

수중 ISAC에서 CSM 기반 광대역 도달방향 추정

유양*, 차민혁, 이호준, 고학립

호서대학교

*ly960401@naver.com

CSM-based wideband direction-of-arrival estimation in underwater ISAC

LIU YANG, Cha Min Hyuk, Ko Hak Lim, Lee Hojun

Hoeso Univ.

요약

사물인터넷 (Internet of Underwater Things, IoUT) 및 다중 AUV 네트워크의 미래를 위한 핵심 기술로서 통합 센싱·통신(Integrated Sensing and Communication, ISAC)이 부상하고 있다. 그런데 수중 음향 환경은 스펙트럼 제한, 높은 에너지 소모, 하드웨어 자원 공유의 필요라는 근본 제약을 가지며, 가혹한 채널 특성 하에서도 신뢰할 수 있는 통신과 고정밀 방향 정보의 동시 확보가 요구된다. 본 연구에서는 광대역 신호의 DOA 추정을 위한 최적 focusing 주파수를 결정하는 코히어런트 신호 서브스페이스 처리 기법에 대한 연구를 수행하였다. 본 기법에서는 대역폭 내에서 중첩되지 않는 주파수 점들의 신호 서브스페이스를 하나의 기준 주파수 점으로 부분 focusing한 후, 이 단일화된 focusing 주파수 점 신호를 바탕으로 기준의 협대역 신호 방위 추정 기법을 적용할 수 있으며, 시뮬레이션 결과 전반적으로 모든 SNR 환경에서 성능이 우수함을 알 수 있었다.

I. 서 론

수중 사물 인터넷(IoUT)을 위한 통합 감지 및 통신(ISAC) 네트워크에서 기준 방법은 통신 시스템과 탐지(소나) 시스템을 분리하여 운용하는 경우가 많다. 이는 스펙트럼, 에너지, 하드웨어 자원의 비효율적 사용을 초래하며, 대규모·장기간의 해양 모니터링 수요를 충족하기 어렵게 만든다. ISAC은 파형과 하드웨어를 공유함으로써 ‘표적 탐지’를 노드 간 ‘협력적 위치 추정’으로 확장하고, 위치 추정/감지를 통신 링크 설계 과정에 통합하여 시스템 차원에서 자원 효율성과 감지·통신 성능을 향상시킨다.

한편 수중 환경의 신호 전파 지연, 높은 다중경로 효과 및 해류로 인한 엉커 노드 위치의 불확실성으로 인해, 신뢰성 있는 통신과 동시에 고정밀 방향 및 거리 정보를 획득하는 것이 특히 중요해졌다. ISAC 시스템에서 선형 주파수 변조(LFM) 신호는 도플러 효과에 대한 강인성, 고유의 넓은 대역폭 및 필스 압축 이득 덕분에 공유 파형으로 자주 선택되며, 통신 및 감지 정보를 동시에 획득하는 데 사용된다. 광대역 신호는 통신에 더 높은 데이터 비트 레이트를 제공할 뿐 아니라, 풍부한 주파수 차원 정보와 고정밀 거리 분해능을 갖춘다. [1]

고전적인 광대역 DOA 추정 알고리즘 중 비코히어런트 신호 부분공간 방법(ISM)은 모든 주파수 지점의 결과를 평균화하는 방식을 사용하므로, 강한 상관성을 갖는 다중경로에 민감하여 성능이 저하된다. 반면 코히어런트 신호 서브스페이스 방법(CSM)은 각 주파수 지점에 대해 focusing matrix를 구성하여 수신 신호 부분 공간을 기준 주파수에 회전·정렬시키고 공분산 행렬을 구한다. 이를 통해 상관 신호를 처리할 수 있을 뿐만 아니라, 낮은 신호대잡음비(SNR) 조건에서도 추정 성능을 현저히 향상시킬 수 있다. CSM 알고리즘은 배열 구조에 대한 특별한 요구 사항이 없다는 특징이 있다. 이는 IoUT - ISAC의 수중 제약 조건(제한된 배열 소자 수, 제한된 대역폭 및 전력 소모, 불완전한 동기화)에 잘 적용할 수 있도록 하여, 배치 비용과 하드웨어 복잡성의 부담을 줄이는 데 도움이 된다.

II. 본론

반지름 R인 원에 M개의 배열 센서가 균일 간격으로 배치되어 있다고 가정한다(그림 1). 서로 다른 방향에서 입사하는 원거리(far-field) 광대역 신호가 K개 존재하며 ($K < M$), 중심 주파수는 f_0 이다. 좌표계의 원점은 원의 중심에 두고, 제1 센서는 x축 위에 위치한다. 모든 센서는 등방성(isotropic)으로 가정한다. k번째 신호의 고각(elevation)과 방위각(azimuth)을 각각 θ_k , ϕ_k 로 표기하며, $k \in 1, \dots, K$, $\theta_k \in [0^\circ, 90^\circ]$, $\phi_k \in [0^\circ, 360^\circ]$. 센서 간격 d는 수신 신호의 최소 파장 λ_{\min} 의 절반으로 설정한다.

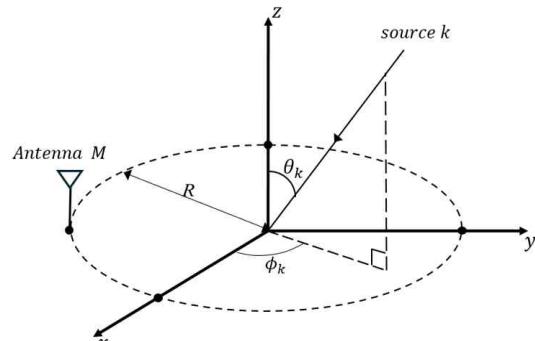


그림1 UCA의 신호 수신 기하학

m번째 센서에서의 수신 신호는

$$x_m(t) = \sum_{k=1}^K s_k(t - \tau_{m,k}) + w_m(t) \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (1)$$

여기서 $s_k(t)$ 는 k번째 소스 신호, $\tau_{m,k}$ 는 k번째 신호에서 m번째 센서까지의 지연이고, $w_m(t)$ 는 평균 0이며, 분산 σ^2 의 가우시안 백색잡음이다.

주파수 영역에서 f_j ($j = 1, \dots, J$)에 대한 m번째 센서의 관측치는 다음과 같이 쓸 수 있다. [2]

$$X_m(f_j) = \sum_{k=1}^K S_k(f_j) e^{-j2\pi f_j \tau_{m,k}} + W_m(f_j) \quad (2)$$

여기서 $S_k(f_j)$ 는 k번째 신호의 스펙트럼 성분.

주파수 f_j 에서의 수신된 신호 행렬은

$$X_f(f_j) = A(f_j, \theta_k, \phi_k) S_f(f_j) + W(f_j) \quad (3)$$

로 표현된다.

여기서 $X_f(f_j) \in C^{M \times N}$, $S_f(f_j) \in C^{K \times N}$, $W(f_j) \in C^{M \times N}$ 이며,

$$\text{그중 } A(f_j, \theta_k, \phi_k) = \begin{bmatrix} e^{-j\frac{2\pi f_j R}{c} \sin \theta_k \cos\left(\frac{2\pi \times 0}{M} - \phi_k\right)} \\ e^{-j\frac{2\pi f_j R}{c} \sin \theta_k \cos\left(\frac{2\pi \times 1}{M} - \phi_k\right)} \\ \vdots \\ e^{-j\frac{2\pi f_j R}{c} \sin \theta_k \cos\left(\frac{2\pi \times (M-1)}{M} - \phi_k\right)} \end{bmatrix} \quad (4)$$

[2]에 기술된 바와 같이, 새로운 관측 벡터 Y_j 는 다음과 같이 표현된다.

$$Y_j = B(f_j) X_f(f_j) \quad (5)$$

여기서 $B(f_j)$ 는 focusing 행렬로, 주파수 f_j 에서의 신호 부분공간을 주파수 f_0 에서의 신호 부분 공간과 정렬(회전)시키는 역할을 한다. 즉,

$$B(f_j) A(f_j, S_p) = A(f_0, S_p) \quad (6)$$

로 나타낼 수 있다. S_p 는 $(\hat{\theta}, \hat{\phi})$ 로 구성된 focusing 각도 집합(초기 DOA 추정 혹은 미리 설계한 격자)을 의미한다. 정확도와 계산 복잡도의 균형을 위해 다음과 같은 Frobenius norm 최소화 문제를 고려한다.

$$\underset{B(f_j)}{\operatorname{argmin}} \|A(f_0, S_p) - B(f_j) A(f_j, S_p)\|_F \quad (7)$$

$$\text{subject to } B^H(f_j) B(f_j) = I_M$$

$\|\cdot\|_F$ 는 Frobenius norm, I_M 는 $M \times M$ 단위행렬이다.

상기 최소화 문제의 해는 정규 직교 Procrustes[3]해로 주어지며,

$$C_j \triangleq A(f_0, S_p) A^H(f_j, S_p) \quad (8)$$

로 정의한다. C_j 의 SVD를

$$C_j = U \Sigma V^H \Rightarrow B(f_j) = U_j V_j^H \quad (9)$$

로 쓰면, 여기서 U_j 의 열벡터는 좌특이벡터(left singular vectors), V_j 의 열벡터는 우특이벡터(right singular vectors)이다.

focusing이 완료된 후, 주파수 및 스냅샷 평균 공분산 행렬은

$$R_Y = \frac{1}{NJ} \sum_{j=1}^J [B(f_j) X_f(f_j)] [(B(f_j) X_f(f_j))^H] \quad (10)$$

로 주어진다. 여기서 N은 각 주파수에서의 스냅샷 수, J는 선택된 대역 내 주파수의 개수이다. 마지막으로 기준 주파수 f_0 에서 MUSIC 알고리즘을 사용하여 2차원 공간 스펙트럼을

$$P(\theta, \phi) = \frac{1}{a^H(f_0, \theta, \phi) E_n E_n^H a(f_0, \theta, \phi)}, \quad \theta \in [0^\circ, 90^\circ], \phi \in [0^\circ, 360^\circ] \quad (11)$$

와 같이 계산한다. 여기서 $a(f_0, \theta, \phi)$ 는 기준 주파수의 steering vector, E_n 은 R_Y 의 잡음 부분공간 집합이다.

시뮬레이션에서는 UCA 안테나 소자 수 M을 8로 설정하였다. 음속은

$c=1500\text{m/s}$ 이다. 수신 신호는 중심주파수 $f_0=30\text{kHz}$ 의 LFM 신호이며, 이를 analytic 신호로 변환하였다. 대역폭 B와 샘플링 주파수 f_s 는 각각 10kHz 와 100kHz 로 설정하였고, 샘플링 기간은 $t_0=10\text{ms}$ 이다. 이때 UCA의 반경은 $R=c/(4(f_0+B/2)\sin(\pi/M))$ 로 계산된다. 또한 거의 코히어런트한 신호, 즉 동일한 신호가 서로 다른 경로를 통해 안테나 어레이에 연속적으로 도달하는 시나리오를 고려하였다. 이러한 시나리오에서는 비상관 신호의 경우보다 DoA를 정확하게 추정하기가 더 어려우므로, 본 구성은 CSM의 보편적 적용 가능성을 보여 준다.

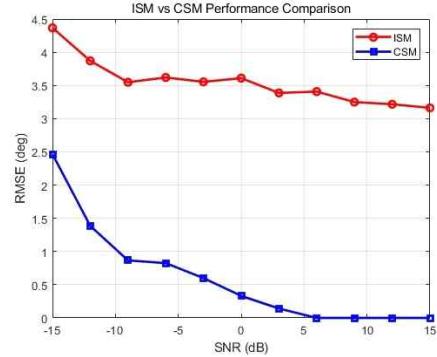


그림2 RMSE vs. SNR

III. 결론

본 논문은 몬테카를로 시뮬레이션을 통해, 다중경로 채널에서 주파수 focusing을 이용한 CSM 기반 광대역 DOA 추정이 전반적인 SNR 범위에서 ISM 방식 대비 낮은 RMSE를 보이며 특히 저 SNR 구간에서 유의한 이점을 나타냄을 보였다. 따라서, 본 방법은 주파수 차원이 제한된 수중 환경에서도 정확도와 강건성을 유지하는 ISAC-IoUT 구현에 실용적 대안이 될 수 있을 것으로 사료된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단-설시간 해저재해 감시 기술개발사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (2022M3J9A107887613, 50%)

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-지역지능화혁신인재양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임 (IITP-2025-RS-2024-00436765, 50%)

참 고 문 헌

- [1] T. Duan, H. Liang, L. Yue and Z. Dai, "Underwater Extended Target Detection Based on Interframe Mutual Information in Range-Doppler Spatial Domain," in IEEE Sensors Journal, vol. 25, no. 16, pp. 31242-31253, 15 Aug. 15, 2025, doi: 10.1109/JSEN.2025.3587234.
- [2] W. Li, X. Xu, X. Huang and Y. Yang, "Direction-of-Arrival Estimation for Coherent Signals Exploiting Moving Coprime Array," in IEEE Signal Processing Letters, vol. 30, pp. 304-308, 2023, doi: 10.1109/LSP.2023.3261127.P
- [3] . Pal and P. P. Vaidyanathan, "A novel autofocusing approach for estimating directions-of-arrival of wideband signals," 2009 Conference Record of the Forty-Third Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers, Pacific Grove, CA, USA, 2009, pp. 1663-1667, doi: 10.1109/ACSSC.2009.5469796.