

다중입출력 통합 센싱 및 통신 시스템에서의 탐욕적 빔 선택

신수빈, 박정훈*
연세대학교, *연세대학교

sbshin@yonsei.ac.kr, *jhpark@yonsei.ac.kr

Greedy Beam Selection for MIMO-ISAC Systems

Shin Su Bin, Park Jeong Hun*
Yonsei Univ., *Yonsei Univ.

요약

통합 센싱 및 통신(ISAC) 시스템에서 안테나(또는 빔) 선택은 특히 대규모 다중입출력(MIMO) 환경에서 하드웨어 비용, 전력 소모, 계산 복잡도를 줄이는 데 중요한 역할을 한다. 하지만, 통신과 센싱 간의 성능 지표 차이—즉, 상호 정보량(Mutual Information, MI)과 빔 패턴 평균 제곱 오차(Mean Squared Error, MSE) 또는 크레이머-라오 하한(Cramér-Rao Lower Bound, CRLB)—로 인해 효과적인 빔 선택 전략을 설계하는 것은 어렵다. 이를 해결하기 위해, 우리는 통신과 센싱 양쪽에 적용 가능한 통합 MI 기반 성능 지표를 최대화하는 저복잡도 그리디 빔 선택 프레임워크를 제안한다. 전체 MI를 빔별 기여도로 분해함으로써, 가장 기여도가 낮은 빔을 반복적으로 제거하는 Greedy Cofactor-based Selection(GCS) 알고리즘을 도입한다. 시뮬레이션 결과, GCS는 전체 탐색 대비 현저히 낮은 복잡도로 거의 최적에 가까운 성능을 달성하며, 빔스페이스 MIMO-ISAC 시스템에서의 실용적인 유효성을 입증한다.

I. 서론

ISAC 기술은 무선 통신과 센싱 기능을 동일한 자원과 인프라를 통해 동시에 지원한다 [1-3]. MIMO ISAC 시스템의 맥락에서, 핵심 문제 중 하나는 안테나 선택(또는 빔 선택)으로, 이는 계산적으로 효율적인 방식으로 최적의 안테나(또는 빔) 부분 집합을 식별하는 것을 목표로 한다(이 논문 전반에서 일반성을 위해 “빔 선택”이라는 용어를 사용한다.). 효과적인 빔 선택은 RF 체인의 수를 최소화하여 시스템 복잡도, 전력 소비, 하드웨어 비용을 크게 줄일 수 있으며, 이로 인해 MIMO ISAC 시스템의 실제 환경에서의 확장성과 실용성이 향상된다. 본 논문에서는 빔스페이스 MIMO ISAC 시스템을 위한 탐욕적(greedy) 빔 선택 방법을 개발한다. 해석의 용이성을 위해 통신과 센싱 모두에 대해 통합된 상호 정보량(MI)을 사용한다 [4]. 이를 바탕으로, 전체 MI에 대한 각 빔의 개별 기여도를 식별하는 새로운 분해 기법을 제안한다. 이 분해 기법을 활용하여, 빔을 하나씩 순차적으로 선택하는 탐욕적 알고리즘을 제안한다. 본 접근법은 전체 탐색 방식에 비해 계산 복잡도를 크게 줄이면서도 거의 최적에 가까운 성능을 달성한다.

II. 본론

본 연구는 송신기와 센싱 수신기가 분리된 bistatic MIMO-ISAC 시스템을 고려한다. 송신기는 N_t 개의 안테나와 빔 공간을 균등하게 나누는 아날로그 빔포머와 연결된 M 개의 RF 체인을 가진다. 각 빔포머는 아래와 같이 정리된다.

$$\mathbf{u}_m = \sqrt{\frac{1}{N_t}} \left[1, e^{-j\pi \frac{N_t(m-1)}{M}}, \dots, e^{-j\pi (N_t-1) \frac{(m-1)}{M}} \right]^T$$

이에 따라, 아날로그 빔포밍 행렬은 $\mathbf{U} = [\mathbf{u}_1, \dots, \mathbf{u}_M]$ 로 표현된다.

선택된 빔 집합을 $\mathcal{M} = \{m_1, \dots, m_K\}$ 라 할 때, 선택 행렬은 다음과 같다:

$$\mathbf{S}(\mathcal{M}) = [\mathbf{e}_{m_1}, \dots, \mathbf{e}_{m_K}]$$

여기서 \mathbf{e}_n 은 n 번째 요소가 1 이고 나머지 요소는 0 인 표준 기저 벡터이다.

통신 채널을 \mathbf{H}_c , 타겟 응답을 \mathbf{H}_s 로 표기하면 통신 및 센싱 수신 신호는

$$\mathbf{Y}_c = \mathbf{H}_c \mathbf{U} \mathbf{S}(\mathcal{M}) \mathbf{S}^T(\mathcal{M}) \mathbf{X} + \mathbf{Z}_c$$

$$\mathbf{Y}_s^H = \mathbf{X}^H \mathbf{S}(\mathcal{M}) \mathbf{S}^T(\mathcal{M}) \mathbf{U}^H \mathbf{H}_s + \mathbf{Z}_s^H$$

로 표현된다. 이 때, 선택 행렬과 아날로그 빔포밍의 영향을 고려한 유효 채널과 타겟 응답을 아래와 같이 정의할 수 있다:

$$\tilde{\mathbf{H}}_c = \mathbf{H}_c \mathbf{U} \mathbf{S}(\mathcal{M}) \mathbf{S}^T(\mathcal{M})$$

$$\tilde{\mathbf{H}}_s^H = \mathbf{S}(\mathcal{M}) \mathbf{S}^T(\mathcal{M}) \mathbf{U}^H \mathbf{H}_s$$

[5]에서와 같은 방법으로, $\tilde{\mathbf{H}}_s^H$ 의 각 열의 공분산 행렬을 \mathbf{R} 라고 표기했을 때, 유효 채널과 타겟 응답을 바탕으로 도출한 통신과 센싱 MI는

$$I_c(\mathcal{M}) = T \log_2 |\mathbf{I}_K + \gamma \tilde{\mathbf{H}}_c^H(\mathcal{M}) \tilde{\mathbf{H}}_c(\mathcal{M})|$$

$$I_s(\mathcal{M}) = N_s \log_2 |\mathbf{I}_K + \gamma \mathbf{R} \tilde{\mathbf{R}}(\mathcal{M})|$$

이며 γ 는 평균 SNR, $\tilde{\mathbf{R}} = \mathbf{U}^H \mathbf{R} \mathbf{U}$ 이다. 이에 따라 본 연구의 목표인 정규화된 MI의 가중 합을 최대화하는 문제를 아래와 같이 수식화된다:

$$\max_{\mathcal{M}} \quad \omega_c \frac{1}{T} I_c(\mathcal{M}) + \omega_s \frac{1}{N_s} I_s(\mathcal{M}) \quad \text{s.t. } |\mathcal{M}| = K$$

불행하게도 해당 문제는 모든 가능한 조합을 계산하기에 M 이 커질수록 계산 복잡도가 극도로 증가한다. 이를 해결하기 위해 아래의 Theorem 과 Corollary 를 소개한다.

Theorem

빔 인덱스 j 가 빔 집합 \mathcal{M} 에 포함되어 있다고 하자.이 때, 통신 MI와 센싱 MI는 다음과 같이 분해된다:

$$I_c(\mathcal{M} \cap \{j\}^c) = I_c(\mathcal{M}) - T \log_2(\delta_j^{-1})$$

$$I_s(\mathcal{M} \cap \{j\}^c) = I_s(\mathcal{M}) - N_s \log_2(\epsilon_j^{-1})$$

여기서,

$$\begin{aligned} \delta_j &= [\mathbf{D}^{-1}(\mathcal{M})]_{j,j} \\ \mathbf{D}(\mathcal{M}) &= \mathbf{I}_{|\mathcal{M}|} + \gamma \tilde{\mathbf{H}}_c^H(\mathcal{M}) \tilde{\mathbf{H}}_c(\mathcal{M}) \\ \epsilon_j &= [\mathbf{E}^{-1}(\mathcal{M})]_{j,j} \\ \mathbf{E}(\mathcal{M}) &= \mathbf{I}_{|\mathcal{M}|} + \gamma \tilde{\mathbf{R}}_T(\mathcal{M}) \end{aligned}$$

이다.

δ_j 와 ϵ_j 를 계산하려면 역행렬을 구해야하며, 역행렬 계산은 높은 복잡도를 가진다. 이를 피하기 위해, Schur 보완을 기반으로 다음과 같은 갱신식을 사용한다.

Corollary

i 번째 반복에서 제거된 빔 인덱스를 $J^{(i)}$ 라고 하면 다음과 같은 갱신식이 성립한다.

$$\begin{aligned} \mathbf{D}^{-(i+1)} &= \tilde{\mathbf{D}}_{11}^{-(i)} - \frac{\tilde{\mathbf{D}}_{12}^{-(i)} \tilde{\mathbf{D}}_{21}^{-(i)}}{\tilde{\mathbf{D}}_{22}^{-(i)}} \\ \mathbf{E}^{-(i+1)} &= \tilde{\mathbf{E}}_{11}^{-(i)} - \frac{\tilde{\mathbf{E}}_{12}^{-(i)} \tilde{\mathbf{E}}_{21}^{-(i)}}{\tilde{\mathbf{E}}_{22}^{-(i)}} \end{aligned}$$

여기서,

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{D}}^{-(i)} &= \mathbf{P}^{(i)} \mathbf{D}^{-(i)} \mathbf{P}^{(i)T} = \begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{D}}_{11}^{-(i)} & \tilde{\mathbf{D}}_{12}^{-(i)} \\ \tilde{\mathbf{D}}_{21}^{-(i)} & \tilde{\mathbf{D}}_{22}^{-(i)} \end{pmatrix} \\ \tilde{\mathbf{E}}^{-(i)} &= \mathbf{P}^{(i)} \mathbf{E}^{-(i)} \mathbf{P}^{(i)T} = \begin{pmatrix} \tilde{\mathbf{E}}_{11}^{-(i)} & \tilde{\mathbf{E}}_{12}^{-(i)} \\ \tilde{\mathbf{E}}_{21}^{-(i)} & \tilde{\mathbf{E}}_{22}^{-(i)} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

순열 행렬은 다음과 같이 정의된다.

$$[\mathbf{P}^{(i)}]_{k,:} = \begin{cases} \mathbf{e}_k^T & \text{if } 1 \leq k < J^{(i)} \\ \mathbf{e}_{k+1}^T & \text{if } J^{(i)} \leq k < |\mathcal{M}^{(i)}| \\ \mathbf{e}_{J^{(i)}}^T & \text{if } k = |\mathcal{M}^{(i)}| \end{cases}$$

위의 Theorem 과 Corollary 를 이용해 개별 빔 기여도를 비교하는 방식으로 greedy cofactor selection (GCS) 기법을 제안한다. 이로써 직접적인 역행렬 계산 없이 효율적인 탐욕적 빔 선택이 가능해진다. 시뮬레이션은 $N_t = 128$, $M = 16$, $\omega_c = \omega_s = 0.5$ 의 조건에서 수행되었고, 선택한 RF 체인의 수와 통신 수신기와 센싱 안테나의 수는 8로 동일하다. 제안된 GCS 알고리즘은 무작위 선택(Random), 고정 선택(Fixed), 전역 조사(Exh), 전체 빔 사용(Full)과 비교되었다. 그림 1에서 볼 수 있듯이, GCS는 Exh에 거의 근접한 성능을 보이며, Random이나 Fixed 방법보다 우수하고 Full과도 성능 차이가 거의 없음을 확인할 수 있다.

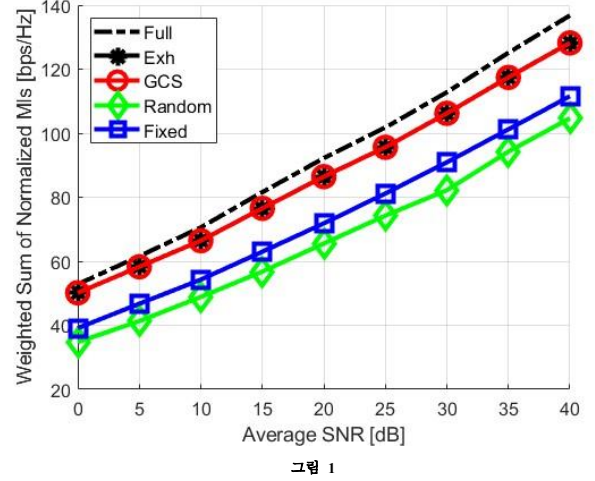


그림 1

III. 결론

본 논문은 MIMO 기반 ISAC 시스템에서 통신 및 센싱의 성능을 함께 고려하는 빔 선택 문제를 해결하기 위해 MI를 통합 성능 지표로 제안하고, 이를 최대화하는 탐욕적 알고리즘을 설계하였다. 제안된 알고리즘은 Schur 보완을 이용해 각 빔의 기여도를 계산함으로써 계산량을 줄이면서도 준최적의 성능을 유지하였다. 시뮬레이션 결과, 본 방법은 기존 방식들보다 효율성뿐만 아니라, 뛰어난 성능을 보이며 실시간 대규모 ISAC 시스템에 적합함을 입증하였다.

ACKNOWLEDGMENT

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

참고 문헌

- [1] E. Choi, "Beamforming Optimization for Integrated Sensing and Communication Systems with SCNR Consideration," *2024 22nd International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOpt)*, 2024, pp. 146-153.
- [2] N. Kim, "Integrated Sensing and Communications in FDD MIMO Without CSI Feedback: Towards FDD MIMO ISAC," *2024 22nd International Symposium on Modeling and Optimization in Mobile, Ad Hoc, and Wireless Networks (WiOpt)*, 2024, pp. 132-137.
- [3] J. Choi, "Joint and robust beamforming framework for integrated sensing and communication systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 23, no. 11, pp. 17 602-17 618, 2024.
- [4] C. Ouyang, "Integrated sensing and communications: A mutual information-based framework," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 61, no. 5, pp. 26-32, 2023.
- [5] S. Wang, "Unified ISAC Pareto boundary based on mutual information and minimum mean-square error estimation," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 72, no. 11, pp. 6783-6795, 2024.