

적층형 지능 메타표면을 활용한 셀프리 대규모 MIMO 시스템 성능 향상

박은혁, 박석환
전북대학교

uool_h@jbnu.ac.kr, seokhwan@jbnu.ac.kr

Enhancing Cell-Free Massive MIMO Systems Using Stacked Intelligent Metasurfaces

EunHyuk Park, Seok-Hwan Park
Jeonbuk National University

요약

본 논문은 central processor (CP)가 여러 개의 다중안테나 분산 access point (AP)들을 통해 user equipment (UE)와 통신하는 셀자유 거대 다중 입출력 환경을 고려한다. Stacked intelligent metasurfaces (SIM)을 통해 AP는 적은 RF 체인으로도 정교한 신호처리를 수행할 수 있다. 모든 UE의 합 전송률을 최대화하기 위해 디지털 빔포밍 벡터, 양자화 공분산 행렬, 파동 영역 빔포밍의 합동 최적화 문제를 수학적으로 정립하고, 임의의 초기점에서부터 로컬 부 최적해를 찾는 반복적인 최적화 알고리즘을 제안한다. 모의실험 결과를 통해 제안하는 알고리즘의 최적화 효과를 분석한다.

I. 서론

셀자유 거대 다중 입출력 시스템은 넓은 지역에 분산된 다수의 AP가 협력해 사용자에게 서비스를 제공함으로써, 기존 셀 기반 시스템보다 높은 스펙트럼 효율을 달성할 수 있어 차세대 이동통신 시스템으로 주목받고 있다. 하지만, AP 밀집 배치에 따른 비용 증가와 프론트홀 용량 제한이 현실적인 제약이다. 이를 해결하기 위해 SIM을 활용한 파동 영역 빔포밍에 대한 연구가 활발히 진행 중이다 [1]. 본 논문은 디지털, 파동 영역 빔포밍 최적화를 다루며, 그 효과를 분석한다.

II. 시스템 모델 및 문제 정의

본 논문에서는 CP가 K_A 개의 AP를 통해 K_U 개의 UE와 통신하는 환경을 고려한다. 각 UE는 단일안테나, AP는 N 개의 안테나를 사용한다. 각 AP에는 통신 성능 향상을 위해 L 개의 메타표면 레이어로 구성된 SIM이 부착되어 있다. 각 레이어는 M 개의 meta-atom으로 구성된다. UE k 에 대한 인코딩된 기저대역 신호는 $s_k \sim \mathcal{CN}(0,1)$ 로 모델링된다. CP는 각 기저대역 신호를 디지털 빔포밍한 신호 $\mathbf{x}_i = \sum_{k \in \mathcal{K}_U} \mathbf{v}_{k,i} s_k$ 를 전송률 C_F bps/Hz의 디지털 프론트홀 링크를 통해 AP i 로 전송한다. AP i 가 수신하는 양자화 신호 $\hat{\mathbf{x}}_i$ 는 다음과 같이 모델링된다.

$$\hat{\mathbf{x}}_i = \mathbf{x}_i + \mathbf{q}_i. \quad (1)$$

양자화 잡음 \mathbf{q}_i 는 \mathbf{x}_i 와 상관이 없고 (uncorrelated), $\mathbf{q}_i \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \mathbf{\Omega}_i)$ 의 분포를 따른다고 가정한다. AP i 에서 복호화를 위해 다음 조건이 만족되어야 한다.

$$g_i(\mathbf{v}, \mathbf{\Omega}_i) = \log_2 \det \left(\sum_{k \in \mathcal{K}_U} \mathbf{v}_{k,i} \mathbf{v}_{k,i}^H + \mathbf{\Omega}_i \right) - \log_2 \det(\mathbf{\Omega}_i) \leq C_F \quad (2)$$

AP i 로부터 송신된 신호는 다음과 같이 SIM에 의해 파동영역 빔포밍된다.

$$\bar{\mathbf{x}}_i = \underbrace{\mathbf{\Phi}_i^L \mathbf{W}_i^L \mathbf{\Phi}_i^{L-1} \dots \mathbf{\Phi}_i^2 \mathbf{W}_i^2 \mathbf{\Phi}_i^1}_{\mathbf{G}_i} \mathbf{T}_i \hat{\mathbf{x}}_i \quad (3)$$

$\mathbf{T}_i \in \mathbb{C}^{M \times N}$ 는 AP i 의 N 개의 안테나와 입력 메타표면 레이어 사이 전송행렬, $\mathbf{\Phi}_i^l = \text{diag}(\{e^{j\theta_{i,m}^l}\}_{m \in \mathcal{M}}) \in \mathbb{C}^{M \times M}$ 는 $(l-1)$ 번째 메타표면 레이어와 l 번째 메타표면 레이어 사이 전송행렬을 나타낸다. 여기서, $\theta_{i,m}^l \in [0, 2\pi)$ 는 m 번째 meta-atom의 위상 이동을 의미한다.

UE k 가 수신하는 하향링크 신호 y_k 는 다음과 같다.

$$y_k = \sum_{i \in \mathcal{K}_A} \mathbf{h}_{k,i}^H \bar{\mathbf{x}}_i + z_k \quad (4)$$

$\mathbf{h}_{k,i} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 는 AP i 의 SIM의 출력 메타표면 레이어와 UE k 사이 채널벡터, $z_k \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_z^2)$ 는 잡음을 나타낸다. 주어진 디지털 빔포밍 벡터 \mathbf{v} , 양자화 잡음 공분산 행렬 $\mathbf{\Omega}$, 파동영역 빔포밍 $\boldsymbol{\theta}$ 에 대하여 UE k 의 전송률은 다음과 같다.

$$R_k = f_k(\mathbf{v}, \mathbf{\Omega}, \boldsymbol{\theta}) = \log_2 \left(1 + \frac{|\mathbf{h}_k^H \bar{\mathbf{G}} \bar{\mathbf{T}} \mathbf{v}_k|^2}{\text{IF}_k(\mathbf{v}, \mathbf{\Omega}, \boldsymbol{\theta})} \right) \quad (5)$$

(5)에서 $\mathbf{h}_k = [\mathbf{h}_{k,1}^H \dots \mathbf{h}_{k,K_A}^H]^H$, $\bar{\mathbf{G}} = \text{blkdiag}(\{\mathbf{G}_i\}_{i \in \mathcal{K}_A})$, $\bar{\mathbf{T}} = \text{blkdiag}(\{\mathbf{T}_i\}_{i \in \mathcal{K}_A})$, $\text{IF}_k(\mathbf{v}, \mathbf{\Omega}, \boldsymbol{\theta}) = \sum_{k' \in \mathcal{K}_A \setminus \{k\}} |\mathbf{h}_k^H \bar{\mathbf{G}} \bar{\mathbf{T}} \mathbf{v}_{k'}|^2 + \mathbf{h}_k^H \bar{\mathbf{G}} \bar{\mathbf{T}} \bar{\mathbf{\Omega}} \bar{\mathbf{T}}^H \bar{\mathbf{G}}^H \mathbf{h}_k + \sigma_z^2$ 을 정의했다.

모든 UE 의 합 전송률을 최대화하기 위해 $\mathbf{v}, \mathbf{\Omega}, \mathbf{\theta}$ 의 합동 최적화 문제를 다룬다. 해당 문제는 다음과 같이 수학적으로 정립할 수 있다.

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{v}, \mathbf{\Omega}, \mathbf{\theta}} \quad & \sum_{k \in \mathcal{K}_U} R_k \\ \text{s.t.} \quad & g_i(\mathbf{v}, \mathbf{\Omega}_i) \leq C_F, \forall i \\ & \sum_{k \in \mathcal{K}_U} \|\mathbf{v}_{k,i}\|^2 + \text{tr}(\mathbf{\Omega}_i) \leq P_A, \forall i, \\ & \theta_{i,m}^l \in [0, 2\pi), \forall (i, l, m). \end{aligned} \quad (6)$$

III. 디지털-파동 영역 빔포밍 최적화

상기 (6)의 최적화 문제는 $\{\mathbf{v}, \mathbf{\Omega}\}$ 와 $\mathbf{\theta}$ 가 얹혀 있고, 목적함수와 첫 번째, 세 번째 제한조건으로 인해 글로벌 해의 도출이 어려운 비 컨벡스 문제로 분류된다. 따라서 $\mathbf{\theta}$ 가 고정된 상태에서 $\{\mathbf{v}, \mathbf{\Omega}\}$ 의 최적화를 다룬다. 부 최적해를 효율적으로 찾기 위해, 목적함수에 대한 다음의 충분조건을 고려한다.

$$\begin{aligned} f_k(\mathbf{v}, \mathbf{\Omega}, \mathbf{\theta}) &\geq \tilde{f}_k(\mathbf{v}, \mathbf{\Omega}, \mathbf{\theta}, \rho_k, \nu_k) = \log_2(1 + \rho_k) - \frac{\rho_k}{\ln 2} \\ &+ \frac{1 + \rho_k}{\ln 2} \left[2\text{Re}\{\mathbf{v}_k^H \tilde{\mathbf{h}}_k \nu_k\} - |\nu_k|^2 \left(\|\tilde{\mathbf{h}}_k \mathbf{v}_k\|^2 + \text{IF}_k(\mathbf{v}, \mathbf{\Omega}, \mathbf{\theta}) \right) \right]. \end{aligned} \quad (7)$$

$\tilde{\mathbf{h}}_k = \mathbf{T}^H \mathbf{G}^H \mathbf{h}_k \mathbf{C}^{NK_A \times 1}$ 와 보조변수 $\rho_k \in \mathbb{R}_+, \nu_k \in \mathbb{C}$ 를 정의했고, ρ_k 와 ν_k 가 다음과 같을 때 (8)의 등호가 성립한다.

$$\rho_k = \frac{|\tilde{\mathbf{h}}_k \mathbf{v}_k|^2}{\text{IF}_k(\mathbf{v}, \mathbf{\Omega}, \mathbf{\theta})}, \nu_k = \frac{\tilde{\mathbf{h}}_k \mathbf{v}_k}{\|\tilde{\mathbf{h}}_k \mathbf{v}_k\|^2 + \text{IF}_k(\mathbf{v}, \mathbf{\Omega}, \mathbf{\theta})}. \quad (8)$$

또한, 첫 번째 제한 조건에 대한 다음의 충분 조건을 고려한다.

$$\begin{aligned} \tilde{g}_i(\mathbf{v}, \mathbf{\Omega}_i, \mathbf{\Sigma}) &= \log_2 \det(\mathbf{\Sigma}_i) \\ &+ \frac{1}{\ln 2} \text{tr} \left(\mathbf{\Sigma}_i^{-1} \left(\sum_{k \in \mathcal{K}_U} \mathbf{v}_{k,i} \mathbf{v}_{k,i}^H + \mathbf{\Omega}_i \right) \right) - \log_2 \det(\mathbf{\Omega}_i) \leq C_F \end{aligned} \quad (9)$$

$\mathbf{\Sigma}_i$ 는 임의의 positive semidefinite (p.s.d.) 행렬이며, $\mathbf{\Sigma}_i$ 가 다음과 같을 때 (2)와 (8)은 동등한 조건이 된다.

$$\mathbf{\Sigma}_i = \sum_{k \in \mathcal{K}_U} \mathbf{v}_{k,i} \mathbf{v}_{k,i}^H + \mathbf{\Omega}_i. \quad (10)$$

따라서 최적화 문제 (6)에서 보조변수 $\{\mathbf{\Sigma}, \mathbf{p}, \mathbf{v}\}$ 를 도입하고, 목적함수와 첫 번째 제한조건을 각각 (7)과 (9)로 대체하여 동등한 문제를 얻을 수 있다. 해당 문제에서 $\{\mathbf{\Sigma}, \mathbf{p}, \mathbf{v}\}$ 를 고정하면 $\{\mathbf{v}, \mathbf{\Omega}\}$ 에 대한 컨벡스 문제가 되므로, 표준 컨벡스 solver 툴(예:[2])을 이용하여 해를 구할 수 있다.

$\{\mathbf{v}, \mathbf{\Omega}\}$ 가 주어졌을 때, $\mathbf{\theta}$ 을 최적화하기 위해 최적화 문제 (6)을 살펴보면, 세 번째 제한조건(unit-modulus)이 $\mathbf{\theta}$ 와 관련된 유일한 제한조건임을 알 수 있다. 따라서, $\mathbf{\theta}$ 를 효율적으로 최적화하기 위해 각 $\theta_{i,m}^l$ 에 대한 목적함수의 편미분인 $\partial R_k / \partial \theta_{i,m}^l$ 을 구해 다음과 같이 업데이트하는 Gradient ascent (GA)를 적용한다.

$$\theta_{i,m}^l \leftarrow \theta_{i,m}^l + \mu(1/\eta_{i,m})(\partial R_k / \partial \theta_{i,m}^l) \quad (11)$$

μ 는 스텝 크기, $\eta_{i,m}$ 는 정규화 계수를 나타낸다. 스텝 크기 μ 는 업데이트마다 $0 < \beta < 1$ 의 비율로 줄어든다.

앞서 기술한 $\{\mathbf{v}, \mathbf{\Omega}\}$ 와 $\mathbf{\theta}$ 의 업데이트를 반복적으로 수행함으로써 목적함수의 부 최적해를 찾을 수 있다.

IV. 모의실험 결과

모의실험을 위해 $K_A = 3, K_U = 6, N = 2, M = 16, P_A / \sigma_z^2 \in \{0, 20\}$ dB 를 가정하고, UE 들과 AP 들의 위치는 매 실험마다 반경 100m 의 원 내부에서 랜덤하게 샘플한다. 채널 $\mathbf{h}_{k,i}$ 의 원소들은 독립적인 $\mathcal{CN}(0, 10(d_{k,i}/30)^{-3})$ 의 분포를 따르고, $d_{k,i}$ 는 UE k 와 AP i 간의 물리적인 거리[m]이다. 제안하는 합동 최적화 알고리즘의 우수성을 확인하기 위해, 다음 두 개의 비교 기법을 고려한다: 1) **Fully-digital**: 각 AP 들은 $M \gg N$ 개의 안테나를 사용하여 파동 영역 빔포밍 없이 디지털 신호처리를 수행함. 2) **Hybrid digital-wave (rand. $\mathbf{\theta}$)**: 각 AP 들은 무작위로 설정된 meta-atom 의 위상변화와 함께, 디지털 신호처리만을 수행함.

그림 1 의 그래프는 SIM 레이어 수의 증가에 따른 평균 합 전송률의 변화를 보여준다. 레이어가 충분히 쌓였을 때, 더 정교한 파동 영역 신호처리가 가능하므로 평균 합 전송률이 증가하는 것을 알 수 있다. 특히, P_A / σ_z^2 의 값이 클수록, 제안하는 hybrid digital-wave 기법이 fully-digital 기법에 근접하는 것을 보여준다. 파동 영역 빔포밍이 최적화되지 않았을 때, 레이어가 증가하더라도 평균 합 전송률이 감소하는 것은 SIM 이 $\tilde{\mathbf{h}}_k$ 에 영향을 주기 때문이며, 파동 영역 빔포밍 최적화의 중요성을 보여준다.

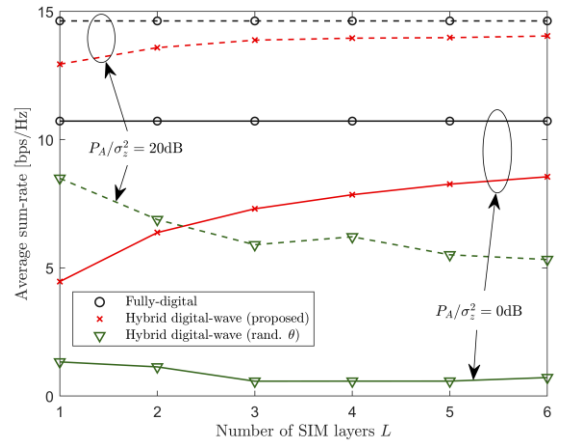


그림 1. SIM 레이어 수 대비 평균 합 전송률 비교

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부, 교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2019-NR040079, RS-2023-00238977, RS-2024-00462932)

참 고 문 헌

- [1] J. An et al., "Stacked Intelligent Metasurfaces for Efficient Holographic MIMO Communications in 6G," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 41, no. 8, pp. 2380-2396, Aug. 2023
- [2] M. Grant and S. Boyd, "CVX: MATLAB software for disciplined convex programming," Second Edition, Third Printing, pp. 1--786, Ver. 2.2, Jan. 2020.