

ISAC 시스템을 위한 fisher information 기반 국소 상호 정보량 (F-LMI) 지표 제안

김현욱, 박정훈*

연세대학교, *연세대학교

garksil1@yonsei.ac.kr, *jhpark@yonsei.ac.kr

Integrated Sensing and Communications: A Fisher-based Local Mutual Information Approach

Kim Hyeon Uk, Park Jeong Hun*

Yonsei Univ., *Yonsei Univ.

요약

본 논문은 통합 센싱 및 통신(ISAC) 시스템에서 통신과 센싱 성능을 동일한 정보 단위(bit)로 정렬하여 공동 최적화를 가능하게 하는 Fisher 정보 기반 국소 상호정보량(F-LMI) 지표를 제안한다. 기존 센싱 지표인 CRLB는 통신 지표인 상호정보량(MI)과 단위 및 차원이 상이하여 가중치 기반 공동 최적화에서 해석 및 튜닝이 비직관적이었다. 또한 표준 센싱 상호정보량(SMI)은 채널(표적 응답) 전체의 정보량을 측정하므로 관심 물리 파라미터(예: 방향각) 추정 성능을 직접 대변하지 못할 수 있다. 본 논문은 (i) 표적 응답의 사전 평균 주변 국소 선형화, (ii) 복소 관측-실수 파라미터로 인해 발생하는 비원형(improper) 통계의 실수값 동형(isomorphism) 처리를 통해, F-LMI의 폐형식 표현을 유도한다. 더 나아가 F-LMI가 Fisher 정보 및 Bayesian CRLB(BCRB)와 직접 등가 관계를 만족함을 보임으로써, 센싱 불확실성 감소량을 bit 단위로 해석할 수 있음을 제시한다.

I. 서론

ISAC은 하나의 파형/하드웨어로 통신과 센싱을 동시에 수행하는 기술로서 6G 핵심 요소로 주목받고 있다. 가우시안 채널에서의 ISAC 근본 트레이드오프는 문헌 [1]에서 분석되었고, MI 기반 MIMO-ISAC 빔포밍 설계 프레임워크는 [2]에서 제시된 바 있다. 그러나 실질적인 시스템 설계에서는 통신은 MI(또는 rate), 센싱은 CRLB와 같은 분산 기반 지표를 사용함에 따라 차원 불일치가 발생하여, 단일 목적함수로의 통합 시 가중치 선택이 임의적이 되기 쉽다. 이러한 배경에서 본 논문은 정보이론과 추정이론의 연결(예: 가우시안 채널에서의 MI-추정 오차 관계 [3])이라는 큰 흐름 위에서, 센싱을 bit 단위로 정량화 하면서도 파라미터 추정 정확도와 직접 연결되는 새로운 센싱 지표 F-LMI를 제안한다.

II. 본론

1. 시스템 모델

N_T 개의 안테나를 갖춘 기지국이 K 명의 사용자에게 신호를 전송함과 동시에 M 개의 타겟을 탐지하는 MU-MIMO ISAC 시스템을 고려한다. 송신 신호 X 는 다음과 같이 구성된다.

$$X = W_c S_c + W_s S_s$$

여기서 W_c, W_s 는 각각 통신 및 센싱 프리코더이며, S_c, S_s 는 독립적인 가우시안 심볼 행렬이다. 센싱 수신기는 표적 반사 에코를 관측하며, 표적 응답은

$$Y_R = \sum_{m=1}^M A(\theta_m)X + Z_R, A(\theta_m) = \alpha_m b(\theta_m) a^H(\theta_m)$$

로 모델링한다. 본 논문은 반사계수 α_m 는 알려져 있다고 두고(또는 사전 추정), 방향각 θ_m 추정에 집중한다.

2. 기존 센싱 지표의 한계

CRLB: CRLB 기반 지표는 추정 오차 하한을 제공하지만, 일반적으로 타겟의 실제 각도 θ 에 직접 의존하여(즉, 추정해야 할 값이 지표 계산에 등장) 최적화 루프에서 반복적 plug-in이 필요해질 수 있다. 또한 rate(bits/s/Hz)와 단위가 달라 가중치 기반 통합 목적함수에서 튜닝이 비직관적이다 [1], [2].

Sensing MI (SMI): SMI는 정보이론적 장점을 가지며 MI와 같은 “bit” 단위로 센싱을 표현할 수 있다 [2]. 다만 표준 SMI는 보통 관측과 채널(표적 응답) 전체의 정보량을 측정하므로, 우리가 궁극적으로 관심 있는 물리 파라미터(예: θ 에 대한 정보량과는 데이터 처리 부등식 관점에서 상계가 될 수 있으며, 다중 표적 상황에서 표적별 분해능을 직접 반영하지 못할 수 있다 [2].

3. 피서 정보 기반 국소 상호 정보량 (F-LMI)

본 논문은 사전 평균 μ_θ 근방에서 표적 응답을 1차 테일러 전개로 국소 선형화하고, 펄스 압축 통계량을 기반으로 센싱을 단순화한다. 또한 복소 관측 + 실수 파라미터로 인해 주변 분포가 비원형(improper)이 되는 점을 고려하여, 관측을 실수값 벡터로 변환하는 동형(isomorphism)을 적용함으로써 상호 정보량을 보존하면서도 폐형식 계산이 가능한 형태로 만든다. 단일표적 $M=1$ 에서 펄스 압축된 통계량을 y_{rc} 라 하면,

$$y_{rc} \approx A(\theta)w_s + z_{rc} \quad z_{rc} \sim \mathcal{CN}(0, L\sigma_z^2 I)$$

로 근사할 수 있고, 국소 선형화 및 실수값 동형성 처리를 통해 다음의 F-LMI 를 얻는다:

$$I_{F-LMI}^c(\theta) = \frac{1}{2} \log_2(1 + \frac{2L\sigma_\theta^2}{\sigma_z^2} w_s^H \dot{A}^H(\mu_\theta) \dot{A}(\mu_\theta) w_s)$$

이 지표는 다음과 같은 핵심적인 등가 관계를 만족한다 (Proposition 1, 2).

$$1. \text{ 피서 정보와의 관계: } I_{F-LMI}^c(\theta) = \frac{1}{2} \log_2(1 + \sigma_\theta^2 J(\theta))$$

$$2. \text{ BCRB 와의 관계: } I_{F-LMI}^c(\theta) = \frac{1}{2} \log_2(\frac{\sigma_\theta^2}{BCRB})$$

즉 F-LMI 는 사전 분산 σ_θ^2 대비 사후 불확실성(베이지안 하한 $BCRB(\theta)$)의 감소를 정보 이득(bit)으로 정량화한다. 이는 “MI-추정”의 연결이라는 큰 관점[3]을 파라미터 추정 문제에 맞게 구체화한 결과로 해석할 수 있다.

F-LMI 의 장점은 센싱을 bit 단위로 표현할 뿐 아니라, 프리코더에 대한 구조가 최적화 친화적이라는 점이다. 예를 들어, 통신 합율(또는 가중합율)과 센싱 F-LMI 를 결합한 공동 설계는 다음과 같이 정식화할 수 있다.

$$\max_{W_c, W_s} \sum_{k=1}^K R_k(W_c, W_s) + \lambda_s I_{F-LMI}^c(\theta) \quad s.t. \quad \text{tr}(W_c W_c^H + W_s W_s^H) \leq P_{tx}$$

여기서 $R_k(W_c, W_s)$ 는 사용자 k 의 SINR 기반 achievable rate(로그형 함수)이며, λ_s 는 통신-센싱 트레이드오프를 조절하는 가중치이다. 이 문제는 비선형, 비볼록 이지만, 다음 이유로 기존 최적화 프레임워크에 자연스럽게 결합된다.

- (1) 통신 rate 항은 WMMSE 변환을 통해 반복 최적화 형태로 풀 수 있고(통상적 MU-MIMO 설계 절차),
- (2) F-LMI 는

$$\frac{1}{2} \log_2(1 + \frac{2L\sigma_\theta^2}{\sigma_z^2} w_s^H \dot{A}^H(\mu_\theta) \dot{A}(\mu_\theta) w_s)$$

로 표현되므로, 보조변수(auxiliary variable)를 도입하는 분수 계획법(Fractional Programming, FP) 기반 변환을 적용하여(예: quadratic transform [4]) 행렬 역/결정식 결합을 완화한 반복 해법을 구성할 수 있다. 결과적으로 통신 프리코더와 센싱 프리코더를 번갈아 갱신하는 alternating optimization 이 가능하며, 센싱 성능은 BCRB 감소와 직접 연결된 bit 지표로 관리된다.

이와 같이 F-LMI 는 단지 단위 통일에 그치지 않고, 실제 설계 알고리즘(WMMSE/FP)로의 이식 가능성을 제공한다는 점에서 실용적 의미가 있다 [2], [4].

III. 결론

본 논문에서는 ISAC 시스템의 효율적인 설계를 위해 통신 성능과 차원적 통합이 가능한 F-LMI 지표를 제안하였다. 제안된 지표는 추정 이론의 핵심인 피서 정보 및 BCRB 와 직결되면서도 상호 정보량의 형식을 취하고 있어, WMMSE 나 FP 와 같은 기존 최적화 알고리즘에 적용하기 용이하다. 향후 연구에서는 다중 타겟 시나리오에서의 F-LMI 확장 및 프리코더 최적화 알고리즘 구현을 수행할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by Institute of Information & communications Technology Planning & Evaluation (IITP) under 6G Cloud Research and Education Open Hub(IITP-2025-RS-2024-00428780) grant funded by the Korea government(MSIT).

참 고 문 헌

- [1] Y. Xiong et al., “On the fundamental tradeoff of integrated sensing and communications under Gaussian channels,” IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 69, 2023.
- [2] J. Li et al., “A framework for mutual information-based MIMO integrated sensing and communication beamforming design,” IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 73, 2024.
- [3] D. Guo et al., “Mutual information and minimum mean-square error in Gaussian channels,” IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 51, 2005.
- [4] K. Shen and W. Yu, “Fractional programming for communication systems,” IEEE Trans. Signal Process., vol. 66, 2018.