

근거리장 셀 프리 ISAC 시스템을 위한 하이브리드 빔포커싱 및 프론트홀 압축 기법

박주현, 정성아

서울시립대학교, 서울시립대학교

siotym7163@uos.ac.kr, seongah@uos.ac.kr

Joint Design of Hybrid Beamfocusing and Fronthaul Quantization for Near-Field Cell-Free ISAC

Juhyun Park, Seongah Jeong

Univ. of Seoul, Univ. of Seoul

요약

본 논문에서는 유한한 용량의 프론트홀 링크를 갖는 근거리장(Near-Field) 셀 프리 ISAC 시스템에서 하이브리드 아날로그-디지털 빔포밍과 프론트홀 압축의 결합 최적화 문제를 다룬다. 센싱 SNR 관점에서의 센싱 정확도를 최대화 하기 위하여, Semi-Definite Relaxation (SDR) 기법을 활용한 Alternating Optimization (AO) 기반의 알고리즘을 제안하였다.

I. 서론

6G 무선 통신 시스템은 초고주파와 테라헤르츠(THz) 대역과 초대규모 안테나 배열을 활용하여 확장 현실(XR) 및 센싱 중심 서비스를 지원할 것으로 전망된다. 이러한 환경에서는 전자기파의 근거리장(Near-Field) 영역이 확장되므로, 거리 의존적인 채널 모델링과 빔 포커싱(Beamfocusing) 기술이 필수적이다. 또한, 다수의 분산된 액세스 포인트(AP)를 활용하는 셀 프리(Cell-Free) 구조는 커버리지 개선에 효과적이나[1], 모든 AP에서 전 디지털(Fully-Digital) 빔포밍을 수행하는 것은 하드웨어 비용과 전력 소모 측면에서 비효율적이다. 따라서 아날로그와 디지털 처리를 결합한 하이브리드 빔포밍 기술이 요구된다. 그러나 실제 셀 프리 ISAC 시스템은 프론트홀 용량의 물리적 한계로 인해, 양자화(Quantization) 잡음과 아날로그-디지털 빔포밍 최적화 간의 상호 결합(Coupling) 문제를 겪는다. 기존 연구들이 주로 원거리장 환경이나 전 디지털 빔포밍에 집중한 것과 달리, 본 논문에서는 제한된 프론트홀 용량을 갖는 근거리장 셀 프리 ISAC 시스템을 위한 하이브리드 빔포밍 및 프론트홀 압축의 결합 최적화 기법을 제안한다.

II. 본론

1. 시스템 모델

그림 1은 본 논문에서 고려하는 시스템 환경을 나타낸 것으로, 중앙 처리 장치(CPU), M 개의 송신 AP(Tx-AP), N 개의 수신 AP(Rx-AP), K 개의 사용자(UE), 그리고 하나의 센싱 타겟으로 구성된 셀 프리 MIMO ISAC 시스템이다. 각 AP는 N_{RF} 개의 RF 체인을 갖는 하이브리드 빔포밍 구조를 가지며, 채널은 구면파(Spherical Wave) 모델을 따른다[3]. 각 AP는 안테나 간격이 d 인 등간격 선형 배열(ULA) 구조를 가지며, l 번째 안테나 소자의 위치는 $[ld, 0]^T$ 로 정의된다. 근거리장 환경을 반영하여 Tx-AP m 과 사용자 k 사이의 채널은 다음과 같이 모델링된다.

$$h_{m,k} = \beta_k a(r_{m,k}^{TX}, \theta_{m,k}^{TX}) \quad (1)$$

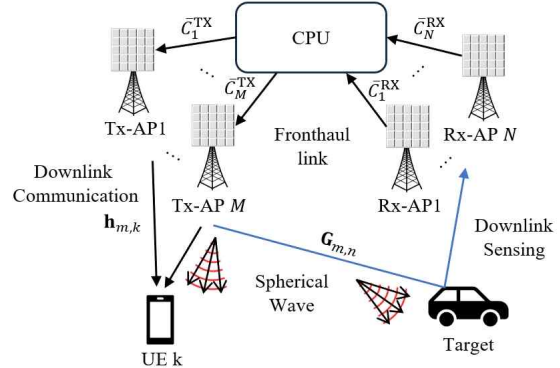


그림 1. 근거리장 셀프리 MIMO ISAC 시스템 모델

여기서 β_k 는 경로 손실을 포함한 복소 채널 이득이며, $a(\cdot)$ 은 거리 r 과 각도 θ 에 의존하는 근거리장 배열 응답 벡터이다. l 번째 안테나에 대한 위상항은 구면파 특성을 반영한다. 센싱 채널의 경우, 송신 AP에서 타겟을 거쳐 수신 AP로 도달하는 왕복(Round-trip) 채널 행렬은 다음과 같이 정의 된다.

$$G_{m,n} = \beta_s a(r_n^{RX}, \theta_n^{RX}) a^H(r_m^{TX}, \theta_{nm}^{TX}) \quad (2)$$

여기서 β_s 는 타겟의 레이더 단면적(RCS) 및 경로 손실을 포함하는 복소 진폭이다.

CPU는 사용자 메시지 c_k 를 디지털 빔포밍으로 프리코딩하고 센싱 신호를 더하여 기저대역 신호를 생성한다. 제한된 프론트홀 용량을 고려하여, 이 신호는 양자화되어 AP로 전송된다. 비율-왜곡(Rate-Distortion) 이론에 따라 [2], Tx-AP m 에서의 수신 신호는 양자화 잡음이 더해진 형태로 모델링된다.

2. 문제 정식화

본 연구의 목표는 각 사용자의 최소 통신 요구 조건과 프론트홀 용량 제약을 만족하면서, CPU에서의 센싱 rate을 최대화하는 것이다. 최적화 문제는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
\max_{\Gamma} R_r(\Gamma) &= \log_2(1 + \gamma_r(\Gamma)) & (1a) \\
s.t. R_{c,k}(\Gamma) &\geq R_{\min,k}, \quad \forall k, & (1b) \\
C_m^{TX}(\Gamma) &\leq \bar{C}_m^{TX}, C_n^{RX}(\Gamma) \leq \bar{C}_n^{RX}, \quad \forall m,n, & (1c) \\
P_m(\Gamma) &\leq \bar{P}_m, & (1d) \\
|[W_{RF}]_{ij}| &= 1, |[F_{RF}]_{ij}| = 1, \quad \forall i,j. & (1e)
\end{aligned}$$

여기서 γ_r 은 센싱 SNR, $R_{c,k}$ 은 통신 데이터 전송률, C^{TX}, C^{RX} 은 각각 업링크, 다운링크 프론트홀 전송률을 나타내며, 아날로그 빔포머 (W_{RF}, F_{RF})의 단위 크기(Unit-modulus) 제약이 포함된다.

식 (1)의 문제는 목적 함수와 제약 조건의 비볼록성(Non-convexity) 및 아날로그-디지털 빔포머 변수 간의 결합(coupling)으로 인해 직접적인 해결이 어렵다. 따라서 본 논문에서는 교대 최적화(AO) 기반의 알고리즘을 제안한다. (i) 송신 블록(Tx-Block) 최적화: 수신 빔포머를 고정한 상태에서 송신 빔포머(W_{RF}, W_{BB})와 양자화 잡음 공분산(Q^{TX})을 SCA 기법을 이용해 비볼록성을 해결한 후 업데이트한다. (ii) 수신 블록(Rx-Block) 최적화: 마찬가지로, 송신 변수를 고정한 상태에서 수신 빔포머(F_{RF}, F_{BB})와 양자화 잡음(Q^{RX})을 업데이트한다 (iii) SDR 및 가우시안 랜덤화: 아날로그 빔포머(W_{RF}, F_{RF})의 단위 크기 제약을 처리하기 위해 준정호화 완화(SDR)를 적용하고[4], 가우시안 랜덤화 기법[5]을 통해 실행 가능한 해를 도출한다[6].

3. 시뮬레이션 결과

제안 알고리즘의 성능 검증을 위해 3 GHz 중심 주파수 환경에서 모의실험을 수행하였다. 2명의 사용자와 1개의 타겟이 존재하며, 모든 AP는 반파장 간격의 ULA를 사용한다고 가정하였다. 그림 2에서는 송수신 안테나 수(N_T, N_R)가 증가할수록 근거리장 빔 포커싱 이득과 공간 다이버시티가 향상되어 센싱 성능이 증가함을 확인하였다. 그림 3에서는 프론트홀 용량이 낮은 경우(예: 2 bits/s/Hz), 높은 SNR 영역에서 센싱 성능이 포화(Saturation)되는 현상이 발생한다. 반면, 프론트홀 용량이 충분한 경우(10 bits/s/Hz)에는 이러한 성능 열화 없이 SNR 증가에 따라 성능이 지속적으로 향상됨을 확인하였다.

III. 결론

본 논문에서는 유한한 프론트홀 용량을 갖는 근거리장 셀 프리 ISAC 시스템을 위한 하이브리드 빔포커싱 및 프론트홀 압축 결합 최적화 기법을 제안하였다. AO 및 SDR 기반의 알고리즘을 통해 통신 및 프론트홀 제약을 만족하면서 센싱 성능을 극대화할 수 있음을 보였으며, 모의실험을 통해 안테나 배열 크기와 프론트홀 용량이 시스템 성능에 미치는 영향을 검증하였다. 향후 연구로는 프론트홀 오버헤드를 더욱 줄이기 위한 사용자 중심(User-centric) 클러스터링 기법으로의 확장이 가능하다.

ACKNOWLEDGMENT

1. 이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2023-NR077102).
2. 본 연구성과는 과기정통부·정보통신기획평가원의 ‘디지털혁신기술개발사업’으로 수행한 결과입니다. (No. RS-2025-25464665, 6G 저궤도위성 네트워크 지연 감소를 위한 지능형 전파환경인식 기반 통신 및 엣지컴퓨팅 핵심 기술 개발)

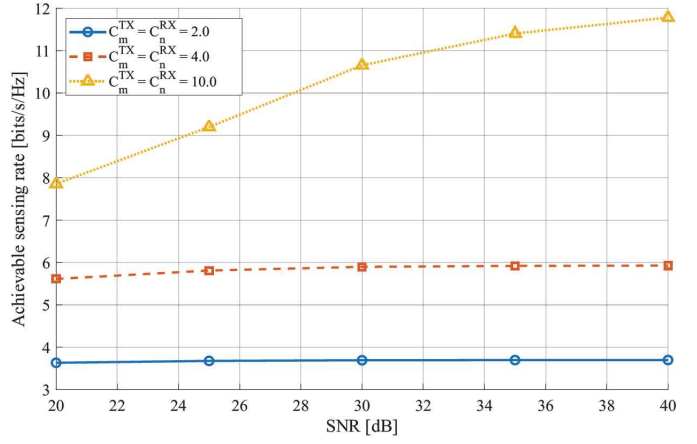


그림 2. 안테나 수에 따른 achievable sensing rate

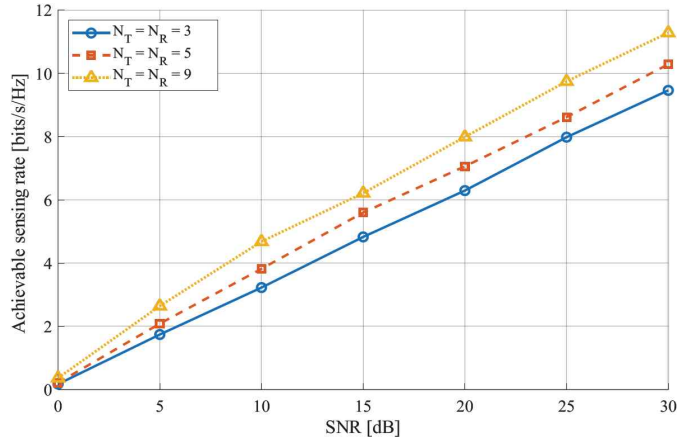


그림 3. 프론트홀 용량에 따른 achievable sensing rate

참고 문헌

- [1] S. Jeong, J. Kang, O. Simeone and S. Shamaï, "Cell-Free MIMO Perceptive Mobile Networks: Cloud vs. Edge Processing," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 74, no. 6, pp. 9520–9532, June 2025.
- [2] Ash, Robert B. Information theory. Courier Corporation, 2012.
- [3] Wang, Zhaolin, Xidong Mu, and Yuanwei Liu. "Near-field integrated sensing and communications." IEEE Communications Letters 27.8 (2023): 2048–2052.
- [4] Luo, Zhi-Quan, et al. "Semidefinite relaxation of quadratic optimization problems." IEEE Signal Processing Magazine 27.3 (2010): 20–34.
- [5] Pennanen, Harri, et al. "Distributed coordinated beamforming for multicell multigroup multicast systems." 2016 IEEE International Conference on Communications (ICC). IEEE, 2016.
- [6] Sidiropoulos, N. D., Davidson, T. N., Luo, Z. Q. (2006). Transmit beamforming for physical-layer multicasting. IEEE transactions on signal processing, 54(6), 2239–2251.