

통합 중심의 빔포밍을 이용한 통합 센싱 및 통신

박석준, 최은성, 최진석, 박정훈*, 이남윤**
한국과학기술원, 연세대학교*, 고려대학교**

{sj.park, es.choi, jinseok}@kaist.ac.kr, jhpark@yonsei.ac.kr, namyoon@korea.ac.kr

Communication-oriented Beamforming for Integrated Sensing and Communications

Seokjun Park, Eunsung Choi, Jinseok Choi, Jeonghun Park*, Namyoon Lee**
KAIST, Yonsei University*, Korea University**

요약

본 논문은 다중 사용자, 다중 표적 통합 센싱 및 통신(ISAC) 시스템에서 요구되는 레이더 성능을 보장하면서 스펙트럼 효율(SE)을 최대화하기 위해, 통신 및 레이더 빔포밍을 위한 공동 프레임워크를 제안한다. 이를 위해 우리는 SE 최대화 문제에서 성능 제약 조건으로 레이더 송신 빔의 평균 제곱 오차(MSE)를 활용한다. 최적화 문제의 비볼록성 문제를 고유벡터 종속성을 가진 비선형 고유치 문제(NEPv)로 변환하여 해결하며, GPI 기법과 라그랑주 승수에 대한 이진 탐색을 번갈아 적용한다. 레이더 메트릭을 통합한 본 프레임워크는 시뮬레이션을 통해 검증되었으며, 높은 SE 성능과 낮은 복잡도를 보여준다.

I. 서론

차세대 무선 통신 네트워크는 높은 데이터 전송 속도, 다수 기기에 대한 향상된 연결성, 그리고 첨단 센싱 기능을 지원해야 한다 [1]. 이러한 발전에 힘입어, 센싱과 통신 시스템의 신호 처리 및 인프라를 결합하는 통합 센싱 및 통신(ISAC)이 미래 무선 네트워크의 핵심 기술로 주목받고 있다. ISAC는 레이더와 통신을 단일 플랫폼으로 통합함으로써 잠재적으로 비용을 절감하고, 스펙트럼 활용도를 개선하며, 레이더와 통신의 장점을 결합하여 성능을 향상시킬 수 있다. 이러한 이점을 고려하여, 우리는 다중 입력 다중 출력(MIMO) ISAC 시스템을 탐구하고 평균 제곱 오차(MSE) 레이더 성능을 만족시키면서 합 스펙트럼 효율(SE)을 최대화하는 유망한 빔포밍 설계 프레임워크를 소개한다. 시뮬레이션을 통해 제안된 알고리즘이 벤치마크보다 우수한 성능을 보이며, 레이더와 통신 성능에서 탁월한 균형과 높은 SE 성능을 보여준다.

II. 본론

본 논문에서는 우리는 기지국(BS)이 N 개의 송수신 안테나를 가진 단일 하드웨어 플랫폼에 ISAC 송신기와 레이더 수신기를 갖춘 MIMO-ISAC 시스템을 고려한다. BS(ISAC-BS)는 두 가지 고유한 기능을 수행한다: 1) K 개의 단일 안테나 통신 유저에게 서비스 제공, 2) 잠재적인 표적을 감지하기 위한 레이더 빔 형성. 두 기능은 동일한 시간-주파수 자원과 송신 안테나 배열을 동시에 공유한다. 우리는 BS의 송신 신호 $\mathbf{x} \in \mathbb{C}^N$ 를 다음과 같이 정의한다:

$$\mathbf{x} = \mathbf{F}_C \mathbf{s}_C + \mathbf{F}_R \mathbf{s}_R = [\mathbf{F}_C, \mathbf{F}_R] [\mathbf{s}_C^T, \mathbf{s}_R^T]^T = \mathbf{F} \mathbf{s},$$

여기서 $\mathbf{s}_R = [s_{R,1}, \dots, s_{R,K}]^T \in \mathbb{C}^M$ 은 레이더 파형 신호 벡터이고, $\mathbf{F}_R = [\mathbf{f}_{R,1}, \dots, \mathbf{f}_{R,M}] \in \mathbb{C}^{N \times M}$ 은 레이더 빔포밍 행렬, $\mathbf{s}_C = [s_{C,1}, \dots, s_{C,K}]^T \in \mathbb{C}^K$ 은 통신 메시지 신호 벡터, $\mathbf{F}_C = [\mathbf{f}_{C,1}, \dots, \mathbf{f}_{C,K}] \in \mathbb{C}^{N \times K}$ 은 통신 빔포밍 행렬이다. \mathbf{s}_R 과

\mathbf{s}_C 는 평균이 0이며, 서로 통계적으로 독립이라고 가정한다. 즉, $\mathbb{E}[\mathbf{s}_R \mathbf{s}_R^H] = P \cdot \mathbf{I}_M$, $\mathbb{E}[\mathbf{s}_C \mathbf{s}_C^H] = P \cdot \mathbf{I}_K$ 이며, P 는 $\|\mathbf{F}_R\|_F + \|\mathbf{F}_C\|_F \leq 1$ 을 만족하는 최대 전송 전력이다. 이러한 전송 신호 벡터를 통한 k 번째 유저의 SE는 다음과 같다.

$$R_k = \log_2 \left(1 + \frac{|\mathbf{h}_k^H \mathbf{f}_{C,k}|^2}{\sum_{i \neq k} |\mathbf{h}_k^H \mathbf{f}_{C,i}|^2 + \sum_{j=1}^M |\mathbf{h}_k^H \mathbf{f}_{C,j}|^2 + \sigma^2/P} \right).$$

이제 레이더 성능 지표를 레이더 송신 빔 패턴 MSE로 정의한다. ISAC-BS가 레이더 표적에 대한 가시거리(LoS) 경로를 가진 협대역 환경에서 작동한다는 가정 하에, 형성된 빔 패턴의 MSE는 다음과 같다.

$$\text{MSE}_R(\mathbf{F}) = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L |P \cdot d(\theta_l) - B(\mathbf{F}; \theta_l)|^2$$

여기서, L 은 샘플링된 각도 그리드의 수이며, $d(\theta)$ 는 방향 θ 에 대해 주어진 정규화된 원하는 송신 빔 마스크, $B(\mathbf{F}; \theta_l)$ 는 방향 θ 에 대한 레이더 빔 파워이다. 해당 성능 지표들을 토대로 우리는 통신 지향적인 ISAC 시스템에서 레이더 빔 패턴의 MSE를 보장하면서 SE의 합을 최대화하기 위한 최적화 문제는 다음과 같다.

$$\text{maximize}_{\mathbf{F}} \quad R_{\Sigma}(\mathbf{F}) = \sum_{k=1}^K R_k(\mathbf{F})$$

$$\text{subject to} \quad \text{Tr}(\mathbf{F} \mathbf{F}^H) \leq 1,$$

$$\text{MSE}_R(\mathbf{F}) \leq T_{\text{mse}}.$$

여기서 $\text{Tr}(\mathbf{F} \mathbf{F}^H) \leq 1$ 는 전력 제약, T_{mse} 는 MSE 임계값이다. 이제, 목적 함수를 다루기 쉬운 형태로 만들기

위해 $\bar{\mathbf{f}} = \text{vec}(\mathbf{F}) \in \mathbb{C}^{N \times (K+M)}$. 또한 전체 전력을 가정하여, $\|\bar{\mathbf{f}}\|^2 = 1$ 이다. 따라서 재구성된 유저 SE는 다음과 같다.

$$R_k(\bar{\mathbf{f}}) = \log_2 \left(\frac{\bar{\mathbf{f}}^H \mathbf{B}_k \bar{\mathbf{f}}}{\bar{\mathbf{f}}^H \mathbf{C}_k \bar{\mathbf{f}}} \right),$$

여기서 $\mathbf{B}_k = \mathbf{I}_{(N+M)} \otimes (\mathbf{h}_k \mathbf{h}_k^H) + \mathbf{I}_{(N+M)} \frac{\sigma^2}{P}$, $\mathbf{C}_k = \mathbf{B}_k - \text{diag}(\mathbf{e}_k^{(K+M)}) \otimes (\mathbf{h}_k \mathbf{h}_k^H)$ 이다. \otimes 는 크로네커곱, \mathbf{e}_n^N 은 n 번째 요소가 1인 $N \times 1$ 스탠다드 기저 벡터이다. 또한, 재구성된 MSE는 다음과 같다.

$$\text{MSE}_R(\mathbf{F}) = \frac{1}{L} \sum_{l=1}^L \|\bar{\mathbf{f}}^H \mathbf{D}(\theta_l) \bar{\mathbf{f}} - \bar{\mathbf{f}}^H \mathbf{A}(\theta_l) \bar{\mathbf{f}}\|^2,$$

여기서 $\mathbf{A}(\theta) = P \cdot \mathbf{I} \otimes \mathbf{a}_i(\theta) \otimes \mathbf{a}_i^H(\theta)$, $\mathbf{D}(\theta_l) = P \cdot d(\theta_l) \cdot \mathbf{I}_{(N+M)}$ 이다. 재구성된 $R_k(\bar{\mathbf{f}})$ 와 $\text{MSE}_R(\mathbf{F})$ 를 최적화 문제에 적용하면, 다룰 수 있는 non-convex 문제로 형성된다. 여기서 GPI 기법 [2]을 적용하여 최상의 국부 최적해를 찾는다. 따라서 목적 함수를 $\bar{\mathbf{f}}$ 에 대해 미분하여 first-order 최적화 조건을 구하면 다음과 같은 형태이다.

$$\Xi^{-1}(\bar{\mathbf{f}}) \Gamma(\bar{\mathbf{f}}) \bar{\mathbf{f}} = \lambda(\bar{\mathbf{f}}) \bar{\mathbf{f}}.$$

여기서 μ 는 MSE 제약의 라그랑주 승수이며,

$$\Gamma(\bar{\mathbf{f}}) = \lambda_{\text{num}}(\bar{\mathbf{f}}) \times \left[\sum_{k=1}^K \frac{\mathbf{B}_k}{\bar{\mathbf{f}}^H \mathbf{B}_k \bar{\mathbf{f}}} + \frac{2\mu \log 2}{LP^2} \sum_{l=1}^L \{(\bar{\mathbf{f}}^H \mathbf{D}(\theta_l) \bar{\mathbf{f}}) \mathbf{D}(\theta_l) + (\bar{\mathbf{f}}^H \mathbf{A}(\theta_l) \bar{\mathbf{f}}) \mathbf{A}(\theta_l)\}, \right]$$

$$\Xi(\bar{\mathbf{f}}) = \lambda_{\text{den}}(\bar{\mathbf{f}}) \times \left[\sum_{k=1}^K \frac{\mathbf{C}_k}{\bar{\mathbf{f}}^H \mathbf{C}_k \bar{\mathbf{f}}} + \frac{2\mu \log 2}{LP^2} \sum_{l=1}^L \{(\bar{\mathbf{f}}^H \mathbf{D}(\theta_l) \bar{\mathbf{f}}) \mathbf{D}(\theta_l) + (\bar{\mathbf{f}}^H \mathbf{A}(\theta_l) \bar{\mathbf{f}}) \mathbf{A}(\theta_l)\}, \right]$$

$$\lambda(\bar{\mathbf{f}}) = \prod_{k=1}^K \left(\frac{\bar{\mathbf{f}}^H \mathbf{B}_k \bar{\mathbf{f}}}{\bar{\mathbf{f}}^H \mathbf{C}_k \bar{\mathbf{f}}} \right) 2^{\mu \left(\frac{T_{\text{mse}}}{P^2} - \frac{1}{LP^2} \sum_{l=1}^L \|\bar{\mathbf{f}}^H \mathbf{D}(\theta_l) \bar{\mathbf{f}} - \bar{\mathbf{f}}^H \mathbf{A}(\theta_l) \bar{\mathbf{f}}\|^2 \right)}$$

$$= \frac{\lambda_{\text{num}}(\bar{\mathbf{f}})}{\lambda_{\text{den}}(\bar{\mathbf{f}})}.$$

이후, 다음과 같이 GPI를 통해 해당 조건을 만족하는 최적화 벡터 $\bar{\mathbf{f}}$ 를 찾을 수 있다.

$$\bar{\mathbf{f}}_{(t+1)} = \frac{\Xi^{-1}(\bar{\mathbf{f}}_{(t)}) \Gamma(\bar{\mathbf{f}}_{(t)}) \bar{\mathbf{f}}_{(t)}}{\|\Xi^{-1}(\bar{\mathbf{f}}_{(t)}) \Gamma(\bar{\mathbf{f}}_{(t)}) \bar{\mathbf{f}}_{(t)}\|}$$

주어진 라그랑주 승수 μ 에 대한 최적화 벡터 $\bar{\mathbf{f}}$ 를 계산하는 과정을 반복하여 μ 에 대한 이진 탐색을 진행하게 되면, 주어진 MSE 제약조건 T_{mse} 를 만족하는 ISAC 최적화 벡터 $\bar{\mathbf{f}}$ 를 얻을 수 있다.

시뮬레이션 환경은 6개의 안테나를 가진 ISAC-BS가 4명의 유저에게 신호를 전송하며, 6개의 표적이 존재하고, $T_{\text{mse}} = -7.5$ dB이다. 해당 세팅에서 제안된 알고리즘 GPI-ISAC-MSE와 다음 알고리즘들을 비교한다: (1) GPI-Comm ($\mu = 0$), (2) semidefinite relaxation (SDR)-Optimal, (3) SDR-Rank1, (4) RZF, (5) MRT. 여기서 (2)와 (3)은 SDR을 기반으로 한 알고리즘과 SDR을 기반으로 rank-1 근사된 알고리즘이다 [3].

그림 1에서, SNR에 대한 평균 합 SE를 도시하였다. SDR 기반 알고리즘(SDR-Optimal)은 제안된 GPI-

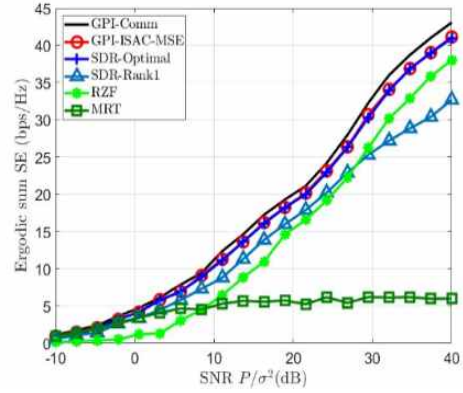


그림 1. 평균 합 SE 대 SNR

ISAC-MSE의 SE 성능과 일치하지만, 실질적으로 구현 가능하지 않다. 실현 가능한 빔포밍 솔루션을 얻기 위해서는 Rank-1 근사가 필수적이다. 그림 1은 또한 GPI-ISAC-MSE가 Rank-1 근사된 SDR 기반 알고리즘(SDR-Rank1)과 RZF보다 더 높은 SE를 달성함을 보여준다. 따라서, 제안된 GPI-ISAC-MSE 알고리즘은 SDR-Rank1 알고리즘보다 더 큰 통신 및 레이더 성능을 입증하며, 더 나은 솔루션이 될 수 있다.

III. 결론

본 논문에서는 ISAC 시스템을 위한 공동 빔포밍 프레임워크를 제안하였다. MSE 메트릭을 레이더 제약조건으로 사용하여, MSE 제약조건을 만족시키면서 합 SE를 최대화하는 통신 지향적인 문제를 공식화하였다. 이 문제를 해결하기 위해, 벡터화된 공동 빔포밍에 대한 수식으로 문제를 재구성한 후, KKT 정상 상태 조건을 도출하였다. 이 조건을 함수적 고유값 문제로 해석함으로써, 최적의 국부 최적해를 도출하기 위해 GPI 방법을 사용하였다. 시뮬레이션에서, 제안된 GPI-ISAC 알고리즘은 최신 ISAC 방법들과 비교하여 우수한 통신 및 레이더 성능을 입증하였다. 따라서, 제안된 ISAC 빔포밍 프레임워크는 저복잡도 및 높은 성능을 입증하였으며, 다양한 ISAC 환경에 쉽게 적용될 수 있어 높은 통신 및 레이더 효율을 제공할 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2024년도 정부(방위사업청)의 재원으로 국방기술진흥연구소의 지원을 받아 수행된 연구임 (KRIT-CT-22-078).

참고 문헌

- [1] W. Saad, M. Bennis, and M. Chen, "A vision of 6G wireless systems: Applications, trends, technologies, and open research problems", *IEEE Network*, vol. 34, no. 3, pp. 134-142, 2019.
- [2] J. Choi, N. Lee, S. Hong, and G. Caire, "Joint User Selection, Power Allocation, and Precoding Design with Imperfect CSIT for Multi-Cell MU-MIMO Downlink Systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 19, no. 1, pp. 162-176, Sep. 2020.
- [3] F. Liu, C. Masouros, A. Li, H. Sun, and L. Hanzo, "MU-MIMO communications with MIMO radar: From Co-existence to Joint Transmission", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 17, no. 4, pp. 2755-2770, 2018.