

해상 전자전 환경에서 이중 원형 배열을 이용한 도래각 추정 기법

DOA Estimation Using a Double-Layer Uniform Circular Array in Maritime Electronic Warfare Environments

이하린 · 김현동 · 문효상* · 이명식* · 홍용기* · 도인현* · 김경태

Ha-Rin Lee · Hyun-Dong Kim · Hyo-Sang Moon* · Myung-Sik Lee* ·
Yong-Gi Hong* · In-Hyeon Do* · Kyung-Tae Kim

요 약

해상 전자전 환경에서 배열 수신 장비는 방사원 신호를 수신하여 방위각 및 고각을 추정한다. 그러나 해수면 반사로 인해 직접 경로와 다중 경로 신호가 동시에 관측되면서 실제 입사 방향과 다른 각도가 추정되는 문제가 발생한다. 이는 두 신호가 강한 상관성을 가지며, 원형 배열 구조에서는 고각의 부호 정보가 배열 요소 간 위상 차이에 반영되지 않기 때문이다. 그 결과 두 경로 성분이 충분히 분리되지 못하고 도래각 추정 정확도가 저하된다. 본 논문에서는 해상 다중 경로 환경의 한계를 해결하기 위해 이중 원형 배열 기반 도래각 추정 기법을 제안한다. 제안된 배열은 동일 반경의 두 원형 배열을 수직으로 분리 배치하며, 원형 배열의 비선형 위상 구조를 선형 빔 공간으로 변환한 뒤 FBSS(forward-backward spatial smoothing)를 적용하여 신호 분리 성능을 개선한다. 시뮬레이션 결과, 제안 기법은 단일 원형 배열 대비 향상된 도래각 추정 성능을 보였다.

Abstract

In maritime electronic warfare environments, array receiving systems estimate the azimuth and elevation of emitter signals. However, sea-surface reflections cause direct and multipath components to be observed simultaneously, leading to angular estimates that deviate from the true direction of arrival. Because these components are strongly correlated, and the sign of the elevation angle is not reflected in the inter-element phase differences of a uniform circular array, the two paths cannot be sufficiently separated, degrading the estimation accuracy. To address this issue, a direction-of-arrival estimation method based on a double-layer uniform circular array is proposed. The proposed structure employs two circular arrays with identical vertical separation radii. The nonlinear phase structure is transformed into a linear beamspace representation, and forward - backward spatial smoothing is applied to enhance the separation performance. The simulation results demonstrate improved estimation accuracy compared to a conventional single-layer uniform circular array.

Key words: Electronic Support Measures, Direction of Arrival Estimation, Double-layer Uniform Circular Array, Sea-Surface Multipath Mitigation, Subspace-Based Estimation

「이 연구는 LIG Nex1(현 LIG 디펜스&에어로스페이스) 산학협력과제 지원으로 연구되었음.」

포항공과대학교 전자전기공학과(Department of Electrical Engineering, Pohang University of Science and Technology)

*LIG 디펜스&에어로스페이스, 구 LIG 넥스원(LIG Defense&Aerospace, formerly LIG Nex1)

· Manuscript received February 11, 2026 ; Revised February 25, 2026 ; Accepted March 12, 2026. (ID No. 20260211_006)

· Corresponding Author: Kyung-Tae Kim (e-mail: kkt@postech.ac.kr)

I. 서 론

현대 전자전 환경에서는 다양한 레이더 및 통신 시스템의 운용으로 전자기 스펙트럼이 고밀도·고복잡화되고 있으며, 저피탐 파형과 기민한 방사 전략의 확산으로 전자기 환경 인지가 더욱 어려워지고 있다^[1-3]. 이러한 환경에서 전자지원(ESM, electronic support measures)은 능동 방사 없이 적 전자 방사를 수집·분석하여 위협을 조기에 탐지하고 전장 상황 인지를 수행한다^[4]. 특히, ESM 체계에서 도래각(DOA, direction of arrival) 추정은 방사원 위치 추정과 위협 식별, 후속 전자전 작전 수행을 위한 필수 정보로 활용된다.

실제 전자전 운용 환경에서는 전파 특성으로 인해 DOA 추정 성능이 제한된다. 특히 해상 환경에서 해수면 반사로 인한 다중 경로 신호가 직접 경로와 중첩되어 DOA 추정 결과의 편향을 유발한다^[5-9]. 이러한 현상은 공간 스펙트럼의 방사원 방향 오차를 증가시켜 해상 ESM 환경에서의 DOA 추정 성능 저하로 이어진다. 이에 따라 다중 수신 플랫폼을 활용한 방사원 위치 및 빔 방향 동시 추정 기법이나, 수신 신호의 파형 파라미터를 기반으로 해수면 반사 영향을 완화하여 고각 추정 성능을 개선하는 연구들이 제안되고 있다^[9-12].

원형 배열 안테나(UCA, uniform circular array)는 전 방향에 대한 균일한 배열 응답 특성으로 인해 DOA 추정에 활용되고 있다^[13-15]. 특히 UCA 기반 빔 공간 변환을 이용한 방위각 및 고각 동시 추정 기법이 제안되었으며, 이를 통해 방향 추정 연구가 수행되었다. 하지만, UCA는 모든 배열 요소가 동일 평면에 배치되는 구조적 특성으로 인해 해수면 반사로 발생하는 직접 경로와 다중 경로 신호가 높은 상관성을 갖는 경우 고각 추정 성능이 저하된다. 특히 해상 환경에서는 반사 경로가 직접 경로와 유사한 방위각을 가지면서 서로 다른 고각 성분으로 수신되는 경우가 많아, 단일 평면 배열만으로는 이러한 다중 경로 성분을 효과적으로 구분하기 어렵다.

이러한 한계를 완화하기 위한 구조로 상·하 두 개의 원형 배열을 이용하는 이중 원형 배열 안테나(DUCA, double-layer uniform circular array)가 고려될 수 있다. DUCA는 서로 다른 높이에 배치된 두 배열을 통해 추가적인 수직 방향의

공간 정보를 제공할 수 있으며, 이를 통해 다중 경로 환경에서 발생하는 고각 추정 모호성을 완화할 수 있는 장점을 가진다. 이러한 DUCA의 구조적 특성을 활용하는 연구가 수행되었지만, 해당 연구는 송신기에서 방사된 신호가 표적에 반사되어 수신되는 바이스테틱 레이더(bistatic radar) 기반 수동 레이더 환경을 가정한다^[6]. 이를 바탕으로, 다중 경로 신호의 기하 파라미터를 추정하여 반복적인 추정 과정을 수행한다. 전자전 ESM 환경에서는 송신 신호의 파형이나 특성에 대한 사전 정보가 없는 비협조 방사원의 직접 방사 신호를 수신하게 되므로, 이러한 구조를 가정한 기존 DUCA 기반 기법은 전자전 ESM에 직접 적용할 수 없다.

본 연구에서는 DUCA 구조를 바탕으로 해상 전자전 환경에서의 방사원 DOA 추정 성능을 향상시키는 기법을 제안한다. 먼저, DUCA에서 수신된 배열 응답을 실수 빔 공간(real beamspace)으로 변환하는 PME(phase mode excitation)를 적용한다^[4]. PME는 RB-MUSIC(real beamspace-Multiple signal classification) 기반 DOA 추정을 수행하기 위한 빔 공간 변환 과정에 해당한다. 이후 높은 상관성을 갖는 다중 경로의 영향을 완화하기 위해 FBSS(forward-backward spatial smoothing)를 수행하고, 실수 빔 공간에서 형성된 공분산 행렬에 RB-MUSIC을 이용하여 직접 경로 성분의 DOA를 추정한다^{[15],[17]}. 제안된 기법은 송신 신호의 파형이나 전파 기하 정보에 대한 사전 지식 없이도 적용 가능하며, 다중 경로 신호의 기하 파라미터를 추정하기 위한 반복적인 추정 과정 없이 DOA 추정이 가능하다. 제안 기법은 비협조 방사원을 대상으로 하는 전자전 ESM 환경에서도 적용 가능한 DUCA 기반 DOA 추정 방법이라는 점에서 기존 연구와 차별성을 가진다. 제안 기법을 통해 해상 다중 경로 환경에서 발생하는 DOA 추정 편향이 효과적으로 완화된 시뮬레이션 결과로 확인하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서 해상 전자전 환경의 방사원 관측 모델과 다중 경로에 의해 발생하는 DOA 추정 한계를 기술한다. III장에서는 제안하는 DUCA 기반 DOA 추정 기법을 설명한다. IV장에서 해상 다중 경로 시나리오에서 수행한 시뮬레이션 결과를 통해 제안 기법의 성능을 검증하고, V장에서 결론을 맺는다.

II 해상 전자전 환경에서의 관측 모델 및 문제 설정

2.1 수신 신호 모델

해상 전자전 장비는 방사원으로부터의 직접 전파 경로와 해수면에 의한 다중 전파 경로를 통해 형성되는 신호를 관측한다. 각 물리적 전파 매커니즘에 따른 신호 성분을 분리하여 배열 수신 신호를 식 (1)과 같이 정의한다.

$$x(t) = x_{direct}(t) + x_{multi}(t) + n(t) \quad (1)$$

여기서 $x_{direct}(t)$, $x_{multi}(t)$ 와 $n(t)$ 는 각각 직접 경로, 다중 경로를 통한 배열 수신 신호와 잡음을 나타낸다.

그림 1은 해상 환경에서 전자전 장비와 방사원 간의 관측 기하를 나타낸다¹⁸⁾. 전자전 장비는 배열 중심을 기준으로 좌표 $(0, 0, h_r)$ 에 위치하고, 방사원은 좌표 (x_t, y_t, z_t) 에 위치한다. 직접 경로와 다중 경로에 대응하는 전파 경로 길이를 각각 R_d , $R_m = R_1 + R_2$ 로 정의한다. 또한, R_1 과 R_2 를 지표면 상으로 투영했을 때의 경로 거리를 r_1 과 r_2 로 정의한다. 방사원으로부터 전자전 장비로 입사하는 신호의 방향은 방위각 ϕ 와 고각 α 로 정의하여 (ϕ, α) 로 나타낸다. 방위각 ϕ 는 $x-y$ 평면에서의 입사 방향을 나타내며, 고각 α 은 $x-y$ 평면 기준 입사 각도로 정의한다. 본 논문에서는 직접 경로 신호와 다중 경로 신호의 DOA를 각각 (ϕ_d, α_d) , (ϕ_m, α_m) 으로 구분하여 나타낸다.

동일한 방사원으로부터 기인한 직접 경로와 해수면 반사 경로는 서로 다른 전파 경로를 따라 배열에 도달하므로, 각 경로에 따른 전파 기하 모델을 정의한다. 전자전

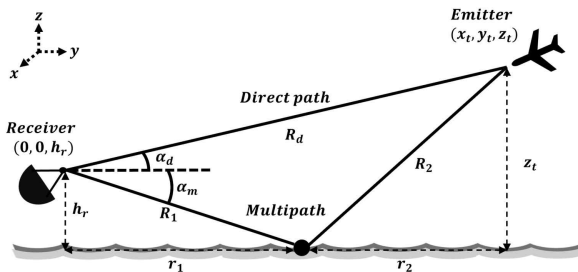


그림 1. 전자전 장비와 방사원 간 관측 기하
Fig. 1. Observation geometry between electric warfare equipment and an emitter.

높이 h_r , 방사원 높이 z_t , 지구 반지름 a_E , 그리고 각 전파 경로 거리 R_d , R_1 에 대해 직접 경로 입사 고각 α_d 와 다중 경로 입사 고각 α_m 은 식 (2)와 같이 표현된다¹⁰⁾.

$$\alpha_d = \sin^{-1} \frac{(z_t + a_E)^2 - R_d^2 - (h_r + a_E)^2}{2R_d(h_r + a_E)}$$

$$\alpha_m = \sin^{-1} \frac{R_1^2 + h_r^2 + 2a_E h_r}{2R_1(h_r + a_E)} \quad (2)$$

UCA는 반지름 r 을 갖는 원 위에 N 개의 안테나 소자가 균일한 간격으로 배치된 구조이며, 기하 구조와 입사파 방향 정의는 그림 2에 나타내었다¹⁵⁾. i 번째 소자의 원주 방향 위치각 ϕ_i 는 $\phi_i = 2\pi(i-1)/N$ 로 정의된다. 이에 따른 i 번째 안테나의 위치 벡터는 식 (3)과 같다.

$$r_i = [r \cos \phi_i, r \sin \phi_i, h_r]^T \quad (3)$$

입사 신호는 원거리 조건에서 평면파로 근사되며, 그림 2에 도시된 바와 같이 방위각 ϕ 와 고각 α 로 정의된다. 이에 대응하는 입사파 단위 벡터 k 는 식 (4)와 같다.

$$k = [\cos \alpha \cos \phi, \cos \alpha \sin \phi, \sin \alpha]^T \quad (4)$$

각 안테나 소자에서의 위상 지연은 입사 방향과 소자 위치의 내적 $k \cdot r_i$ 에 의해 결정된다. i 번째 소자에서의 추가적인 전파 경로는 $k \cdot r_i$ 로 표현되며, 이에 따른 위상은 파

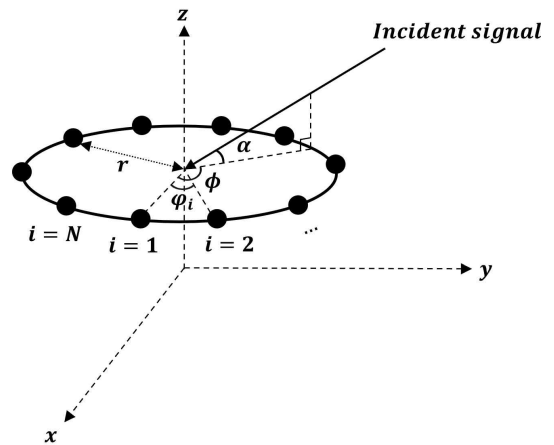


그림 2. UCA 배열 구조와 입사 신호의 기하 관계
Fig. 2. Geometry of the UCA structure and the incident signal.

수 $k_0=2\pi/\lambda$ 에 대해 $k_0(k \cdot r_i)$ 로 결정된다. λ 는 수신 신호의 파장을 나타낸다. 따라서 i 번째 소자의 조향 벡터는 식 (5)와 같이 정의된다.

$$a_i(\phi, \alpha) = \exp\{jk_0(k \cdot r_i)\} \quad (5)$$

식 (3) 및 식 (4)을 이용하여 식 (5)를 전개하면 식 (6)과 같다.

$$a_i(\phi, \alpha) = \exp\left[j\frac{2\pi}{\lambda}\{r \cos \alpha \cos(\varphi_i - \phi) + h_r \sin \alpha\}\right] \quad (6)$$

UCA에서는 각 소자의 위상 지연이 φ_i 와 ϕ 의 차이 ($\varphi_i - \phi$)에 의해 결정되며, 각각 α 는 $\cos \alpha$ 의 형태로 수평면 성분의 크기에 반영된다. 결과적으로, N 개 배열 소자에서 관측되는 UCA의 조향 벡터 $a(\phi, \alpha) \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 는 식 (7)과 같이 표현된다.

$$a(\phi, \alpha) = [a_1(\phi, \alpha), a_2(\phi, \alpha), \dots, a_N(\phi, \alpha)]^T \quad (7)$$

2-2 직접 경로 신호 관측 모델

직접 경로를 통해 전자전 장비에 도달하는 방사원의 기저대역(baseband) 신호는 식 (8)과 같이 정의한다^[5].

$$s_{direct}(t) = \sqrt{P_r} \exp\left(j\frac{2\pi}{\lambda} R_d\right) \quad (8)$$

$\sqrt{P_r}$ 은 직접 경로 신호에 대한 수신 전력을 나타내고, R_d 는 그림 1의 직접 경로 전파 거리이다. 조향 벡터 $a(\phi_d, \alpha_d)$ 를 이용하여, 직접 경로의 수신 신호 벡터 $x_{direct}(t) \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 는 식 (9)로 정의한다.

$$x_{direct}(t) = a(\phi_d, \alpha_d) s_{direct}(t) \quad (9)$$

또한, $n(t) \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 는 수신 과정에서 포함되는 잡음을 나타내며, 평균 0의 복소 가우시안 잡음이다. 본 논문에서는 SNR(signal-to-noise ratio) 조건을 설정하고, 이에 따른 잡음 전력을 기준으로 성능 분석을 수행한다.

2-3 다중 경로 성분 물리 모델

다중 경로를 통해 전자전 장비로 수신되는 신호 $s_{multi}(t)$ 는 전파 특성에 따라 1) 반사(specular) 성분과 2) 확산(diffuse) 성분으로 구분되며, 직접 경로 신호 $s_{direct}(t)$

를 통해 각각 정의된다^[5]. 반사 성분 $s_{spec}(t)$ 은 해수면 반사에 의한 반사 계수, 발산 효과, 거칠기 감쇠, 그리고 경로차 위상이 결합된 형태로 식 (10)과 같이 모델링한다.

$$s_{spec}(t) = \Gamma D \rho_{spec} s_{direct}(t) e^{-j\gamma} \quad (10)$$

여기서 Γ 는 해수면의 프레넬 반사 계수(Fresnel reflection coefficient)로서, 해수면 입사각 ψ 및 해수면의 복소 유전율 ϵ_c 으로 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Gamma = \frac{\sin \psi - \sqrt{\epsilon_c - \cos^2 \psi}}{\sin \psi + \sqrt{\epsilon_c - \cos^2 \psi}} \quad (11)$$

이때 해상 복소 유전율 ϵ_c 은 해상 염분, 온도 및 도전율의 함수로 모델링된다. 발산 계수 D 는 지구 곡률로 인해 전파가 퍼지는 정도를 반영해 식 (12)와 같이 표현되고, a_E 는 지구 반지름을 의미한다.

$$D = \left(1 + \frac{2r_1 r_2}{a_E(r_1 + r_2) \sin \psi}\right)^{-\frac{1}{2}} \quad (12)$$

ρ_{spec} 은 해수면 거칠기에 의해 반사 성분이 감쇠되는 효과를 반영하는 산란 계수이며, 거칠기 지표 x 에 대해 식 (13)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\rho_{spec} = \begin{cases} e^{-8(\pi x)^2} & 0 \leq x \leq 0.1 \\ \frac{0.812537}{1 + 8(\pi x)^2} & 0.1 < x \end{cases} \quad (13)$$

γ 은 직접 경로와 반사 경로 간의 경로 차에 의한 위상 항으로 식 (14)로 정의한다.

$$\gamma = \frac{2\pi(R_d - R_m)}{\lambda} \quad (14)$$

확산 성분 $s_{diff}(t)$ 은 해수면의 거칠기에 의해 발생하는 무작위 산란 성분이다. 확산 성분은 직접 경로 신호에 확산 계수 ρ_d 가 곱해진 형태로 식 (15)와 같이 표현된다.

$$s_{diff}(t) = \rho_{diff} \times s_{direct}(t) \quad (15)$$

여기서 ρ_{diff} 는 복소 랜덤 변수로 두며,

$$\rho_{diff} = \sigma_d \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2}{2}} e^{j\beta_d} \quad (16)$$

로 정의한다. σ_d 는 확산 성분의 Rayleigh 변수이며, 거칠

기 지표 x 와 식 (11)의 프레넬 반사 계수 Γ 에 대해 식 (17)과 같이 나타낸다.

$$\sigma_d = \begin{cases} \sqrt{2} |\Gamma| 3.86x & (0 < x < 0.1) \\ \sqrt{2} |\Gamma| (0.454 - 0.858x) & (0.1 \leq x < 0.5) \\ \sqrt{2} |\Gamma| 0.025 & (0.1 \leq x < 0.5) \end{cases} \quad (17)$$

또한, 식 (16)의 x_1, x_2 는 가우시안(Gaussian) 랜덤 변수이며 β_d 는 $[0, 2\pi)$ 구간에서의 값을 나타낸다.

다중 경로 성분에 의해 배열 수신 장비에서 관측되는 수신 신호 벡터는 식 (18)과 같이 표현할 수 있다.

$$x_{multi}(t) = a(\phi_m, \alpha_m)(s_{spec}(t) + s_{diff}(t)) \quad (18)$$

여기서 $a(\phi_m, \alpha_m) \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 는 다중 경로 성분의 입사 방향에 대한 배열의 조향 벡터를 나타낸다. $s_{spec}(t)$ 과 $s_{diff}(t)$ 은 각각 식 (10) 및 식 (15)에서 정의한 반사 성분과 확산 성분의 경로 신호이다. 확산 성분 $s_{diff}(t)$ 는 해수면 거칠기에 의해 발생하는 무작위 산란 성분이지만, 정반사점 주변에 집중된 형태로 근사할 수 있음이 확인되었다^{[5],[9]}. 이에 따라 본 논문에서는 반사 성분과 확산 성분이 동일한 입사 방향 (ϕ_m, α_m) 을 갖되, 각각의 물리적 특성을 반영하는 복소 진폭 계수를 통해 크기 및 위상 변동이 반영된 신호로 표현한다. 이를 하나의 복소 진폭 계수 $\tilde{\rho}$ 로 통합하여 식 (19)와 같이 나타낼 수 있다.

$$s_{multi}(t) = s_{spec}(t) + s_{diff}(t) = \tilde{\rho} s_{direct}(t) \quad (19)$$

여기서 $\tilde{\rho} = \rho_{spec} e^{-j\tau} + \rho_{diff} = |\tilde{\rho}| e^{j\psi}$ 는 해수면 반사 및 확산 성분이 결합된 복소 반사 계수를 의미한다. 따라서, 식 (1)의 직접 경로와 다중 경로를 모두 포함한 수신 신호 $x(t)$ 는 식 (20)과 같이 정리한다.

$$x(t) = a(\phi_d, \alpha_d) s_{direct}(t) + \tilde{\rho} a(\phi_m, \alpha_m) s_{direct}(t) + n(t) \quad (20)$$

이때, 조향 행렬 $A(\phi, \alpha)$ 에 대해 식 (21)과 같이 정리한다.

$$x(t) = A(\phi, \alpha) s(t) + n(t) \\ s(t) = \begin{bmatrix} s_{direct}(t) \\ s_{multi}(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 \\ \tilde{\rho} \end{bmatrix} s_{direct}(t) \quad (21)$$

여기서 $s(t)$ 는 각 입사 신호의 직접 경로 성분과 다중 경로 성분을 모두 포함하는 복소 진폭 벡터이다.

2-4 다중 경로로 인한 관측 한계

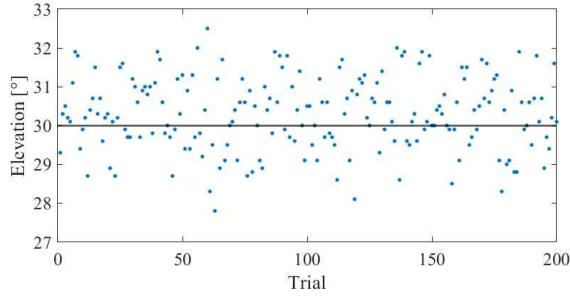
동일 방사원에서 발생한 직접 경로와 반사 경로 신호는 동시에 입사하며, 서로 강한 상관성을 갖는다. 이러한 상관 신호가 공존할 경우 배열 수신 신호의 공분산 행렬은 충분한 차원을 형성하지 못하며, 그 결과 부공간 기반 DOA 추정 기법은 각 신호를 독립적으로 분리하지 못하고 결합된 신호로 인식한다^[6].

또한, 해수면 반사에 의해 형성되는 반사 경로 신호는 직접 경로와 유사한 방위각을 갖는다^{[5],[7]}. 또한, 식 (2)를 통해 고각은 직접 경로와 다중 경로 신호의 부호가 반대이지만 크기가 유사하며, 지구 곡률 및 송수신 기하 구조의 영향으로 인해 두 경로의 고각 절댓값은 미세한 차이를 갖는 것을 확인할 수 있다. 이때, 단일 층 UCA 배열의 경우, 고각의 부호를 구분하지 못하고 $|\alpha|$ 의 형태로만 추정하는 구조적 한계가 존재한다. 따라서 배열은 직접 경로 (ϕ_d, α_d) 와 다중 경로 (ϕ_m, α_m) 를 서로 다른 신호로 인식하지 못하고, 두 신호가 혼합된 형태로 관측된다.

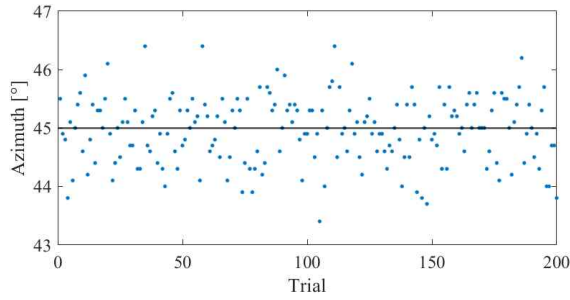
위에서 설명한 구조적 한계는 그림 3의 DOA 추정 결과에서 확인할 수 있다. 그림 3은 다중 경로 환경에서 UCA를 이용해 DOA를 반복 추정한 결과로, 검은 실선은 직접 경로 각도를, 파란 점은 각 trial에서의 추정 결과를 나타낸다. 그림 3(a) 및 그림 3(b)에서 확인할 수 있듯이, 두 경로의 합성 효과로 인해 왜곡된 DOA가 추정된다. 즉, 다중 경로는 단순한 간섭을 넘어 직접 경로 각도를 편향시키는 구조적 오차 요인으로 작용함을 확인할 수 있다.

III. 제안된 기법

본 논문에서는 해상 다중 경로 환경에서의 DOA 추정 성능 향상을 위해 배열 구조와 신호 처리 기법을 제안한다. 단층 UCA의 공간 정보 한계를 보완하기 위해, 동일 반경의 두 원형 배열을 서로 다른 높이에 배치한 DUCA 구조를 도입하여 입사 신호의 고각 성분이 층간 위상 차이로 반영되도록 한다. 수신 신호에 대해 공간 변환을 한 이후, 다중 경로 환경에서 높은 상관성을 갖는 신호 성분을 완화하기 위한 기법을 적용한다. 최종적으로, 고해상도 DOA 추정을 수행하는 전체 처리 절차를 구성한다.



(a) 고각 추정 결과
(a) Elevation estimation results



(b) 방위각 추정 결과
(b) Azimuth estimation results

그림 3. 다중 경로 환경에서의 DOA 추정 결과
Fig. 3. DOA estimation results in a multipath environment.

3-1 DUCA 배열 구조와 확장된 공간 응답

단층 UCA를 확장한 그림 4의 DUCA 구조를 제안한다. 각 층은 N 개의 안테나 소자로 구성되며, 전체 배열은 총 $2N$ 개의 소자를 포함한다. i 번째 소자의 방위각 위치 φ_i 와 높이 z_i 는 식 (22)와 같이 정의한다.

$$\varphi_i = \begin{cases} \frac{2\pi(i-1)}{N}, & i = 1, \dots, N \\ \frac{2\pi(i-N-1)}{N}, & i = N+1, \dots, 2N \end{cases}$$

$$z_i = \begin{cases} h_r - \frac{d}{2}, & i = 1, \dots, N \\ h_r + \frac{d}{2}, & i = N+1, \dots, 2N \end{cases} \quad (22)$$

여기서 h_r 는 DUCA 배열 중심 높이, d 는 두 층 사이의 수직 간격이다. 고각 α , 방위각 ϕ 로 입사하는 평면파에 대해 DUCA 배열의 i 번째 소자에서의 공간 응답 벡터 성분은 식 (23)과 같이 정리할 수 있다.

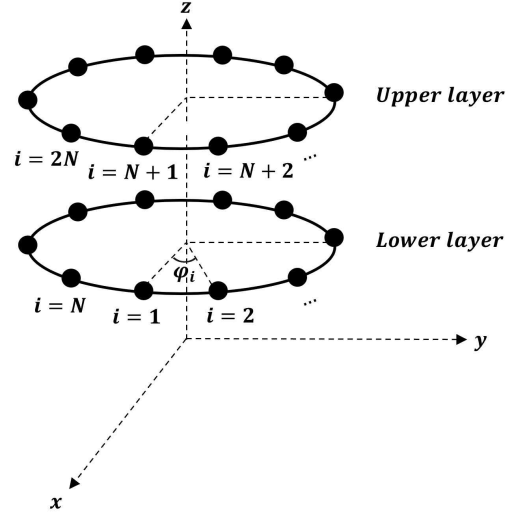


그림 4. DUCA 배열 구조
Fig. 4. DUCA structure.

$$a_i(\phi, \alpha) = \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda} \left\{ r \cos \alpha \cos(\varphi_i - \phi) + z_i \sin \alpha \right\} \right] \quad (23)$$

이때 DUCA 공간 응답 벡터는 하부 및 상부 UCA 층에 해당하는 부분 벡터로 식 (24)와 같이 나눌 수 있다.

$$a_{lower}(\phi, \alpha) = [a_1(\phi, \alpha), a_2(\phi, \alpha), \dots, a_N(\phi, \alpha)]^T$$

$$a_{upper}(\phi, \alpha) = [a_{N+1}(\phi, \alpha), a_{N+2}(\phi, \alpha), \dots, a_{2N}(\phi, \alpha)]^T \quad (24)$$

두 층은 동일한 방위각 위치 φ_i 를 공유하므로, 공통 UCA 공간 응답 벡터를 식 (25)로 정의할 수 있다.

$$a_{layer}(\phi, \alpha) = \begin{bmatrix} \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda} \{ r \cos \alpha \cos(\varphi_1 - \phi) + h_r \sin \alpha \} \right] \\ \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda} \{ r \cos \alpha \cos(\varphi_2 - \phi) + h_r \sin \alpha \} \right] \\ \vdots \\ \exp \left[j \frac{2\pi}{\lambda} \{ r \cos \alpha \cos(\varphi_N - \phi) + h_r \sin \alpha \} \right] \end{bmatrix} \quad (25)$$

이때, 각 층의 조향 벡터는 공통 조향 벡터 $a_{layer}(\phi, \alpha)$ 에 대해 식 (26)과 같이 표현한다.

$$a_{lower}(\phi, \alpha) = a_{layer}(\phi, \alpha) \exp \left(-j \frac{2\pi}{\lambda} \frac{d}{2} \sin \alpha \right)$$

$$a_{upper}(\phi, \alpha) = a_{layer}(\phi, \alpha) \exp \left(+j \frac{2\pi}{\lambda} \frac{d}{2} \sin \alpha \right) \quad (26)$$

DUCA 배열의 전체 조향 벡터는 다음과 같이 정의된다.

$$a(\phi, \alpha) = \begin{bmatrix} a_{lower}(\phi, \alpha) \\ a_{upper}(\phi, \alpha) \end{bmatrix} \quad (27)$$

단층 UCA와 달리, DUCA 구조에서는 두 층 간 높이 차이에 의해 수직 성분에 해당하는 소자 간 위상 차이가 형성된다. 이로 인해 배열 조향 벡터에는 고각의 부호 정보까지 반영되며, 직접 경로와 반사 경로 신호를 서로 다른 공간 응답으로 구분할 수 있는 조건을 만족한다.

3-2 PME 기반 DUCA 빔 공간 변환

요소 공간(element space)에서의 DUCA 조향 벡터는 원형 배열의 기하 구조로 인해 방위각 정보가 비선형적으로 얽혀 있어, 직접적인 각도 추정이나 부공간(subspace) 기반 DOA 기법 적용이 제한적이다^[14]. 이러한 한계를 완화하기 위해 PME를 적용한다. PME는 원형 배열의 원주 방향 위상 성분을 위상 모드(phase mode) 영역으로 변환하여, 방위각 정보를 선형 위상 진행 구조로 재구성하는 빔 공간(beam space) 변환 기법이다^{[13]-[15]}. PME는 RB-MUSIC 기반 DOA 추정을 위한 전처리 단계에 해당한다. DUCA는 각 층이 동일한 UCA 구조를 공유하므로, 앞 절에서 정의한 공통 조향 벡터 $a_{layer}(\phi, \alpha)$ 을 기준으로 실수 빔 공간 변환 행렬을 식 (28)과 같이 정의한다^[15].

$$\begin{aligned} F_r^H &= W^H C_v V^H \\ W &= \frac{1}{\sqrt{2M+1}} [v(\beta_{-M}), \dots, v(\beta_0), \dots, v(\beta_M)] \\ v(\phi) &= [e^{-jM\phi}, \dots, e^{-j\phi}, e^{j0}, e^{j\phi}, \dots, e^{jM\phi}] \\ \beta_i &= \frac{2\pi}{2M+1} i \\ C_v &= \text{diag}(j^{-M}, \dots, j^{-1}, j^0, j^1, \dots, j^M) \\ V &= \sqrt{N} [w_{-M}, \dots, w_0, \dots, w_M] \\ w_m &= \frac{1}{N} \begin{bmatrix} 1, e^{j\frac{2\pi}{N}m}, \dots, e^{j\frac{2\pi(N-1)}{N}m} \end{bmatrix}^H \end{aligned} \quad (28)$$

여기서 W 는 실수 변환 행렬, C_v 는 배열 패턴의 크기 변화를 보정하기 위한 대각 행렬, $V \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 은 UCA에 대한 DFT 기반 변환 행렬이다. $m \in [-M, \dots, 0, 1, \dots, M]$ 은 위상 모드 인덱스, M 은 $M = \lfloor 2\pi r / \lambda \rfloor$ 에 의해 결정되는 최대

위상 모드 차수이다.

공통 UCA 조향 벡터 $a_{layer}(\phi, \alpha)$ 에 PME를 적용하면 실수 빔 공간 조향 벡터는 식 (29)로 정의된다.

$$b_{layer}(\phi, \alpha) = F_r^H a_{layer}(\phi, \alpha) \quad (29)$$

이때, $b_{layer}(\phi, \alpha)$ 는 식 (30)과 같은 구조를 갖는다.

$$\begin{aligned} b_{layer}(\phi, \alpha) &= \sqrt{N} W^H J_\zeta v(\phi) \\ J_\zeta &= \text{diag}(J_{-M}(\zeta), \dots, J_M(\zeta)), \quad \zeta = \frac{2\pi r}{\lambda} \cos \alpha \end{aligned} \quad (30)$$

$v(\phi)$ 는 식 (28)의 방위각 ϕ 에 대한 위상 모드 벡터이며 J_ζ 는 고각에 의해 결정되는 베셀(Bessel) 함수 기반 대각 행렬이다. 즉, PME 이후 UCA 층의 빔 공간에서는 방위각 ϕ 가 $v(\phi)$ 의 위상 진행 구조에서 나타나며, 고각 α 는 J_ζ 의 진폭으로 분리되어 나타난다.

DUCA는 두 개의 동일한 UCA 층으로 구성되므로, 각 층에 동일한 PME 변환을 적용한다. 전체 DUCA 배열에 대한 실수 빔 공간 변환 행렬은 식 (31)로 정의한다.

$$F_{DUCA}^H = \begin{bmatrix} F_r^H & 0 \\ 0 & F_r^H \end{bmatrix} \quad (31)$$

DUCA 구조의 빔 공간 조향 벡터 $b(\phi, \alpha)$ 는 식 (32)와 같다.

$$b(\phi, \alpha) = F_{DUCA}^H a(\phi, \alpha) = \begin{bmatrix} F_r^H a_{layer}(\phi, \alpha) e^{-j\frac{2\pi}{\lambda} \frac{d}{2} \sin \alpha} \\ F_r^H a_{layer}(\phi, \alpha) e^{+j\frac{2\pi}{\lambda} \frac{d}{2} \sin \alpha} \end{bmatrix} \quad (32)$$

최종적으로, 요소 공간에서의 수신 신호 벡터 $x(t)$ 는 빔 공간 변환 행렬 F_{DUCA}^H 을 통해 식 (33)과 같이 빔 공간 신호 $y(t) \in \mathbb{C}^{p \times 1}$ 로 변환된다. p 는 빔 공간 벡터의 차원으로, $p = 2M+1$ 으로 결정된다.

$$y(t) = F_{DUCA}^H A(\phi, \alpha) s(t) + n(t) = B(\phi, \alpha) s(t) + n(t) \quad (33)$$

이때, $B(\phi, \alpha)$ 는 실수 빔 공간의 조향 행렬을 나타낸다.

3-3 FBSS 기반 Coherent 신호 분리

직접 경로와 다중 경로의 coherent 특성으로 인해 수신 신호의 공분산 행렬은 신호원의 개수보다 낮은 rank를 가지게 되어, 신호 부공간과 잡음 부공간 간의 직교성이 성

립하지 않는다. 빔 공간 수신 신호 $y(t)$ 에 대응하는 공분산 행렬 $R_y \in \mathbb{C}^{p \times p}$ 은 식 (34)와 같이 주어진다.

$$R_y = \mathbb{E}[y(t)y^H(t)] = B(\phi, \alpha)PB^H(\phi, \alpha) + \sigma^2 I \quad (34)$$

이때, $P = \mathbb{E}[s(t)s^H(t)]$ 는 신호 공분산 행렬이며, 식 (21)의 $s(t)$ 을 바탕으로 전개하면

$$P = P_r \begin{bmatrix} 1 \\ \tilde{\rho} \end{bmatrix} [1 \ \tilde{\rho}^*] = P_r \begin{bmatrix} 1 & \tilde{\rho}^* \\ \tilde{\rho} & |\tilde{\rho}|^2 \end{bmatrix} \quad (35)$$

로 주어진다. 해당 행렬은 직접 경로와 다중 경로 신호, 두 개의 신호가 존재함에도 불구하고 $\text{rank}(P)=1$ 을 만족한다. 즉, 다중 경로 환경에서 두 성분이 동일 방사원으로 부터 유도되므로 신호 공분산 행렬의 rank 가 감소한다. 결과적으로 부공간 기반 DOA 추정 기법은 두 경로 성분을 분리하지 못하고 단일 신호로 인식하게 되어 DOA 추정 오차가 발생한다.

해당 문제를 완화하기 위해 본 연구에서는 DUCA 빔 공간 구조의 centro-Hermitian 대칭성을 활용하여 FBSS를 수행한다. DUCA 빔 공간 조향 행렬은 식 (36)과 같다.

$$JB^*(\phi, \alpha) = B(\phi, \alpha) \\ J = \begin{bmatrix} 0 & I \\ I & 0 \end{bmatrix} \quad (36)$$

이때, J 는 빔 인덱스를 역순으로 교환하는 reversal 행렬이다. 해당 성질은 두 층이 중심을 기준으로 대칭이며, PME 변환 이후에도 빔 공간 위상 구조가 켈레 대칭을 유지하기 때문에 성립한다. Forward-backward 공분산 행렬 $R_{FB} \in \mathbb{C}^{p \times p}$ 을 식 (37)과 같이 정의한다.

$$R_{FB} = \frac{1}{2}(R_y + JR_y^*J) \quad (37)$$

식 (37)에 식 (34)를 대입하면,

$$R_{FB} = \frac{1}{2}(B(\phi, \alpha)PB^H(\phi, \alpha) + JB^*(\phi, \alpha)P^*B^T(\phi, \alpha)J) + \sigma^2 I \quad (38)$$

이고, 식 (36)을 이용하면

$$R_{FB} = B(\phi, \alpha) \frac{1}{2}(P + P^*)B^H(\phi, \alpha) + \sigma^2 I \\ = B(\phi, \alpha) \mathbb{R}\{P\} B^H(\phi, \alpha) + \sigma^2 I \quad (39)$$

로 정리된다. 이때, $\mathbb{R}\{P\}$ 를 전개하면 식 (40)과 같다.

$$\mathbb{R}\{P\} = P_r \begin{bmatrix} 1 & |\tilde{\rho}| \cos \nu \\ |\tilde{\rho}| \cos \nu & |\tilde{\rho}|^2 \end{bmatrix} \quad (40)$$

$\mathbb{R}\{P\}$ 에 대한 rank 를 확인하기 위하여, $\det(\mathbb{R}\{P\})$ 을 계산하면 식 (41)과 같다.

$$\det(\mathbb{R}\{P\}) = P_r^2 (|\tilde{\rho}|^2 - |\tilde{\rho}|^2 \cos^2 \nu) = P_r^2 |\tilde{\rho}|^2 \sin^2 \nu \quad (41)$$

이때, $\sin \nu \neq 0$, 즉 $\nu \notin \{0, \pi\}$ 인 경우 $\det(\mathbb{R}\{P\}) > 0$ 이므로 $\mathbb{R}\{P\}$ 는 full rank이며, $\text{rank}(\mathbb{R}\{P\})=2$ 가 성립하여, FBSS 이후 신호 공분산의 rank 가 복원된다. 이는 직접 경로와 다중 경로 신호가 더 이상 coherent하지 않은 두 개의 유효 신호 성분으로 분리됨을 의미하며, 결과적으로 신호/잡음 부공간 분리가 가능해진다.

3-4 RB-MUSIC 기반 DOA 추정

공분산 행렬 R_{FB} 에 대해 고유값 분해를 수행한다.

$$R_{FB} = U_s \Lambda_s U_s^H + U_n \Lambda_n U_n^H \quad (42)$$

여기서 $U_s \in \mathbb{C}^{p \times K}$ 는 신호 부공간, $U_n \in \mathbb{C}^{p \times (p-K)}$ 는 잡음 부공간을 구성하는 고유벡터 행렬이며, K 는 신호의 개수이다. 이때, 실제 입사각 (ϕ, α) 에서의 실수 빔 공간 조향 벡터 $b(\phi, \alpha)$ 는 잡음 부공간 U_n 과 직교하며, 이를 이용하여 RB-MUSIC 공간 스펙트럼 $P_{RB-MUSIC}(\phi, \alpha)$ 을 식 (43)과 같이 정의한다^[15].

$$P_{RB-MUSIC}(\phi, \alpha) = \frac{1}{b^H(\phi, \alpha) U_n U_n^H b(\phi, \alpha)} \quad (43)$$

공간 스펙트럼 $P_{RB-MUSIC}(\phi, \alpha)$ 를 $\alpha \in [-\pi/2, \pi/2]$, $\phi \in [-\pi, \pi]$ 의 2차원 탐색 격자에서 계산하고, 상위 K 개의 피크를 선택함으로써 신호원 각도를 추정한다.

$$(\hat{\phi}_k, \hat{\alpha}_k) = \underset{(\phi, \alpha)}{\text{argmax}} P_{RB-MUSIC}(\phi, \alpha), \quad k = 1, 2, \dots, K \quad (44)$$

단층 UCA 기반 MUSIC에서는 고각 부호 정보가 공간 응답에 반영되지 않아 α 와 $-\alpha$ 가 동일한 공간 스펙트럼 값이 유도된다. 반면, DUCA 구조에서는 상·하부 층 간의

수직 분리에 의해 고각 부호가 공간 응답에 포함되므로, 공간 스펙트럼은 $\alpha \in [-\pi/2, \pi/2]$ 범위에서 고각 부호를 포함한 추정이 가능해진다. 최종적으로, 제안된 기법은 해수면 다중 경로 환경에서도 직접 경로 방사원의 DOA를 안정적으로 추정할 수 있다.

제안 기법의 계산 복잡도는 RB-MUSIC 기반 DOA 추정 과정에서 수행되는 공분산 행렬의 고유향 분해와 공간 스펙트럼 탐색에 의해 결정된다. 따라서, DUCA의 실수 빔 공간 차원을 $q=2p$, 2차원 탐색 격자 수를 G 라 할 때, 계산 복잡도는 $O(q^3 + Gq^2)$ 으로 나타낼 수 있다.

IV. 시뮬레이션 결과

제안된 기법의 성능을 검증하기 위해 수치 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 1) UCA 기반 RB-MUSIC, 2) DUCA 기반 RB-MUSIC, 3) 제안된 기법을 동일 조건에서 적용하여 방위각 및 고각 추정 성능을 비교하였다^[15]. 식 (45)의 SNR 조건 변화 실험을 통해 제안된 기법의 다중 경로 및 열잡음 환경에서의 DOA 추정 안정성을 검증하였다.

$$SNR [dB] = 10 \log_{10} \left(\frac{P_r}{\sigma_n^2} \right) \tag{45}$$

이때, σ_n^2 는 복소 가우시안 잡음의 분산을 의미한다. 각도 추정 정확도에 대한 정량적 평가는 RMSE(root mean square error)를 이용하였으며, 이는 식 (46)으로 정의된다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{1}{L} \sum_{l=1}^L (\theta_l - \hat{\theta}_l)^2} \tag{46}$$

여기서, L 은 스냅샷의 개수, θ_l 은 각도의 참값, $\hat{\theta}_l$ 은 각도의 추정값을 의미한다. 시뮬레이션에 사용된 주요 파라미터는 표 1에 정리하였다.

4-1 DOA 추정 성능 분석

제안된 기법의 DOA 추정 성능을 평가하기 위해 서로 다른 DOA 추정 기법의 공간 스펙트럼을 비교하였으며, 주요 파라미터는 표 2에 정리하였다. 그림 5는 각 기법에 따른 2차원 공간 스펙트럼을 나타내며, 그림 5(a)는 UCA 기반 RB-MUSIC 기법의 결과를 보여준다. 해당 기법은 참값

표 1. 시뮬레이션 변수들

Table 1. Simulation parameters.

Parameters	Symbols	Values
Carrier frequency	f_c	1 (Ghz)
Wavelength	λ	0.3 (m)
UCA radius	r	0.21 (m)
Antenna height	h_r	10 (m)
Number of elements per layer	N	10
DUCA layer space	d	0.15 (m)
Snapshots	L	100
Complex permittivity	ϵ_c	54.65~j37.38
Surface roughness factor	x	1.62

표 2. 신호 시뮬레이션 시나리오 및 SNR 조건

Table 2. Signal simulation scenario and SNR condition.

Parameters	Symbols	Values
Direct path elevation	α_d	30 (°)
Direct path azimuth	ϕ_d	45 (°)
Multipath elevation	α_m	~28.8 (°)
Multipath azimuth	ϕ_m	45 (°)
SNR	-	30 (dB)

근처에서 방위각 및 고각을 추정하였으나, 고각에 대해 대칭적인 UCA 조향 벡터 특성으로 인해 고각 부호 정보가 소실되는 구조적 한계를 가진다. 이로 인해 해수면 반사로 형성된 다중 경로 성분이 직접 경로와 유사한 고각 절댓값을 가질 경우, 두 성분이 공간 스펙트럼에서 분리되지 못하고 왜곡된 피크가 형성되어 각도 추정 오차가 발생한다.

그림 5(b)는 DUCA 기반 RB-MUSIC 기법의 공간 스펙트럼을 나타내며, 고각 부호 정보가 반영되어 직접 경로와 다중 경로 신호가 서로 다른 위치의 피크로 분리되는 경향을 보인다. 그러나 두 성분이 동일 방사원에서 기인한 coherent 신호이므로 공분산 행렬의 rank 붕괴가 발생하여 신호 부공간 분리가 충분히 이루어지지 않는다. 그 결과 피크가 왜곡되어 DOA 추정 오차가 단일 UCA 기반 결과에 비해 오히려 증가하는 것을 확인할 수 있다.

제안된 기법의 그림 5(c) 공간 스펙트럼은 직접 경로와 다중 경로 신호에 대응하는 피크가 참값 위치에서 뚜렷

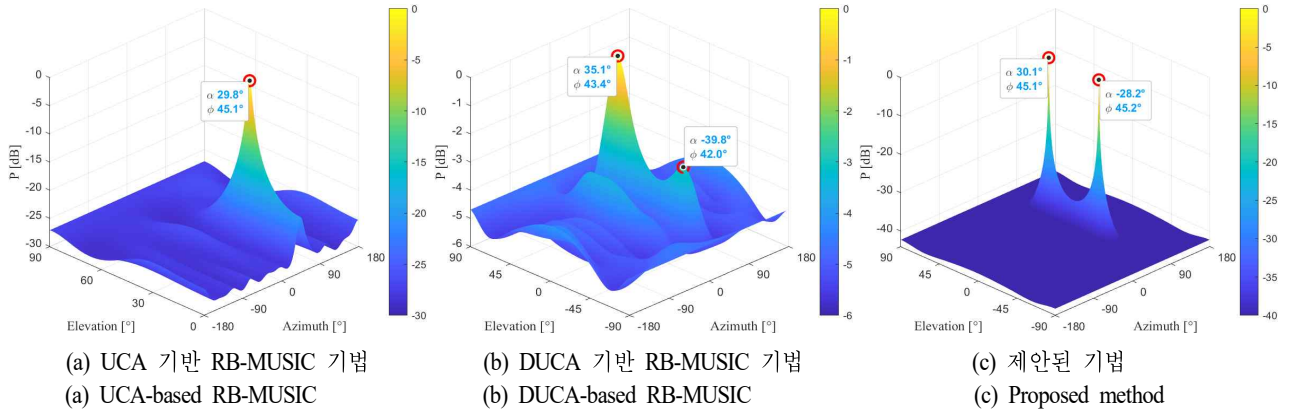


그림 5. DOA 추정 기법에 따른 공간 스펙트럼 비교(SNR=30 dB)
 Fig. 5. Comparison of spatial spectra for different DOA estimation methods (SNR=30 dB).

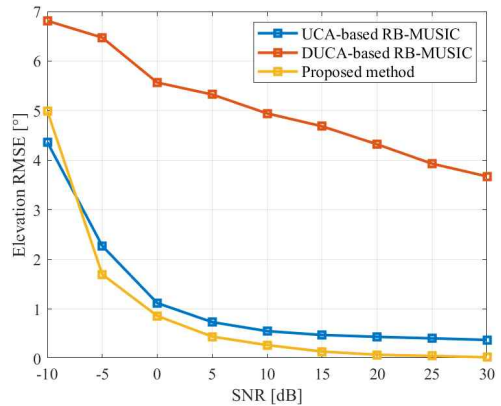
하게 형성되는 것을 확인할 수 있다. 이를 통해 제안된 기법이 다중 경로가 존재하는 환경에서도 직접 경로의 DOA를 안정적으로 추정할 수 있음을 확인할 수 있다.

그림 6은 SNR -10 dB부터 30 dB까지의 범위에서 DOA 추정 RMSE 결과를 나타낸다. 그림 6(a)의 고각 RMSE 결과를 보면, 기법 간 성능 차이가 뚜렷하게 나타난다. UCA 기반 RB-MUSIC은 SNR이 증가함에 따라 RMSE가 점진적으로 감소하는 경향을 보이지만, DUCA 기반 RB-MUSIC의 경우 전 SNR 구간에서 비교적 큰 오차를 보이며 고 SNR 영역에서도 오차 감소가 제한적인 모습을 보인다. 반면 제안된 기법은 전 SNR 구간에서 가장 낮은 고각 RMSE를 유지하며, 특히 SNR이 증가함에 따라 오차가 빠르게 감소하는 것을 확인할 수 있다.

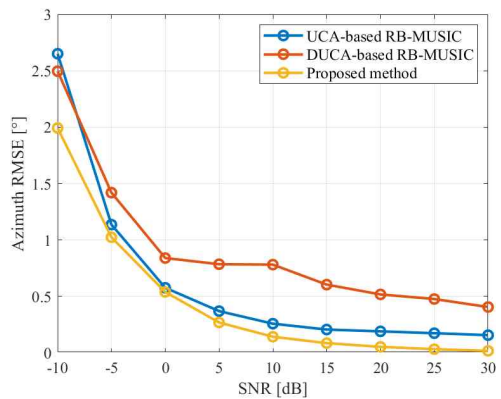
그림 6(b)의 방위각 RMSE 결과에서는 세 기법 모두 유사한 감소 경향을 보이며, SNR이 증가할수록 안정적으로 오차가 감소한다. 이는 다중 경로 신호가 방위각보다는 고각 추정에 더 큰 영향을 미침을 확인할 수 있다^[16]. 해당 결과는 제안된 기법이 해수면 다중 경로 환경에서 특히 고각 추정 성능을 효과적으로 개선함을 보여준다.

4.2 방사원 기동 시나리오에서의 DOA 추정 결과

제안된 기법의 성능을 다양한 전파 기하 조건에서 검증하기 위해, 본 논문에서는 방사원이 기동 궤적을 따라 이동하는 시나리오를 구성하고 이에 따른 DOA 추정 결과를 분석하였다. 그림 7은 시뮬레이션에 사용된 방사원



(a) 고각 RMSE 결과
 (a) Elevation RMSE results



(b) 방위각 RMSE 결과
 (b) Azimuth RMSE results

그림 6. SNR에 따른 DOA 추정 RMSE 비교
 Fig. 6. Comparison of DOA estimation RMSE versus SNR.

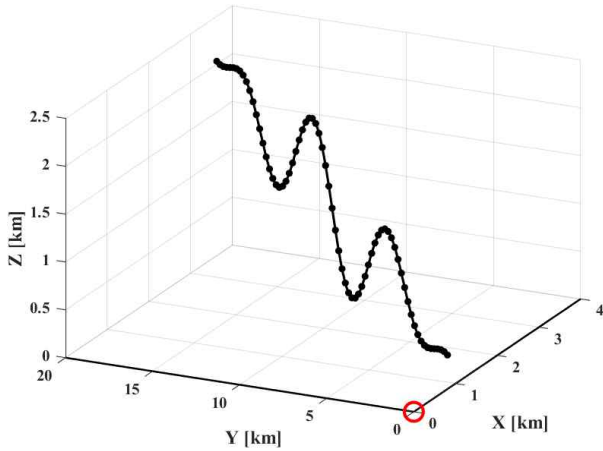
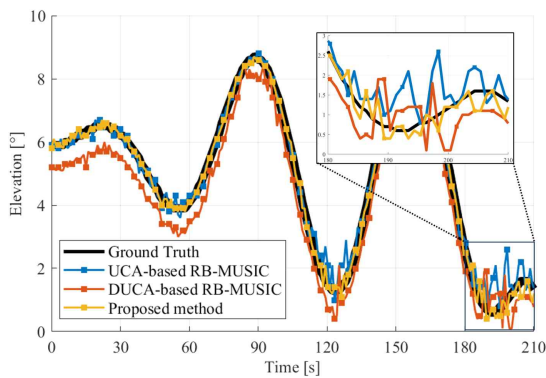
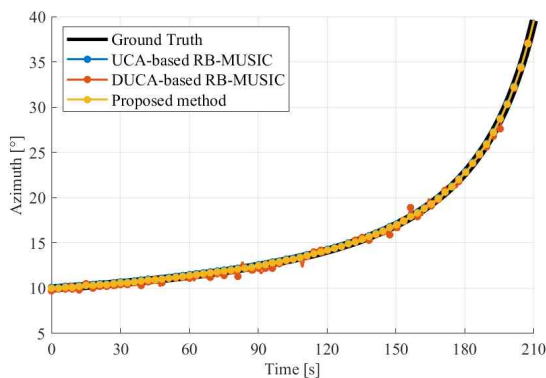


그림 7. 기동 시나리오에 따른 방사원 기동 궤적
Fig. 7. Emitter trajectories according to flight scenarios.



(a) 고각 추정 결과
(a) Elevation estimation results



(b) 방위각 추정 결과
(b) Azimuth estimation results

그림 8. 방사원 궤적 시나리오에서의 DOA 추정 결과 비교
Fig. 8. DOA estimation results in a emitter trajectory scenario.

의 3차원 이동 경로를 나타내며, 붉은 원은 전자전 장비의 위치를 의미한다. 그림 8은 시간에 따른 고각 및 방위각 추정 결과를 나타낸다.

먼저 그림 8(a)의 고각 추정 결과에서 고각이 약 5° 이상인 구간에서는 세 기법 모두 참값을 비교적 잘 추종하는 경향을 보인다. 그러나 저고도 구간에서는 기법 간 성능 차이가 뚜렷하게 나타난다. UCA 기반 RB-MUSIC과 DUCA 기반 RB-MUSIC은 고각이 작아질수록 해수면 반사에 의한 다중 경로 성분의 영향이 상대적으로 커지면서 추정값이 참값에서 벗어나는 경향을 확인할 수 있다. 반면 제안된 기법은 직접 경로와 다중 경로 성분을 효과적으로 분리함으로써, 저고도 구간에서도 참값에 근접한 고각 추정 성능을 달성하는 것을 확인할 수 있다.

그림 8(b)의 방위각 추정 결과에서는 세 기법 모두 시간에 따른 참값 변화를 안정적으로 추정하며, 기법 간 성능 차이는 상대적으로 크지 않다. 이는 다중 경로 신호가 방위각보다는 고각 추정에 더 큰 영향을 미치기 때문이다^{[9]-[12]}. 제안된 기법은 고각 방향에서의 다중 경로 간섭 완화에 효과적임을 보여준다.

V. 결 론

본 논문에서는 해상 전자전 환경에서 해수면 다중 경로 간섭으로 인한 DOA 추정 한계를 분석하고, 이를 완화하기 위한 DUCA 기반 DOA 추정 기법을 제안하였다. 제안된 기법은 고각 부호 모호성을 해소하고, 직접 경로와 다중 경로 신호를 분리한다. 시뮬레이션 결과, 제안된 기법은 해수면 다중 경로 환경에서도 직접 경로 DOA를 안정적으로 추정하는 것을 확인했다.

References

- [1] Y. Jung, D. Yoon, "Electromagnetic spectrum operations and signal intelligence strategy," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 33, no. 9, pp. 685-694, Sep. 2022.
- [2] R. Poisel, *Modern Communications Jamming: Principles and Techniques*, Norwood, MA, Artech House, 2011.

- [3] K. T. Kang, J. S. Woo, and Y. S. Yoon, "Optimization of pulse compression for low probability of intercept (LPI) radar systems," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 36, no. 8, pp. 779-786, Aug. 2025.
- [4] 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.
- [5] A. Sinha, Y. Bar-Shalom, W. D. Blair, and T. Kirubarajan, "Radar measurement extraction in the presence of sea-surface multipath," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 39, no. 2, pp. 550-567, Apr. 2003.
- [6] W. D. White, "Low-angle radar tracking in the presence of multipath," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. AES-10, no. 6, pp. 835-852, Nov. 1974.
- [7] Y. Li, H. Ma, Y. Wu, L. Cheng, and D. Yu, "DOA estimation for echo signals and experimental results in the AM radio-based passive radar," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 73316-73327, Nov. 2018.
- [8] M. Khalaf-Allah, "Emitter location with azimuth and elevation measurements using a single aerial platform for electronic support missions," *Sensors*, vol. 21, no. 12, p. 3946, Jun. 2021.
- [9] M. Y. You, W. Wang, L. Gao, Y. X. Ye, K. Huang, and A. N. Lu, et al., "Joint direct estimation of emitter location and antenna beam direction based on baseband reconstruction," *IEEE Sensors Journal*, vol. 23, no. 9, pp. 9607-9619, May 2023.
- [10] H. Kim, N. Choi, S. Kim, S. Jun, K. Kim, and I. Choi, "Efficient estimation of elevation angle for low-altitude maneuvering target using electronic warfare equipment in sea surface environment," *The Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol. 35, no. 8, pp. 656-666, Aug. 2024.
- [11] R. Reddy, S. Sinha, "State-of-the-art review: Electronic warfare against radar systems," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 57530-57567, Mar. 2025.
- [12] F. Chen, T. Zhou, W. Yi, L. Kong, and B. Zhai, "Passive direct position determination of multiple emitters transmitting unknown LFM signals," in *2018 IEEE Radar Conference(RadarConf18)*, Oklahoma City, OK, Apr. 2018, pp. 1129-1133.
- [13] C. Wang, X. Zhu, "Three-dimensional parameter estimation of uniform circular frequency diverse array radar with two-stage estimator," *IEEE Sensors Journal*, vol. 21, no. 16, pp. 17775-17784, Aug. 2021.
- [14] J. G. Davis, A. A. P. Gibson, "Phase mode excitation in beamforming arrays," in *2006 European Radar Conference*, Manchester, Sep. 2006, pp. 307-310.
- [15] C. P. Mathews, M. D. Zoltowski, "Eigenstructure techniques for 2-D angle estimation with uniform circular arrays," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 42, no. 9, pp. 2395-2407, Sep. 1994.
- [16] W. Zhang, J. Yi, F. Cheng, K. Wang, and X. Wan, "Target elevation estimation for passive radar based on double-layer uniform circular array," *IEEE Sensors Journal*, vol. 23, no. 17, pp. 19946-19958, Sep. 2023.
- [17] S. U. Pillai, B. H. Kwon, "Forward/backward spatial smoothing techniques for coherent signal identification," *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. 37, no. 1, pp. 8-15, Jan. 1989.
- [18] H. J. Kim, S. Y. Kwon, J. Y. Ryu, J. H. Park, J. Y. Kang, and H. N. Kim, "Analysis of 3D localization performance considering Earth's curvature based on AOA," *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, vol. 49, no. 10, pp. 1410-1418, Oct. 2024.
- [19] D. Park, E. Yang, S. Ahn, and J. Chun, "Adaptive beamforming for low-angle target tracking under multipath interference," *IEEE Transactions on Aerospace and Electronic Systems*, vol. 50, no. 4, pp. 2564-2577, Oct. 2014.

이 하 린 [포항공과대학교/석사과정]

<https://orcid.org/0009-0005-0160-7423>



2024년 2월: 중앙대학교 전자전기공학부 (공학사)
2024년 3월~ 현재: 포항공과대학교 전자 전기공학과 (석사과정)
[주 관심분야] 레이더 신호 처리, 전자전 시스템

김 현 동 [포항공과대학교/박사과정]

<https://orcid.org/0009-0002-8398-3868>



2023년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)
2025년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
2025년 3월~ 현재: 포항공과대학교 전자 전기공학과 (박사과정)
[주 관심분야] 레이더 신호 처리, 전자전 시스템, ISAR

문 호 상 [LIG 디펜스&에어로스페이스/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-1128-7249>



2006년 8월: 경희대학교 전파통신공학과 (공학사)
2008년 8월: 경희대학교 전파공학과 (공학석사)
2008년 7월~현재: LIG 디펜스&에어로스페이스 수석연구원
[주 관심분야] 전자전 시스템, 안테나, EM 시뮬레이션

이 명 식 [LIG 디펜스&에어로스페이스/수석연구원]

<https://orcid.org/0000-0002-5496-5647>



2002년 2월: 연세대학교 기계공학과 (공학사)
2023년 8월: 연세대학교 전기전자공학과 (공학석사)
2002년 3월~2005년 4월: 삼성SDS
2005년 4월~2005년 11월: LG전자
2005년 11월~현재: LIG 디펜스&에어로스페이스 수석연구원

[주 관심분야] 전자전 시스템, 방향탐지, COMINT, SIGINT, 위성재밍

홍 용 기 [LIG 디펜스&에어로스페이스/선임연구원]

<https://orcid.org/0000-0003-3557-6088>



2020년 2월: 부경대학교 전자공학과 (공학사)
2022년 2월: 부경대학교 전자공학과 (공학석사)
2022년 1월~현재: LIG 디펜스&에어로스페이스 선임연구원
[주 관심분야] 전자전 시스템, 통신 및 레이더 신호처리

도 인 현 [LIG 디펜스&에어로스페이스/선임연구원]

<https://orcid.org/0009-0000-4658-4775>



2019년 8월: 한밭대학교 정보통신공학과
2024년 2월~현재: LIG 디펜스&에어로스페이스 선임연구원
[주 관심분야] 전자전 시스템, 방향탐지 알고리즘, 디지털 로직

김 경 태 [포항공과대학교/교수]

<https://orcid.org/0000-0003-1200-5282>



1994년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학사)
1996년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학석사)
1999년 2월: 포항공과대학교 전자전기공학과 (공학박사)
2002년 3월~2011년 2월: 영남대학교 전자공학과 교수

2011년 3월~현재: 포항공과대학교 전자전기공학과 교수
2012년 9월~2017년 12월: 레이더/IR 표적식별 특화연구실 실장
2018년 1월~현재: 무인감시정찰기술연구센터장
2019년 4월~현재: 차세대 영상레이더시스템 연구센터장
2020년 11월~현재: 차세대 국방융합기술 연구센터장
2024년 7월~현재: 국방과학기술 협력센터장
[주 관심분야] 레이더 신호 처리 및 영상, 레이더 표적인식 및 패턴인식, 전자기수치해석 및 RCS 측정