

시분할 셀프리 근접장 통합 센싱-통신에서의 불완전 채널 정보 기반 강인 빔포밍 설계 연구

손채담, 이시현*

한국과학기술원 전기및전자공학부

scd5929@kaist.ac.kr, *sihyeon@kaist.ac.kr

Robust Beamforming Design Considering Imperfect CSI for

Time-Division Cell-Free Near-Field ISAC.

Son Chae Dam, Lee Si-Hyeon*

School of Electrical Engineering, KAIST

요 약

본 논문은 셀프리 다중입출력 근거리장 통합 센싱-통신을 위한 시간분할 프레임워크를 제안하고, 불완전한 채널 상태 정보 아래에서 시간 분할 비율, 센싱 공분산, 강인한 하향링크 빔포밍을 공동 최적화한다. 비블록 문제는 준정정부호계획 기반 재정식화와 교대 최적화로 해결하며, 오류 무시 및 최대비 전송 기반 경량 기법도 제시한다. 시뮬레이션 결과, 제안 기법은 기준선 대비 위치 추정 정확도와 전송률을 개선하면서 안정적인 통신 성능을 유지한다.

I. 서 론

통합 센싱-통신은 공유 스펙트럼과 하드웨어에서 센싱과 데이터 전송을 통합함으로써 주파수 효율과 자원 활용도를 향상하는 6 세대 이동통신의 핵심 기술로 널리 인식된다. 대규모 배열 다중입출력 환경에서는 센싱을 통한 채널 정보 강화와 빔포밍 이득으로 인해 그 효과가 더 두드러진다 [1]. 또한 배열 개구와 반송파 주파수가 증가함에 따라 근거리장 효과가 지배적으로 나타나며, 조향 벡터의 위치 의존성을 활용해 직접적인 위치추정과 정밀한 간섭 제어가 가능해진다 [2].

기존 연구 [1-2]는 주로 모노스테틱 환경에 집중해 왔으나, 차단 및 왕복 전파로 인한 성능 저하에 취약하다. 반면 멀티스테틱 셀프리 구조는 공간 다이버시티와 견고성을 제공하지만, 다수 접속점의 협력 제어와 센싱-통신 트레이드오프 조정으로 인해 복잡도가 증가한다 [3]. 따라서 실용적 구현을 위해 시간 분할 운영을 통하여 이러한 복잡도를 획기적으로 줄이며 센싱 정보를 통신에 재활용할 수 있다. 이에 본 논문에서는 셀프리 다중입출력 환경에서 시간분할 기반 근거리장 통합 센싱-통신 프레임워크를 채택하고, 위치 정보가 내재된 조향 벡터를 활용하여 실용적인 계산 복잡도에서 정확한 위치 추정을 달성한다.

II. 본 론

그림 1 과 같이, 본 논문에서는 자기간섭 소거가 가능한 전이중 접속점 M 개와 단일 안테나 사용자 K 명으로 구성된 시간분할 기반 셀프리 근거리장 통합 센싱-통신 시스템을 고려하며, 모든 접속점은 이상적인 백홀을 통해 중앙처리장치에 연결된다. 짧은 시간 슬롯 T 동안 채널은 준정적이라고 가정한다 [1-3]. 슬롯 T 는 센싱 구간 $T_s = (1 - \eta)T$ 와 통신 구간 $T_c = \eta T$ 로 분할되며, $\eta \in (0, 1)$ 이다. 센싱 구간에서는 네트워크가 사용자 위치를 추정하고 채널을 추정하며, 통신 구간에서는 해당

추정치를 이용해 데이터를 전송하고 이 과정을 블록 단위로 반복한다. 이러한 통합 설계는 센싱과 채널 추정을 분리하여 수행하는 방식보다 높은 전송률을 제공하며, η 를 통해 센싱-통신 간 트레이드오프를 조절할 수 있다. 각 접속점은 $N_t = 2N + 1$ 개의 소자를 갖는 균일 선형 배열을 탑재하며, 배열과 사용자 모두 xy 평면에 위치한다고 가정한다.

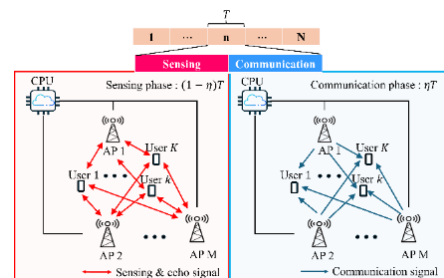


그림 1. 시스템 모델

근거리장과 원거리장의 경계는 레일리 거리 기준 $2D^2/\lambda$ 를 따르므로 주파수가 높아지고 배열 개구가 커질수록 근거리장 영역은 수백 미터 규모까지 확장된다. 따라서 본 논문에서는 모든 사용자가 모든 접속점의 근거리장에 위치한다고 가정한다 [3]. 이 구간에서는 큰 경로 손실로 인해 가시선 성분이 지배적이며 비가시선 성분은 무시할 수 있으므로, 가시선 채널 모델을 채택한다[1,3]. 이에 따라 접속점 m 에서 사용자 k 로의 채널은 다음과 같이 표현된다.

$$h_{m,k} = \beta_{m,k} \mathbf{a}_{m,k} (x_{m,k} y_{m,k}),$$

여기서 $\beta_{m,k}$, $\mathbf{a}_{m,k}$, $x_{m,k}$, $y_{m,k}$ 는 각각 경로 이득, 조향 벡터, 접속점 m 에서 사용자 k 로의 x 좌표 차이, y 좌표 차이를 의미한다. 근거리장 조향 벡터는 사용자 좌표에 의존하므로, 센싱 구간에서 사용자 위치가 추정되면 이후 데이터 전송을 위한 통신 채널을 직접 재구성할 수 있다.

다만 실제 환경에서 완전한 센싱을 달성하기는 어렵기 때문에, 채널 불확실성이 존재하는 경우를 고려한다.

$$\mathbf{h}_{m,k} = \hat{\mathbf{h}}_{m,k} + \Delta\mathbf{h}_{m,k}, \|\Delta\mathbf{h}_{m,k}\| \leq \epsilon_{m,k}(R_0, \eta).$$

이 채널 모델을 바탕으로 센싱에 대한 크래머-라오 하한과 사용자 전송률 식을 유도한다. 지면 관계상 상세한 유도 과정은 생략한다. 우리는 크래머-라오 하한과 전송률을 공동으로 최적화하는 최적화 문제를 아래와 같이 적을 수 있다.

$$\begin{aligned} & \max_{\psi_0, \mathbf{w}, \eta} \min_k \min_{\|\Delta\mathbf{h}_{m,k}\| \leq \epsilon_{m,k}(\psi_0, \eta)} R_k \\ & \text{s.t. } \text{CRLB}(\psi, \eta) \leq \text{CRLB}_{th}, \\ & \quad \sum_k \|\mathbf{w}_{m,k}\| \leq P_{\max}, \forall m \\ & \quad \text{Tr}(\psi_{0,m}) \leq P_{\max}^s, \forall m \\ & \quad \psi_{0,m} \geq 0, \forall m \\ & \quad 0 \leq \eta \leq 1 \end{aligned}$$

여기서 R_k 는 사용자 전송률을, ψ_0 은 센싱 공분산 행렬을 의미한다. 또한 $\mathbf{w}_{m,k}$ 와 \mathbf{w} 는 각각 접속점 m 에서 사용자 k 로의 강인한 빔포밍 벡터와 강인한 빔포밍 벡터들의 집합을 나타낸다. CRLB_{th} 는 크래머-라오 하한 임계값이며, P_{\max} 와 P_{\max}^s 는 각각 통신 최대 전력과 센싱 최대 전력을 의미한다.

우리는 원문제를 센싱 빔포밍 최적화 문제와 통신 빔포밍 최적화 문제의 두 하위 문제로 분해한다. 그러나 각 하위 문제 역시 비볼록이므로 직접적으로 해결하기 어렵다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 세 가지 수학적 도구인 준정정부호계획 완화, S -절차, 그리고 교대 최적화 프레임워크를 활용하여 효율적인 알고리즘을 설계한다.

다수의 안테나를 갖는 근거리장 시스템에서는 계산 복잡도가 주요 병목으로 작용하며, 제안 설계에서는 센싱 직후 빔포밍을 즉시 최적화해야 하므로 시간 제약이 특히 중요하다. 이러한 부담을 완화하기 위해 두 가지 준최적 기법을 제안한다. 첫째, 오류 무시 기법은 완전한 채널 상태 정보를 가정하여 η 와 \mathbf{w} 를 최적화한다. 둘째, 최대비 전송 기반 기법은 근거리장 채널의 점근적 직교성을 활용하여 최대비 전송을 통해 효율적인 전력 할당과 η 최적화를 수행한다.

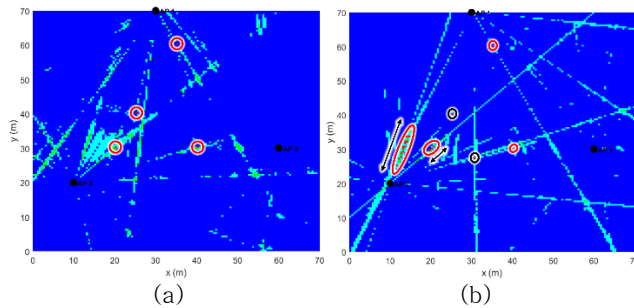


그림 2. MUSIC 알고리즘
(a): 근거리장, (b): 원거리장

현실적인 시스템 파라미터를 이용하여 제안 기법을 시뮬레이션하였다. 그림 2의 다중 신호 분류 기반 결과에서 근거리장(좌)은 사용자를 정확히 위치추정하는 반면, 원거리장(우)은 부엽에 의한 오차가 발생하여 근거리장 환경이 위치추정 및 채널 재구성에 유리함을 뒷받침한다.

그림 3은 센싱/통신 전력에 따른 전송률을 나타내며, 제안 기법이 전 구간에서 우수한 성능을 보이고 준최적

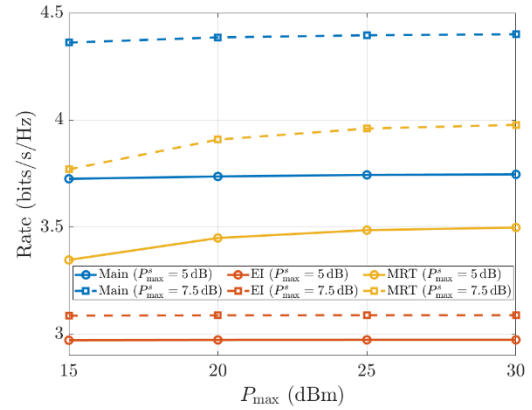


그림 3. 센싱 전력에 따른 최적 사용자 전송률 변화

기법들도 안정적으로 동작한다. 다만 오류 무시 기법은 완전한 채널 상태 정보를 가정하므로 센싱 전력이 큰 구간에서 성능이 저하된다. 그림 3은 센싱/통신 전력에 따른 전송률을 나타내며, 제안 기법이 전 구간에서 우수한 성능을 보이고 준최적 기법들도 안정적으로 동작한다.

III. 결론

논문에서는 셀프리 다중입출력 환경에서 시간분할 기반 근거리장 통합 센싱·통신 프레임워크를 제안하고, 위치추정 오차와 채널 추정 오차를 연계한 통합 정식화를 제시하였다. 시간 분할 비율, 센싱 공분산, 강인한 하향링크 빔포밍을 공동 최적화하며, 준정정부호계획 기반 재정식화와 교대 최적화로, 효율적으로 해결한다. 또한 복잡도를 낮춘 두 가지 준최적 기법을 제시하였고, 시뮬레이션을 통해 기준선 대비 위치 추정 성능 향상과 빠른 수렴을 확인하였다. 향후 연구에서는 사용자 이동성과 이중 엣지 자원 할당을 고려한 확장을 다룰 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원 (No.RS-2024-00398948, 기여율 50%)과 (No.RS-2024-00360387, 무선 통신채널 멀티모달 속성을 활용한 보안 핵심기술 개발, 기여율 40%)과 정보통신기획평가원-대학 ICT 연구센터(ITRC)의 지원을 받아 수행된 연구임 (IITP-2025-RS-2020-II201787, 기여율 10%)

참 고 문 헌

- [1] J. Zhang, et al, "Joint beam alignment and resource allocation for multi-user mmwave integrated sensing and communication systems," IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 73, no. 4, pp. 5288–5303, 2023.
- [2] Z. Wang, et al, "Near-field integrated sensing and communications," IEEE Communications Letters, vol. 27, no. 8, pp. 2048–2052, 2023.
- [3] U. Demirhan, et al, "Cell-free isac mimo systems: Joint sensing and communication beamforming," IEEE Transactions on Communications, 2024