한 알고리즘을 검증하였다.

4-1 MPM을 이용한 DOA 측정 결과

먼저 위에서 언급한 시나리오를 기반으로 모의한 수신 신호에 MPM을 적용하여 직접 경로의 신호와 반사 신호의 DOA를 추정하였다. 그림 8의 검정색 실선은 모의한 표적의 고각을, 붉은색은 MPM을 통해 직접 경로와 반사 신호 두 개로 분리된 고각을, 마지막으로 파란색 선은 두 신호가 MPM으로 분리되지 않고 하나의 신호로 판단된 각도의 결과로 앞서 언급한 식 (13)의 특이값 \mathcal{L} 의 성분으로 신호의 수를 판단했다. 붉은색의 각도 추정 결과를 확인해 보면 추정된 각도의 RMSE 오차는 직접 경로 (0.012°), 반사 경로(0.0154°)로 모의한 신호에 매우 근접했음을 확인할 수 있다. 하지만 두 신호가 FNBW 이하로 매우 인접할 경우 파란색의 결과와 같이 두 신호가 분리되지 않고 하나의 신호로 측정되는 현상이 관찰되었고, 이때 분리되지 않은 신호는 표적과 반사 각도에 각각 0.135°, 0.233°의 RMSE 오차를 보였다.

이처럼 유사한 각도 차이와 잡음 레벨에서 두 신호가 분리되거나 분리되지 않는 현상이 모두 관찰되는 이유는 MPM은 모델 기반 기법으로서 단일 스냅샷 환경에서는 잡음 실현에 따라 서브스페이스에 대한 잡음 투영 정도가 달라지기 때문이다. 기존 연구에서도 MPM 기반 각도 추정은 인접한 신호에 대해 확률적으로 평가하고 있으며, 동일한

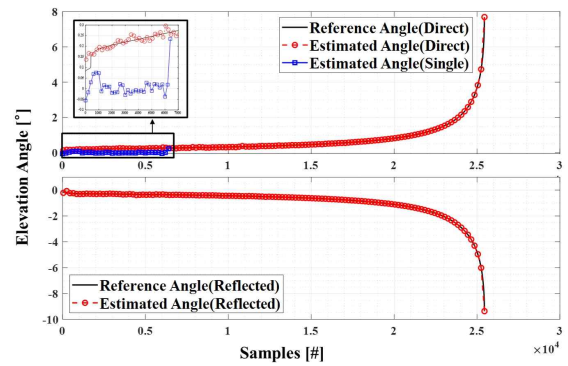


그림 8. MPM을 이용한 DOA 측정 결과
Fig. 8 MPM-based DOA estimation results.

SNR 및 각도 간격 조건에서도 분리 실패가 발생할 수 있다^[21]. 이는 모델 기반 고해상도 기법의 특성에 따른 결과이다.

4-2 제한한 방식의 RCS 추정 결과

그림 9는 앞에서 설정한 표적의 위치에 모의한 수신 신호로부터 추정된 RCS의 오차를 나타낸 그림이다. 모의한 RCS는 3 m²로 추정한 오차가 적을수록 흰색으로 표시되며, 오차가 클수록 어두운색으로 표현하였다. 공통적으로 표적의 각도와 반사 신호의 각도 차이가 적을수록 RCS 추정 오차가 큰 경향을 확인할 수 있다. 또한 두 신호의 각도 차이가 적더라도 추정 오차는 적은 구간이 관찰되는데, 이는 신호 간 거리, 반사 계수 등에 따라 보강 또는 상쇄 간섭이 일어나기 때문으로 그림 2의 SNR이 주기적으로 흔들리는 현상과 일치하는 결과이다.

세 개의 그림은 위에서부터 LCMV를 적용하지 않았을 때 결과, 두 번째 그림은 LCMV로 반사파의 위치에 null을 생성했을 때의 결과, 마지막으로 null을 생성 시 발생하는 빔 형성 손실을 보상한 결과이다. null을 생성하지 않을 경우, 반사 신호의 영향으로 LCMV를 적용한 두 결과와 비교하여 모든 영역에서 오차가 크음을 확인할 수 있다. 이와 비교하여 반사 신호의 위치에 null을 만들어 간섭의 영향을 감소시킨 경우, 반사 신호의 간섭이 제거되어 빔 조향만 한 시험보다 추정된 RCS의 오차가 감소함

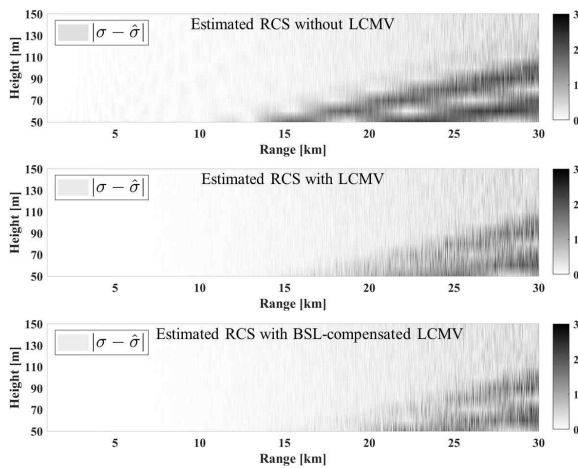


그림 9. RCS 추정 오차 모의시험 결과
Fig. 9. Simulation results RCS estimation error.

표 3. RCS 추정 결과

Table 3. Simulated RCS estimation results.

Case \ Value	Without LCMV	LCMV	BSL compensated
Mean	3.026	2.924	2.991
Variance	0.463	0.221	0.213
RMSE	0.681	0.477	0.462

을 확인할 수 있다. 마지막으로 조향각과 간섭 신호의 각을 기반으로 예측한 빔 형성 손실을 보상한 경우 추정 RCS의 오차가 감소함을 확인할 수 있다(표 3).

그림 10은 추정된 RCS의 histogram으로 나타내었다. 빔 조향만 적용하여 추정된 RCS의 평균은 3.026으로 LCMV를 적용했을 때의 평균 2.924보다 오차가 적은 것으로 나타났다. 하지만 이는 분산이 각각 0.463과 0.221로 LCMV를 적용한 안정적인 RCS 추정 성능을 제공함을 알 수 있다. 또한 빔 형성 손실을 보상한 경우, LCMV만 적용한 경우와 비교하여 평균 2.991, 분산 0.213으로 모두 개선되었음을 확인하였다.

마지막으로 그림 11은 빔 형성 손실이 발생하는 구간의 표적과 반사 신호의 각도 차이에 따른 추정 RCS의 분포를 나타낸 그림이다. Null을 생성하지 않은(파란색) 추정 결과 신호 간섭에 의한 SNR의 변동이 RCS도 동일한 패턴으로 나타남을 확인할 수 있다. LCMV만 적용한(붉은색) 경우 반사 신호가 억제되어 RCS가 주기적으로 흔들

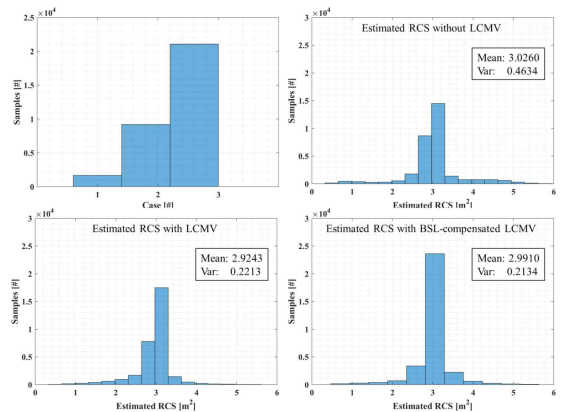


그림 10. 시험 조건에 따른 추정 RCS histogram
Fig. 10. Histogram of estimated RCS for different test condition.

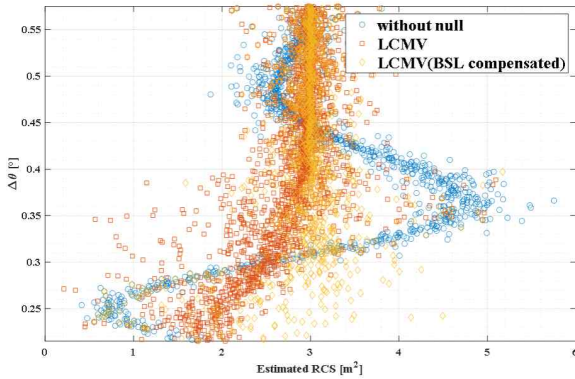


그림 11. $\Delta\theta$ 에 따른 RCS 분포
Fig. 11. RCS distribution as $\Delta\theta$.

들리는 현상은 사라졌지만, 빔 형상 손실의 증가로 인해 SNR이 감소하여 추정 RCS가 작아짐을 확인할 수 있다. 마지막으로 빔 형상 손실을 보상한(주황색) 결과 추정 상대적으로 RCS는 3 m²를 중심으로 분포함을 확인할 수 있다. 시뮬레이션 결과 평균 2.991, 분산 0.213으로 추정 RCS를 가장 안정적으로 추정했다.

V. 결 론

본 연구에서는 저고도 다중경로 환경에서 표적 신호와 반사 신호를 분리하고, 이를 기반으로 표적의 레이더 단면적(RCS)을 추정하는 방안을 제안하였다. 제안한 방법은 단일 스냅샷 환경에서도 적용 가능하도록 matrix pencil method를 이용하여 표적과 반사 신호를 분리하고, 추정된 각도 정보를 바탕으로 LCMV 빔포머를 구성함으로써 표적 방향의 신호를 유지하면서 반사 경로 성분을 공간적으로 억제하였다.

시뮬레이션 결과 제안한 알고리즘은 다중경로로 인한 간섭이 존재하는 환경에서도 null 제약을 적용하지 않은 경우와 비교하여 RCS 추정 정확도가 향상됨을 확인하였다. 또한, 조향각과 null 생성각 간의 각도 간격이 제한적인 조건에서 빔 형상 왜곡을 고려한 제약 설정을 통해 RCS 추정 정확도를 향상시켰다. 다만, 조향각과 null 생성각이 과도하게 근접할 경우 빔 형상 손실이 증가하고 메인 빔 왜곡이 심하게 발생하는 현상이 있어, 이 경우 공간 필터링 방식의 한계가 있음을 확인하였다. 이는 제안한

방법이 단일 스냅샷 및 제한된 통계 정보 환경에서 실용적으로 적용 가능함을 보여주는 동시에, 빔포밍 기반 RCS 추정 기법의 설계 한계를 명확히 제시한다는 점에서 의의가 있다.

향후 연구에서는 다중 스냅샷 기반 공분산 추정 기법을 결합하거나, 시간적·공간적 신호처리 방법으로 확장하여 보다 복잡한 다중경로 환경에서 RCS 추정 성능을 향상시키는 방향으로 연구를 확장할 예정이다.

References

- [1] H. Cho, J. Chun, T. Lee, S. Lee, and D. Chae, "Spatiotemporal radar target identification using radar cross-section modeling and hidden Markov models," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 52, no. 3, pp. 1284-1295, Jun. 2016.
- [2] H. Darvishi, M. A. Sebt, "Adaptive hybrid method for low-angle target tracking in multipath," *IET Radar, Sonar & Navigation*, vol. 12, no. 9, pp. 931-937, Sep. 2018.
- [3] J. Lim, E. Lee, D. Jeong, and S. Oh, "Angle estimation technique using multi-frequency multi-beam for low-altitude target tracking," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 36, no. 5, pp. 518-527, May 2025.
- [4] M. A. Richards, J. A. Scheer, and W. A. Holm, *Principles of Modern Radar: Basic Principles*, Raleigh, NC, SciTech Publishing, 2010.
- [5] M. I. Skolnik, *Radar Handbook*, 2nd ed., New York, NY, McGraw-Hill, 1990.
- [6] B. R. Mahafza, *Radar Systems Analysis and Design using MATLAB*, London, Chapman and Hall, 2005.
- [7] R. Schmidt, "Multiple emitter location and signal parameter estimation," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 34, no. 3, pp. 276-280, Mar. 1986.
- [8] R. Roy, A. Paulraj, and T. Kailath, "ESPRIT-estimation of signal parameters via rotational invariance techniques," *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 37, no. 7, pp. 984-995, Jul. 1989.
- [9] T. J. Shan, M. Wax, and T. Kailath, "On spatial smoo-

- thing for direction-of-arrival estimation of coherent signals," *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 33, no. 4, pp. 806-811, Aug. 1985.
- [10] Y. Hua, T. K. Sarkar, "Matrix pencil method for estimating parameters of exponentially damped/undamped sinusoids in noise," *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 38, no. 5, pp. 814-824, May 1990.
- [11] J. Koh, T. K. Sarkar, "High resolution DOA estimation using matrix pencil," in *IEEE Antennas and Propagation Society Symposium, 2004*, Monterey, CA, Jun. 2004, pp. 423-426.
- [12] O. L. Frost, "An algorithm for linearly constrained adaptive array processing," *Proceedings of the IEEE*, vol. 60, no. 8, pp. 926-935, Aug. 1972.
- [13] C. H. Lee, S. M. Chon, J. Park, H. K. Na, and S. H. Kim, "Improving the tracking accuracy of a low-altitude sea target in a multipath environment using adaptive beamforming techniques," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 32, no. 2, pp. 190-199, Feb. 2021.
- [14] M. A. Richards, *Fundamentals of Radar Signal Processing*, New York, NY, McGraw-Hill, 2005.
- [15] L. V. Blake, *Radar Range-performance Analysis*, Lanham, MD, Lexington Books, 1980.
- [16] S. Huan, M. Zhang, G. Dai, and H. Gan, "Low elevation angle estimation with range super-resolution in wideband radar," *Sensors*, vol. 20, no. 11, p. 3104, May 2020.
- [17] G. Peng, I. T. Lu, "Comparison of four super-resolution techniques for complex spectra or points estimation," in *2017 IEEE Long Island Systems, Applications and Technology Conference(LISAT)*, Farmingdale, NY, May 2017.
- [18] N. Tayem, M. Naraghi-Pour, "A fast algorithm for direction of arrival estimation in multipath environments," *Proceedings of SPIE: Wireless Sensing and Processing II*, vol. 6577, p. 65770B, Apr. 2007.
- [19] L. Griffiths, C. Jim, "An alternative approach to linearly constrained adaptive beamforming," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol. 30, no. 1, pp. 27-34, Jan. 1982.
- [20] R. G. Lorenz, S. P. Boyd, "Robust minimum variance beamforming," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 53, no. 5, pp. 1684-1696, May 2005.
- [21] K. Reaz, F. Haque, and M. A. Matin, "A comprehensive analysis and performance evaluation of different direction of arrival estimation algorithms," *2012 IEEE Symposium on Computers & Informatics(ISCI)*, Penang, Mar. 2012, pp. 256-259.

오 현 수 [한화시스템/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-1807-0811>



2015년 2월: 광운대학교 전자공학과 (공학사)

2018년 8월: 광운대학교 전파공학과 (공학석사)

2022년 4월: 기상청 기상레이다센터 연구원

2022년 4월~현재: 한화시스템 레이더연구
소 지상레이다체계2팀 선임연구원

[주 관심분야] 레이더시스템, 레이더 신호처리 등

정 대 교 [국방과학연구소/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0001-5977-4156>



2012년 2월: 한양대학교 전자통신공학과 (공학사)

2020년 2월: 한양대학교 전자통신공학과 (공학박사)

2021년 2월~현재: 국방과학연구소 선임
연구원

[주 관심분야] 레이더시스템, 신호처리 등

김 혜 지 [국방과학연구소/연구원]

<https://orcid.org/0009-0006-7053-8115>



2018년 2월: 한서대학교 무인항공기학과 (공학사)

2020년 2월: 한서대학교 항공시스템공학과 (공학석사)

2025년 2월: 한서대학교 항공시스템공학과 (공학박사)

2025년 2월~현재: 국방과학연구소 연구원

[주 관심분야] 표적 탐지 및 추적, 비행제어 및 유도 등