

합-주파수 효율성 최대화를 위한 빔포밍 최적화 연구 동향: 중앙 집중형에서 분산형까지

한 덕 환*, 이 남 윤^o

A Survey of Beamforming Optimization for Sum-Spectral Efficiency Maximization: From Centralized to Decentralized

Deokhwan Han*, Namyoon Lee^o

요 약

본 논문에서는 합-주파수 효율성 최대화를 위한 빔포밍 최적화 연구 동향을 간략하게 소개한다. 특히 기지국 간 협력을 고려한 경우와 비협력 상황의 두 경우에서 어떠한 합-주파수 효율 성능 차이를 보이는지와 그에 따른 계산량 오버헤드를 함께 비교함으로써 상충 관계 (trade-off)에 대하여 논의한다. 마지막으로 관련된 시뮬레이션 결과를 보이고 향후 연구 주제를 소개하며 마무리한다.

Key Words : Sum-spectral efficiency maximization, cooperative beamforming, noncooperative beamforming

ABSTRACT

In this paper, we briefly introduce trends in beamforming optimization research for sum-frequency efficiency maximization problems. In particular, we discuss the trade-off between the sum-spectral efficiency performance and the corresponding computational overhead in the two cases of cooperative scenarios and non-cooperative one. Finally, we show numerical simulation results and conclude by introducing future research topics.

1. 서 론

합-주파수 효율성 최대화를 위한 빔포밍 최적화 연구는 지난 수십 년간 다방면으로 활발히 연구되어왔다¹⁻⁷. 이와 관련한 모든 연구는 다음과 같은 일련의 문제의 해를 구하는 것을 목적으로 한다.

$$\arg \max_{\mathbf{f}_\ell} \sum_{k=1}^{K_\ell} \log_2 \left(1 + \text{SINR}_{\ell,k}(\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2) \right), \quad (1-1)$$

$$\text{s. t.} \quad \|\mathbf{f}_\ell\|_2^2 = 1. \quad (1-2)$$

문제 (1)은 두개의 셀 환경을 가정한 것으로, 이때 \mathbf{f}_ℓ 은 ℓ 번째 기지국의 빔포밍 벡터를 의미하며 K_ℓ 은 ℓ 번째 셀의 유저 수, 그리고 $\text{SINR}_{\ell,k}$ 은 ℓ 번째 셀의 k 번째 유저의 신호 대비 잡음 비 (signal-to-interference-plus-noise-ratio, SINR)를 의미한다. $\text{SINR}_{\ell,k}$ 은 다음과 같이 정의된다.

$$\text{SINR}_{\ell,k}(\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2) = \frac{\mathbf{f}_\ell^H \mathbf{S}_{\ell,\ell,k} \mathbf{f}_\ell}{\mathbf{f}_\ell^H \mathbf{U}_{\ell,\ell,k} \mathbf{f}_\ell + \mathbf{f}_\ell^H \mathbf{C}_{\bar{\ell},\ell,k} \mathbf{f}_\ell}. \quad (2)$$

각각의 변수는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_{\ell,\ell,k} &= \mathbf{e}_k \mathbf{e}_k^T \otimes \mathbf{h}_{\ell,\ell,k} \mathbf{h}_{\ell,\ell,k}^H, \\ \mathbf{U}_{\ell,\ell,k} &= \mathbf{I}_{K_\ell} \otimes \mathbf{h}_{\ell,\ell,k} \mathbf{h}_{\ell,\ell,k}^H - \mathbf{S}_{\ell,\ell,k} + \frac{\sigma^2}{P_\ell} \mathbf{I}_{N_\ell K_\ell}, \\ \mathbf{C}_{\bar{\ell},\ell,k} &= \mathbf{I}_{K_\ell} \otimes \frac{P_{\bar{\ell}}}{P_\ell} \mathbf{h}_{\bar{\ell},\ell,k} \mathbf{h}_{\bar{\ell},\ell,k}^H - \mathbf{S}_{\ell,\ell,k} + \frac{\sigma^2}{P_\ell} \mathbf{I}_{N_\ell K_\ell}. \end{aligned} \quad (3)$$

식 (1)-(2) 통해 알 수 있듯이, 빔포밍 벡터 \mathbf{f}_1 및 \mathbf{f}_2 를 동시에 고려하며 최적화 (jointly optimize) 할 수 있다면, (2) 식에서 $\mathbf{f}_\ell^H \mathbf{C}_{\bar{\ell},\ell,k} \mathbf{f}_\ell$ 항에 해당하는 셀 간 간섭 영향을 줄일 수 있음을 알 수 있다. 이러한 이점을 달성하기 위하여 제안된 방법이 셀 간 협력이다. 뿐만 아니라, 만약 셀-프리 환경을 고려하여 모든 기지국이 모든 유저의 데이터 정보를 가지고 협력하여 서비스 한다면, 셀 간 간섭 영향을 근본적으로 제거할 수도 있다.

* First Author : (ORCID:0000-0002-9822-4963)Pohang University of Science and Technology (POSTECH), dhhan@postech.ac.kr, 학생(박사과정), 학생회원
^o Corresponding Author : (ORCID:0000-0003-4321-4108)Pohang University of Science and Technology (POSTECH), nylee@postech.ac.kr, 부교수, 정회원
 논문번호 : 202107-175-A-LU, Received July 21, 2021; Revised August 9, 2021; Accepted August 11, 2021

하지만 셀 간 협력을 위해서는, 즉, \mathbf{f}_1 과 \mathbf{f}_2 를 동시에 최적화하기 위해서는, $\mathbf{C}_{\bar{\ell},\ell,k}$ 항을 계산하기 위하여 적어도 셀 간 채널 정보 공유를 필요로 한다. 따라서 이에 상응하는 정보 공유 오버헤드가 늘어나게 되므로 각각의 시나리오에 대한 면밀한 고찰을 할 필요가 있음을 알 수 있다. 따라서, 다음의 본문에서 각 시나리오에 대한 자세한 문제 설명을 제시한다.

II. 본 론

본문에서는 합-주파수 효율성 최대화를 위한 빔포밍 관련 연구와 관련하여 대표적인 세가지의 논문을 소개하도록 한다^[1-3]. 대표적인 세가지 논문은 다음의 각 시나리오에서 빔포밍 최적화 연구를 선행하였다: 1) 채널 정보 및 유저 데이터 공유를 통한 협력 시나리오^[1]와 2) 채널 정보 공유를 통한 협력 시나리오^[2] 그리고 3) 어떠한 정보 공유도 하지 않는 비협력 시나리오^[3]. 우리는 두개의 셀 환경에서 이 세가지 시나리오에 대한 논문 결과를 순차적으로 소개하고 관련 시뮬레이션 결과를 공유한다.

1) 채널 정보 및 유저 데이터 공유를 통한 협력 시나리오⁽¹⁾: 모든 기지국이 자신이 서비스하는 유저의 채널 정보와 데이터를 중앙처리장치에 공유를 하게 된다면, 중앙처리장치는 전달받은 정보를 이용하여 $\mathbf{f} = [\mathbf{f}_1^H, \mathbf{f}_2^H]^H$ 를 최적화하는 문제를 형성할 수 있다.

$$\varphi^{[1, Coop]}: \arg \max \sum_{k=1}^{K_\Sigma} \log_2 \left(\frac{\mathbf{f}^H \mathbf{A}_k \mathbf{f}}{\mathbf{f}^H \mathbf{B}_k \mathbf{f}} \right), \quad (4-1)$$

$$\text{s.t.} \quad \|\mathbf{f}\|_2^2 = 2. \quad (4-2)$$

이때 \mathbf{A}_k 및 \mathbf{B}_k 는 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{A}_k = \mathbf{I}_{K_\Sigma} \otimes \mathbf{h}_k \mathbf{h}_k^H + \frac{\sigma^2}{P} \mathbf{I}_{N_\Sigma K_\Sigma} \in \mathbb{C}^{N_\Sigma K_\Sigma \times N_\Sigma K_\Sigma}, \quad (5)$$

$$\mathbf{B}_k = \mathbf{A}_k - \mathbf{e}_k \mathbf{e}_k^T \otimes \mathbf{h}_k \mathbf{h}_k^H \in \mathbb{C}^{N_\Sigma K_\Sigma \times N_\Sigma K_\Sigma}.$$

문제 (4)는 비-오목 함수로 전역 최적해를 찾는 것은 매우 어렵다. [1]에서는 문제 (4)에 해당하는 지역 최적의 해를 찾는 알고리즘을 개발하였다^[1, Algorithm1].

2) 채널 정보 공유를 통한 협력 시나리오⁽²⁾: 모든 기지국이 채널 정보만 공유할 경우, 각 기지국에서는 $\mathbf{f}_\ell^H \mathbf{C}_{\bar{\ell},\ell,k} \mathbf{f}_\ell$ 또한 고려하여 최적화 문제를 형성할 수 있다.

$$\varphi^{[2, Coop]}: \arg \max R_1^{sum}(\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2), \quad (6-1)$$

$$\text{s.t.} \quad \|\mathbf{f}_\ell\|_2^2 = 1, \forall \ell \in \{1,2\} \quad (6-2)$$

이때, 각 항은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} R_1^{sum}(\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2) &= R_1^{sum}(\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2) + R_2^{sum}(\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2), \\ R_\ell^{sum}(\mathbf{f}_1, \mathbf{f}_2) &= \sum_{k=1}^{K_\ell} \log_2 \left(\frac{\mathbf{f}_\ell^H (\mathbf{S}_{\ell,\ell,k} + \mathbf{U}_{\ell,\ell,k}) \mathbf{f}_\ell + \mathbf{f}_\ell^H \mathbf{C}_{\bar{\ell},\ell,k} \mathbf{f}_{\bar{\ell}}}{\mathbf{f}_\ell^H \mathbf{U}_{\ell,\ell,k} \mathbf{f}_\ell + \mathbf{f}_\ell^H \mathbf{C}_{\bar{\ell},\ell,k} \mathbf{f}_{\bar{\ell}}} \right) \quad (7) \end{aligned}$$

문제 (4)는 비-오목 함수로 전역 최적해를 찾는 것은 매우 어렵다. [2]에서는 문제 (6)에 해당하는 지역 최적의 해를 찾는 알고리즘을 개발하였다^[2, Table3].

3) 어떠한 정보 공유도 하지 않는 비협력 시나리오⁽³⁾: [3] 논문에서는 기지국 간 어떠한 정보 공유도 이루어지지 못하는 환경에서, $\varphi^{[2, Coop]}$ 을 통하여 얻을 수 있는 합-주파수 효율성에 근접한 성능을 달성할 수 있는 빔포밍 벡터를 찾는 다음의 최적화 문제를 새롭게 고안하였다^[3, Algorithm1].

$$\varphi^{[3, Decentralized]}: \arg \max \hat{R}_\ell^{sum}(\mathbf{f}_\ell), \quad (8-1)$$

$$\text{s.t.} \quad \|\mathbf{f}_\ell\|_2^2 = 1, \forall \ell \in \{1,2\}. \quad (8-2)$$

이때, 각 항은 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} \hat{R}_\ell^{sum}(\mathbf{f}_\ell) &= \sum_{k=1}^{K_\ell} \log_2 (1 + \text{SILNR}_{\ell,k}(\mathbf{f}_\ell)) \\ &= \log_2 \left(\frac{\prod_{k=1}^{K_\ell} \mathbf{f}_\ell^H (\mathbf{S}_{\ell,\ell,k} + \mathbf{U}_{\ell,\ell,k}) \mathbf{f}_\ell + \mathbf{L}_{\ell,\bar{\ell}}(\mathbf{f}_\ell)^{\frac{K_{\bar{\ell}}}{K_\ell}}}{\prod_{k=1}^{K_\ell} \mathbf{f}_\ell^H \mathbf{U}_{\ell,\ell,k} \mathbf{f}_\ell + \mathbf{L}_{\ell,\bar{\ell}}(\mathbf{f}_\ell)^{\frac{K_{\bar{\ell}}}{K_\ell}}} \right), \quad (9) \\ \mathbf{L}_{\ell,\bar{\ell}}(\mathbf{f}_\ell) &= \left(\prod_{j=1}^{K_{\bar{\ell}}} \mathbf{f}_\ell^H \mathbf{C}_{\ell,\bar{\ell},j} \mathbf{f}_\ell \right)^{\frac{1}{K_{\bar{\ell}}}}. \end{aligned}$$

새롭게 정의된 SILNR은 signal-to-interference-plus-leakage-plus-noise-ratio의 줄임 말로 기존의 SINR 메트릭과의 차이점으로는 $\mathbf{f}_\ell^H \mathbf{C}_{\bar{\ell},\ell,k} \mathbf{f}_\ell$ 항을 대신하여 $\mathbf{L}_{\ell,\bar{\ell}}(\mathbf{f}_\ell)^{\frac{K_{\bar{\ell}}}{K_\ell}}$ 항이 새롭게 들어간 점이다. 이는 정보 공유가 없는 환경에서 계산하지 못하는 셀 간 간섭 $\mathbf{f}_\ell^H \mathbf{C}_{\bar{\ell},\ell,k} \mathbf{f}_\ell$ 항을 보상하기 위한 새롭게 정의된 항이다. $\mathbf{L}_{\ell,\bar{\ell}}(\mathbf{f}_\ell)^{\frac{K_{\bar{\ell}}}{K_\ell}}$ 은 인접한 항으로 향하는 누설 신호 파워의 geometric mean이라는 물리적 의미를 가진다. 또한, 이러한 물리적인 의미뿐만 아니라, 다음의 특정한 조

건축에서 $\rho^{[3, Decentralized]}$ 은 $\rho^{[2, Coop]}$ 와 동치임을 밝혀내었다³⁾:

$$\mathbf{f}_\ell^H \mathbf{U}_{\ell,\ell,k} \mathbf{f}_\ell = 0 \text{ or } \mathbf{f}_\ell^H \mathbf{C}_{\ell,\ell,k} \mathbf{f}_\ell = 0 \quad (10)$$

다음의 실험 결과 섹션에서는 이 세가지 경우에 해당하는 합-주파수 효율성의 실험 결과를 제공한다.

III. 실험결과

본 절에서는 앞선 절에서 소개한 세 알고리즘의 에르고딕 합-주파수 효율성 성능을 비교한다. 그림 1에서 보이는 바와 같이, $(L, N_\ell, K_\ell) = (2, 32, 8)$ 환경 아래, 채널 정보 및 유저 데이터 공유를 통한 협력 시나리오에 해당되는 [1, Algorithm 1]이 가장 좋은 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다. 다음으로 분산형 빔포밍에 해당되는 [3, Algorithm 1] 알고리즘이 채널 정보 공유를 통한 협력 빔포밍 기술에 해당되는 [2, Table 3] 알고리즘과 거의 같은 에르고딕 합-주파수 효율성 성능을 내는 것을 확인할 수 있다. [1, Algorithm 1]이 가장 좋은 성능을 내는 이유는 채널 정보만을 공유하는 [2,3]과 달리, 유저 데이터도 함께 공유하여 유저 입장에서 더 나은 협력 시나리오를 실현할 수 있기 때문이다.

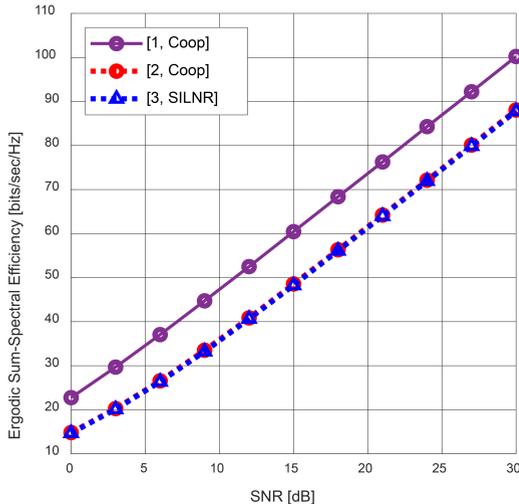


Fig. 1. Ergodic sum-spectral efficiency comparison under $(L, N_\ell, K_\ell) = (2, 32, 8)$

그림 1. $(L, N_\ell, K_\ell) = (2, 32, 8)$ 환경 아래 에르고딕 합-주파수 효율성 비교

IV. 결론

본 레터에서는 여러가지 시나리오에서 합-주파수 효율성 최대화를 위해 연구된 빔포밍 알고리즘을 소개하였다. 특히 기지국 간 협력을 고려한 경우와 비협력 상황의 두 경우에서 합-주파수 효율성 최대화 문제가 어떻게 다르게 형성되는지 소개한 후, 각 시나리오에 해당하는 오버헤드를 간략하게 비교하였다. 마지막으로 관련된 시뮬레이션 결과를 보이며 세 알고리즘의 에르고딕 합-주파수 효율성 성능을 비교하였다.

향 후 연구 주제로는 현재 유망한 기술로 평가받고 있는 tera-hertz (THz) 환경에서 다중 유저를 지원하기 위한 3D 빔포밍 문제를 연구하고자 한다.

References

- [1] D. Han, J. Park, and N. Lee, "Sparse joint transmission for cell-free massive MIMO: A sparse PCA approach," *arXiv preprint arXiv:1912.05231*, 2019.
- [2] J. Choi, N. Lee, S.-N. 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, 2020.
- [3] D. Han and N. Lee, "Distributed precoding using local CSIT for MU-MIMO heterogeneous cellular networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 69, no. 3, pp. 1666-1678, 2020.
- [4] F. Boccardi, R. W. Heath, A. Lozano, T. L. Marzetta, and P. Popovski, "Five disruptive technology directions for 5G," *IEEE Commun.Mag.*, vol. 52, no. 2, pp. 74-80, 2014.
- [5] N. Lee, D. Morales-Jimenez, A. Lozano, and R. W. Heath, Jr., "Spectral efficiency of dynamic coordinated beamforming: A stochastic geometry approach," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 14, no. 1, pp. 230-241, Jan. 2015.
- [6] A. Ghosh, N. Mangalvedhe, R. Ratasuk, B. Mondal, M. Cudak, E. Vi-sotsky, T. A. Thomas, J. G. Andrews, P. Xia, H. S. Jo, H. S. Dhillon, and T. D. Novlan,

- “Heterogeneous cellular networks: From theory to practice,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 50, no. 6, pp. 54-64, 2012.
- [7] D. Yu, J. Lee, J. Kim, and S.-H. Park, “Study on the achievable sum-rate in the uplink of cloud radio access networks with finite-capacity fronthaul links,” *J. KICS*, vol. 42, no. 9, pp. 1822-1831, 2017.