

Mobile ISAC 시스템 STAP 기반 클러터 억제 및 이동체 센싱 알고리즘

이나경, 박현우, 김한빛, 김선우
한양대학교 융합전자공학과

{nagyeong2379, stark95, dante0813, remero}@hanyang.ac.kr

STAP-based Clutter Suppression and Target Sensing for Mobile ISAC Systems

Nakyung Lee, Hyunwoo Park, Hanvit Kim, and Sunwoo Kim
Department of Electronic Engineering, Hanyang University

요약

본 논문에서는 mobile ISAC (integrated sensing and communication) 시스템에서 클러터를 억제하고 이동체의 각도, radial velocity 및 range를 추정하는 알고리즘을 제안한다. Mobile ISAC 시스템에서 클러터는 이동체 센싱 성능을 저하시키므로 센싱 성능을 향상하기 위해서는 이동체 신호 억제가 필수적이다. 제안하는 알고리즘은 orthogonal frequency division multiplexing 기반 echo 신호를 radar-like data cube로 변환하고 space-time adaptive processing을 적용하여 클러터 신호를 억제하여 이동체의 각도, radial velocity 및 range를 추정한다. MATLAB 시뮬레이션을 통하여 제안 알고리즘의 각도-velocity 파워 스펙트럼을 출력하고 range 추정 결과를 확인하였으며 제안 알고리즘을 통하여 이동체 센싱 정확도가 향상함을 보인다.

I. 서론

ISAC (integrated sensing and communication) 시스템은 고정밀 센싱 기능 및 고품질 무선 연결을 지원하여 B5G/6G를 위한 핵심 연구 주제로 각광받고 있다 [1]. ISAC 시스템에서 고정 물체에 반사된 신호인 클러터를 고려한 이동체 센싱 연구가 진행되고 있다 [2-3]. 하지만, zero Doppler shift의 클러터를 가정하고 주파수 필터링을 통하여 클러터를 억제하므로 mobile ISAC 시스템에서는 클러터 억제 성능이 저하된다. 따라서, mobile ISAC 시스템에서는 non-zero Doppler shift의 클러터 억제가 필수적이다. 본 논문에서는 mobile ISAC 시스템에서 STAP (space-time adaptive processing) 알고리즘을 적용하여 클러터를 억제하고 이동체의 각도, radial velocity 및 range를 추정한다.

II. OFDM 기반 ISAC 신호 모델

본 논문은 반파장 간격으로 구성된 안테나 원소 M 개의 ULA (uniform linear antenna)를 가지는 BS가 그림 1과 같이 K 개의 이동체와 P 개의 클러터를 센싱하는 시나리오를 고려한다. 센싱 단계에서 BS는 N 개의 time slot에 대하여 신호를 송수신하며 time slot duration은 T 이다. 매 time slot마다 BS는 Q 개의 codebook beam을 송수신하고 각 빔은 OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) 신호로 변조되었으며 l -th OFDM subcarrier는 $l=0,1,\dots,L-1$ 에 대하여 $f_l = f_0 + l\Delta f$ 의 주파수를 가진다. 여기서 f_0 와 Δf 는 각각 carrier frequency, subcarrier spacing이다. n -th time slot, q -th beam, l -th subcarrier 송신 신호 $\mathbf{x}_{n,q,l}$ 은 식 (1)과 같다.

$$\mathbf{x}_{n,q,l} = \mathbf{w}_q s_{n,q,l} = \sqrt{P_T/M} \mathbf{a}(\phi_q) s_{n,q,l} \quad (1)$$

여기서 \mathbf{w}_q 는 센싱 스캐닝 각도 θ_q 에 대한 빔포밍 벡터, $s_{n,q,l}$ 은 OFDM data symbol이고 P_T 는 BS의 송신 전력이다. $\mathbf{a}(\theta)$ 는 각도 θ 에 대한 조향벡터이며 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{a}(\theta) = [1, e^{j2\pi \sin\theta}, \dots, e^{j2\pi(M-1)\sin\theta}]^T \in \mathbb{C}^{M \times 1}. \quad (2)$$

송신 신호 $\mathbf{x}_{n,q,l}$ 은 이동체와 클러터에 반사되어 그림 1과 같이 송신 빔과 동일한 빔으로 수신되며, 이에 대한 echo 신호는 다음과 같다.

$$\mathbf{y}_{n,q,l} = \mathbf{w}_q^H \mathbf{H}_{n,l} \mathbf{x}_{n,q,l} + n_{n,q,l} \quad (3)$$

여기서 $n_{n,q,l}$ 은 additive white Gaussian noise이고 $\mathbf{H}_{n,l}$ 은 round-trip 채널이며, 다음과 같이 표현된다.

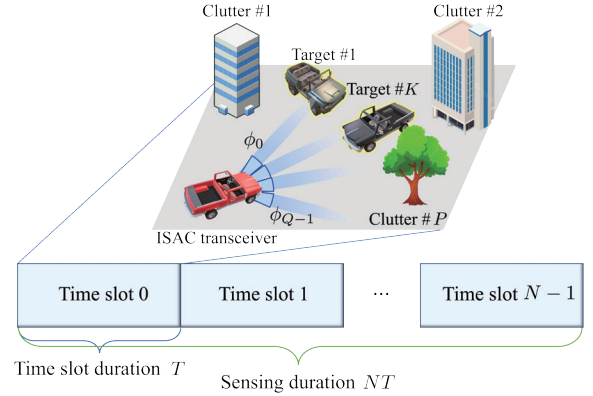


그림 1 Mobile ISAC 시스템에서 고정 클러터 및 이동체 센싱 시나리오

$$\mathbf{H}_{n,l} = \sum_{k=1}^K \mathbf{H}_{k,n,l} + \sum_{p=1}^P \mathbf{H}'_{p,n,l} \quad (4)$$

여기서 이동체 round-trip 채널 $\mathbf{H}_{k,n,l}$ 및 클러터 round-trip 채널 $\mathbf{H}'_{p,n,l}$ 은 각각 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{H}_{k,n,l} = \alpha_k e^{j2\pi f_{D,k} n T} e^{-j2\pi f_l 2r_k/c} \mathbf{a}(\theta_k) \mathbf{a}^H(\theta_k), \quad (5)$$

$$\mathbf{H}'_{p,n,l} = \beta_p e^{j2\pi f_{D,p} n T} e^{-j2\pi f_l 2r_p/c} \mathbf{a}(\theta_p) \mathbf{a}^H(\theta_p), \quad (6)$$

여기서 (r_k, θ_k) 는 k -th 이동체 위치이며 (r_p, θ_p) 은 p -th 클러터 위치이다. α_k 와 β_p 는 각각 이동체와 클러터의 channel fading factor이고 $f_{D,k}$ 와 $f_{D,p}$ 는 relative Doppler shift이며 다음과 같이 표현된다.

$$f_{D,k} = 2\langle (\mathbf{v}_R - \mathbf{v}_k), \mathbf{k}(\theta_k) \rangle / c, \quad (7)$$

$$f_{D,p} = 2\langle (\mathbf{v}_R - \mathbf{v}_p), \mathbf{k}(\theta_p) \rangle / c,$$

여기서 v_k 의 radial velocity로 이동하는 c 는 빛의 속도이다. 최종적으로 echo 신호 $\mathbf{y}_{n,q,l}$ 을 (n,q,l) -th 원소로 하는 echo tensor $\mathbf{Y}_{\text{cube}}[n,q,l] = \mathbf{y}_{n,q,l} \in \mathbb{C}^{N \times Q \times L}$ 을 저장한다.

III. STAP 기반 클러터 억제 및 이동체 센싱 알고리즘

제안 알고리즘은 OFDM 기반 echo tensor로부터 각도, radial velocity, range 정보를 추출하기 위하여 전처리 과정을 거친다. Echo tensor \mathbf{Y}_{cube} 에 대하여 2D-DFT를 수행하여 time slot domain은 radial velocity domain으로, OFDM subcarrier domain은 range domain으로 변환한다. Echo tensor로부터 변환된 radar-like data cube는 다음과 같다.

$$\tilde{\mathbf{Y}}_{\text{cube}}[n, i, j] = \mathbf{s}_{A,i}^T \mathbf{Y}_{\text{cube}}[n, :, :] \mathbf{s}_{R,j}, \quad (8)$$

여기서 $\mathbf{s}_{A,i} \in \mathbb{C}^{Q \times 1}$ 는 virtual antenna element에 대한 DFT vector이고 $\mathbf{s}_{R,j} \in \mathbb{C}^{L \times 1}$ 는 range에 대한 DFT vector이며, 각각 다음과 같다.

$$\mathbf{s}_{A,i} = [1, e^{-i\pi \sin \tilde{\phi}_i}, \dots, e^{-i\pi(Q-1)\sin \tilde{\phi}_i}]^T, \quad (9)$$

$$\mathbf{s}_{R,j} = [1, e^{-i4\pi \tilde{r}_j \Delta f / c}, \dots, e^{-i4\pi \tilde{r}_j \Delta f (L-1)/c}]^T, \quad (10)$$

여기서 $\tilde{\phi}_i$ 는 $i = 1, 2, \dots, G_m$ 에 대한 radial velocity bin이고 \tilde{r}_j 는 $j = 1, 2, \dots, G_r$ 에 대한 range bin이다. G_m 과 G_r 은 각각 virtual antenna element 수 및 range bin 수이다.

j 번째 range에서 이동체 탐지를 위한 scalar output은 다음과 같다.

$$z_j = |\mathbf{w}_j^H \mathbf{y}_j| \quad (11)$$

여기서 $\mathbf{y}_j = \text{vec}(\tilde{\mathbf{Y}}_{\text{cube}}[:, :, j]) \in \mathbb{C}^{NG_m \times 1}$ 은 space-time snapshot이고 \mathbf{w}_j 는 j 번째 range에서의 weight vector이며, 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{w}_j = \mathbf{R}_j^{-1} \mathbf{v}(\nu, \theta), \quad (12)$$

여기서 \mathbf{R}_j 는 클러터 공분산 행렬이고 $\mathbf{v}(\nu, \theta)$ 는 space-time 조향 벡터이며, 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{v}(\nu, \theta) = \mathbf{a}(\nu) \otimes \mathbf{b}(\phi) \quad (13)$$

여기서 $\mathbf{a}(\nu)$ 는 temporal steering vector이고 $\mathbf{b}(\phi)$ 는 spatial steering vector이며, 각각 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{a}(\nu) = [1, e^{-i2\pi \nu T / \lambda}, \dots, e^{-i2\pi(N-1)\nu T / \lambda}] \in \mathbb{C}^{N \times 1}, \quad (14)$$

$$\mathbf{b}(\phi) = [1, e^{i\pi \sin \phi}, \dots, e^{i\pi(G_m-1)\sin \phi}] \in \mathbb{C}^{G_m \times 1}. \quad (15)$$

최종적으로 클러터를 억제한 후, 스펙트럼의 피크값 탐색을 통하여 이동체의 각도 및 radial velocity를 추정한다.

IV. 시뮬레이션 시나리오 및 결과

제안 알고리즘 성능 분석을 위하여 표 1과 같이 시뮬레이션 환경을 설정하였다. 2개의 이동체를 설정하였으며, 이동체 1은 (116 m, 44°)에 위치하고 $v_k = 31.77$ m/s의 radial velocity를 가지며, 이동체 2는 (119 m, 2°)에 위치하고 $v_k = 18.60$ m/s의 radial velocity를 가진다. 또한, 200개의 클러터를 무작위 위치로 설정하였다.

그림 2는 이동체 1의 range에서의 파워 스펙트럼 결과이다. 그림 2(a)는 원시 echo 신호에 대하여 2D-DFT를 수행한 radar-like data cube의 파워 스펙트럼이며 클러터와 이동체가 공존하므로 이동체 탐지가 어렵다. 이때, ISAC 송수신기 이동성에 의하여 클러터는 0이 아닌 Doppler shift를 가지므로 기존 주파수 필터링 기반 클러터 억제 알고리즘 성능이 저하된다. 그림 2(b)는 제안하는 STAP 기반 클러터 억제 알고리즘을 적용한 파워 스펙트럼이다. 제안 알고리즘 적용 후에는 클러터가 억제되어 이동체 탐지가 가능한 것을 확인할 수 있다. 그림 3은

표 1. 시뮬레이션 매개변수

매개변수	값
Carrier frequency f_0	24 [GHz]
안테나 원소 수 M	64
Time slot 수 N	64
Beam 수 Q	121
OFDM subcarrier 수 L	128
Subcarrier spacing Δf	720 [kHz]
센싱 스캐닝 각도	(-60, 60)°
센싱 스캐닝 각도 간격	1°
Radial velocity bin 수 G_v	101

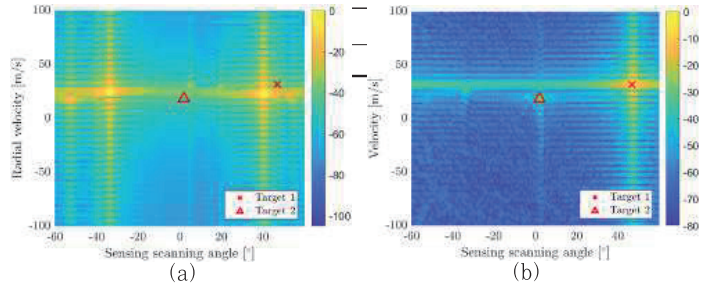


그림 2 이동체 1 range에서의 파워 스펙트럼 비교 (a) Radar-like data cube (b) 제안 알고리즘 적용

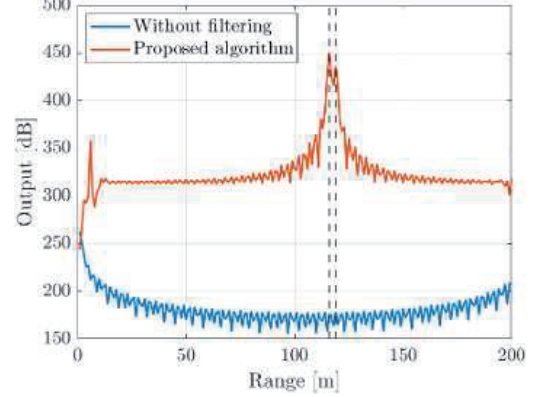


그림 3 스펙트럼 파워 측정을 통한 range 추정 결과

클러터 억제 전 radar-like data cube의 스펙트럼 파워와 클러터 억제 후 스펙트럼 파워를 range에 대하여 비교한 결과이다. 제안 알고리즘 적용 후, 클러터가 성공적으로 억제되어 2 개의 이동체 range에서 피크값이 나타나 range 추정 정확도가 향상됨을 확인하였다.

V. 결론

본 논문에서는 mobile ISAC 시스템을 위하여 클러터를 억제하고 이동체들의 각도, radial velocity 및 range를 추정하는 알고리즘을 제안하고 클러터 센싱 성능 분석을 진행하였다. 제안 알고리즘은 echo 신호에 대해 2D-DFT를 수행하여 OFDM 기반 echo tensor를 radar-like data cube로 변환하고 STAP 알고리즘을 적용하여 클러터를 억제하였다. 시뮬레이션 결과, radar-like data cube의 파워 스펙트럼은 이동체와 클러터가 공존하여 이동체의 매개변수 추정이 어렵지만 제안 알고리즘 적용 후에는 클러터를 억제하여 이동체의 각도, radial velocity 및 range 추정 정확도가 향상됨을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. RS-2024-00397216, (총괄1-세부1) Upper-mid Band Extreme massive MIMO(E-MIMO) 시스템 기술 개발)

참고 문헌

- [1] F. Liu et al., "Integrated Sensing and Communications: Toward Dual-Functional Wireless Networks for 6G and Beyond," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, Jun. 2022.
- [2] H. Luo, Y. Wang, D. Luo, J. Zhao, H. Wu, S. Ma, and F. Gao, "Integrated sensing and communications in clutter environment," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, 2024.
- [3] Y. Geng, "A search space-based clutter mitigation algorithm for ISAC systems," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. W.*, 2024.