

광대역 E-MIMO 시스템을 위한 합 주파수 효율 최대화 기법

이승훈, 김현성, 이남윤
포항공과대학교

{shlee14, hyeonseong.kim, nylee}@postech.ac.kr

Sum-Spectral Efficiency Maximization for Wideband E-MIMO

Seunghoon Lee and Namyoon Lee
POSTECH

요 약

본 논문은 E-MIMO 시스템의 도입에 따라 증대된 신호 처리 복잡도 문제를 해결하고, 광대역 OFDM 환경에서 합 전송률(sum-rate)을 극대화하기 위한 새로운 디지털 프리코딩 방법을 제안한다. 기존의 WMMSE 나 GPIP 와 같은 연구들은 협대역(narrowband) 가정하에 사용자 선택과 전력 할당 및 빔 설계를 최적화하였으나, 주파수 선택적 채널 특성을 갖는 광대역 시나리오에서 필수적인 부반송파 선택 및 할당까지 포함하는 통합적 최적화 방안은 부재한다. 본 논문에서는 광대역 환경에서 (i) 사용자 선택, (ii) 부반송파 선택, (iii) 전력 할당, (iv) 프리코딩 설계를 동시에 수행하는 결합 최적화(joint optimization) 알고리즘을 제안한다.

I. 서 론

대규모 MIMO 기술이 수천 개의 안테나를 활용하는 E-MIMO(Extreme Massive MIMO)로 발전함에 따라 주파수 효율은 획기적으로 증대되었으나, 이에 따른 하드웨어 비용 및 신호 처리의 복잡도 또한 급격히 증가하였다 [1]. 특히 다중 사용자 하향링크 시스템에서 합 전송률을 최대화하는 프리코더 설계는 NP-hard 문제로서, ZF 와 같은 선형 기법의 성능적 한계를 극복하기 위해 WMMSE 나 GPIP 등 다양한 반복적 결합 최적화 기법이 연구되었으나, 이들은 대부분 협대역 채널을 가정하고 있어 실제 광대역 OFDM 환경에서의 부반송파 선택 및 자원 할당 문제를 포괄적으로 해결하지 못하는 실정이다. 이에 본 논문에서는 광대역 대규모 MIMO 환경을 대상으로 사용자 선택, 부반송파 선택, 전력 할당 및 프리코딩 설계를 동시에 수행하는 연산 효율적인 새로운 결합 최적화 프레임워크를 제안한다.

II. 시스템 모델 및 문제 정식화

본 논문에서는 단일 셀 광대역 다중 사용자 MIMO 하향 링크를 고려한다. 기지국은 N 개의 안테나를 장착하여, 단일 안테나를 장착한 K 명의 사용자를 M 개의 부반송파를 사용하는 OFDM 을 이용해서 서비스한다. 기지국은 m 번째 부반송파에서 K 개의 독립인 심볼 $\{x_{1,m}, x_{2,m}, \dots, x_{K,m}\}$ 를 선형 프리코딩 벡터 $\{\mathbf{f}_{1,m}, \mathbf{f}_{2,m}, \dots, \mathbf{f}_{K,m}\}$ 를 이용해서 송신한다. 각 심볼은 평균이 0 이고 분산이 1 인 독립 복소 가우시안 분포를

따른다고 가정한다. 총 하향 송신 전력을 P 라 할때, m 번째 부반송파의 송신 신호는 아래와 같이 표현된다.

$$\mathbf{x}_m = \sqrt{P} \sum_{k=1}^K \mathbf{f}_{k,m} x_{k,m}. \quad (1)$$

이때, $\mathbf{x}_m \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 그리고 $\mathbf{f}_{k,m} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 이고, 총 송신 전력은 $P \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \|\mathbf{f}_{k,m}\|_2^2$ 로 전력 제한을 만족시키기 위해 $\sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \|\mathbf{f}_{k,m}\|_2^2 \leq 1$ 로 제한한다. k 번째 사용자의 m 번째 부반송파에서의 수신 신호는

$$y_{k,m} = \sqrt{P} \mathbf{h}_{k,m}^H \mathbf{f}_{k,m} x_{k,m} + \sqrt{P} \sum_{i \neq k} \mathbf{h}_{k,m}^H \mathbf{f}_{i,m} x_{i,m} + z_{k,m}, \quad (2)$$

과 같이 표현되고, 이때 $\mathbf{h}_{k,m}$ 는 k 번째 사용자의 m 번째 부반송파에서의 채널이고, $z_{k,m}$ 는 평균 0 이고 분산 σ_n^2 인 독립 복소 가우시안 분포를 따른다고 가정한다. 수신단에서 프리코딩된 채널 정보를 완벽히 알고 있다고 가정했을때, k 번째 사용자의 m 번째 부반송파에서의 SINR 은 아래와 같다.

$$\text{SINR}_{k,m} = \frac{|\mathbf{h}_{k,m}^H \mathbf{f}_{k,m}|^2}{\sum_{i \neq k} |\mathbf{h}_{k,m}^H \mathbf{f}_{i,m}|^2 + \frac{P}{\sigma_n^2}}. \quad (3)$$

본 논문에서는 송신단에서 채널정보를 완벽히 알고있다고 가정하고 아래의 합 전송률 문제를 최적화 하는 방법을 제안한다.

$$\begin{aligned} & \underset{\{\mathbf{f}_{k,m}\}_{k \in [K], m \in [M]}}{\text{maximize}} && \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \log_2(1 + \text{SINR}_{k,m}) \\ & \text{subject to} && \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \|\mathbf{f}_{k,m}\|_2^2 \leq 1. \end{aligned} \quad (4)$$

위 문제는 모든 부반송파에 대해서 사용자 선택을 하는 방법과 전력할당 방법, 그리고 프리코딩 방법을 결합하여 동시에 최적화하는 문제이다. 구체적으로, $\|\mathbf{f}_{k,m}\|_2^2 \neq 1$ 인 (k,m) 에 대해서 사용자가 부반송파에 할당되어있는 것이다.

III. 제안하는 합 주파수 효율 최대화 기법

본 절에서는 협대역 시나리오를 위해 개발된 기존의 GPIP 프레임워크를 확장하여 [2], 광대역 대규모 MIMO 시스템을 위한 프리코딩 기법을 제시한다. GPIP 알고리즘을 광대역으로 확장하는 핵심 아이디어는 모든 사용자와 모든 부반송파에 대한 디지털 프리코딩 벡터 $\mathbf{f}_{k,m}$ 를 동시에 결합 최적화하는 것이다. 먼저, 모든 프리코딩 벡터를 결합한 통합 프리코딩 벡터를 아래와 같이 정의한다.

$$\bar{\mathbf{f}} = [\mathbf{f}_{1,1}^T, \mathbf{f}_{2,1}^T, \dots, \mathbf{f}_{K,1}^T, \dots, \mathbf{f}_{1,M}^T, \mathbf{f}_{2,M}^T, \dots, \mathbf{f}_{K,M}^T]^T \in \mathbb{C}^{KM \times 1}. \quad (5)$$

그다음, 합 주파수 효율 최대화 문제의 목적함수를 아래와 같이 Rayleigh quotients 의 곱 꼴로 아래와 같이 나타낸다.

$$\gamma(\bar{\mathbf{f}}) = \log_2 \left(\prod_{m=1}^M \prod_{k=1}^K \frac{\bar{\mathbf{f}}^H \mathbf{A}_{k,m} \bar{\mathbf{f}}}{\bar{\mathbf{f}}^H \mathbf{B}_{k,m} \bar{\mathbf{f}}} \right), \quad (6)$$

여기서 $\mathbf{A}_{k,m}$ 와 $\mathbf{B}_{k,m}$ 는 양의 정치행렬로, (7)

$$\mathbf{A}_{k,m} = \mathbf{e}_m \mathbf{e}_m^T \otimes (\mathbf{I}_K \otimes (\mathbf{h}_{k,m} \mathbf{h}_{k,m}^H)) + \frac{\sigma_n^2}{P} \mathbf{I}_{KM}, \quad (7)$$

$$\mathbf{B}_{k,m} = \mathbf{e}_m \mathbf{e}_m^T \otimes ((\mathbf{I}_K - \mathbf{e}_k \mathbf{e}_k^T) \otimes (\mathbf{h}_{k,m} \mathbf{h}_{k,m}^H)) + \frac{\sigma_n^2}{P} \mathbf{I}_{KM}, \quad (8)$$

이때, $\mathbf{e}_m \in \mathbb{Z}^{M \times 1}$ 은 m 번째 성분만 1이고 나머지는 모두 0 인 벡터이고, \otimes 는 Kronecker 곱을 의미한다. 목적함수의 모든 정류 점은 1 차 KKT 조건인 아래의 식을 만족한다.

$$\bar{\mathbf{A}}(\bar{\mathbf{f}}) = \gamma(\bar{\mathbf{f}}) \bar{\mathbf{B}}(\bar{\mathbf{f}}), \quad (9)$$

이때,

$$\bar{\mathbf{A}}(\bar{\mathbf{f}}) = \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \left(\prod_{m=1}^M \prod_{k=1}^K \frac{\bar{\mathbf{f}}^H \mathbf{A}_{k,m} \bar{\mathbf{f}}}{\bar{\mathbf{f}}^H \mathbf{B}_{k,m} \bar{\mathbf{f}}} \right) \mathbf{A}_{k,m}, \quad (10)$$

$$\bar{\mathbf{B}}(\bar{\mathbf{f}}) = \sum_{m=1}^M \sum_{k=1}^K \left(\prod_{m=1}^M \prod_{k=1}^K \frac{\bar{\mathbf{f}}^H \mathbf{B}_{k,m} \bar{\mathbf{f}}}{\bar{\mathbf{f}}^H \mathbf{A}_{k,m} \bar{\mathbf{f}}} \right) \mathbf{B}_{k,m}. \quad (11)$$

1 차 최적성 조건을 만족하는 준최적해 를 구하는 것은 행렬 $\bar{\mathbf{A}}(\bar{\mathbf{f}})$ 와 $\bar{\mathbf{B}}(\bar{\mathbf{f}})$ 가 모두 $\bar{\mathbf{f}}$ 에 비선형적으로 의존하기 때문에 매우 난해한 문제이다. 이는 행렬이 고정되어 있는 표준 일반화 고유값 문제와는 명확히 구별된다. 수학 문헌에서 이러한 문제는 통상적으로 비선형 고유벡터 의존형 고유값 문제라 불린다[3]. 제안하는 광대역 GPIP 알고리즘은 이러한 1 차 최적성 조건을 만족하는 국소 최적 해를 탐색하기 위해 설계된 고정점 반복 기법이다. 광대역 GPIP t 번째 반복단계에서 이전 단계의 프리코딩 벡터 $\bar{\mathbf{f}}^{(t-1)}$ 로 매트릭스 $\bar{\mathbf{A}}(\bar{\mathbf{f}}^{(t-1)})$ 와 $\bar{\mathbf{B}}(\bar{\mathbf{f}}^{(t-1)})$ 를 구성하여 아래와 같이 프리코딩 벡터를 업데이트하고,

$$\bar{\mathbf{f}}^{(t)} = \left(\bar{\mathbf{B}}(\bar{\mathbf{f}}^{(t-1)}) \right)^{-1} \bar{\mathbf{A}}(\bar{\mathbf{f}}^{(t-1)}) \bar{\mathbf{f}}^{(t-1)}, \quad (12)$$

단위 노름 값을 같도록 정규화한다. 알고리즘이 수렴할때까지 복하는 횟수를 J 라 하였을때, 제안하는 방법의 계산복잡도는 $O(JMK^3)$ 이다.

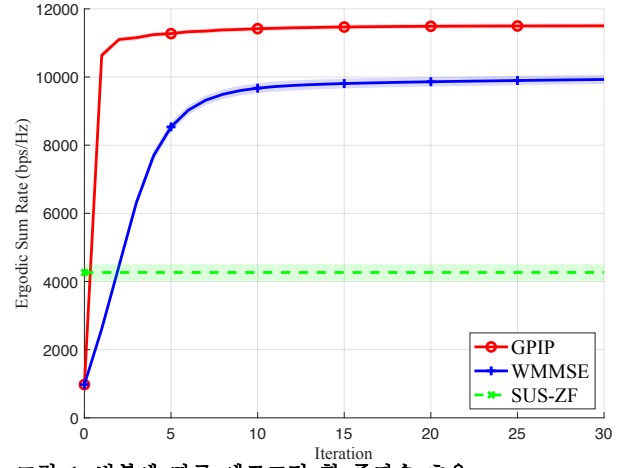


그림 1. 반복에 따른 에르고딕 합 주파수 효율.

IV. 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 간단한 합성채널에 대해서 주파수 효율 최대화 기법의 성능을 관찰한다. 기지국은 8×8 크기의 UPA 를 사용하고, 사용자는 32명, 부반송파는 64 개로 설정하였다. 채널은 4개의 지연탭을 갖는 주파수 선택적 Rayleigh Tapped-Delay-Line 모델을 사용하였다. 전력지연 프로파일은 균등하게 분포한다고 가정하였고, 공간 상관관계는 지수 상관 모델을 사용하여, 공간 공분산 행렬은 $\mathbf{R} = \mathbf{R}_z \otimes \mathbf{R}_y$ 주어지며, 이때, \mathbf{R}_z 와 \mathbf{R}_y 의 (i,j) 번째 원소는 $\rho^{|i-j|}$ 이며, $\rho = 0.5$ 로 설정하였다. 신호대 잡음비 $SNR = P/\sigma_n^2$ 는 40 dB로 설정하였다.

그림 1은 알고리즘의 반복횟수에 따른 에르고딕 합 주파수 효율을 비교한 그래프이다. 음영진 영역은 합주파수의 표준편차를 의미한다. 비교방법으로 SUS-ZF와 WMMSE를 비교하였다. 제안하는 광대역 GPIP와 WMMSE 모두 동일한 MRT precoder를 초기값으로 최적화를 진행하였다. 제안하는 GPIP가 비교 방법 대비 더 높은 합 주파수 효율을 달성하며, 특히 대략 3 번만의 반복으로 비교적 빠르게 수렴하는 것을 관찰하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2026년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2022-NR070834).

참고 문헌

- [1] Z. Wang, J. Zhang, H. Du, D. Niyato, S. Cui, B. Ai, M. Debbah, K. B. Letaief, and H. V. Poor, "A tutorial on extremely large-scale MIMO for 6G: Fundamentals, signal processing, and applications," *IEEE Commun. Surveys & Tut.*, vol. 26, no. 3, pp. 1560–1605, thirdquarter 2024.
- [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, 2019.
- [3] Y. Cai, L.-H. Zhang, Z. Bai, and R.-C. Li, "On an eigenvector-dependent nonlinear eigenvalue problem," *SIAM Journal on Matrix Analysis and Applications*, vol. 39, no. 3, pp. 1360–1382, 2018.