

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

요약

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. 서론

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 차원 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 0이고 분산이 1인 독립 복소 가우시안 분포를

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

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

이 때, $\mathbf{x}_m \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 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, 이 때 $\mathbf{h}_{k,m}$ 는 k 번째 사용자의 m 번째 부반송파에서의 채널이고, $z_{k,m}$ 는 평균 0이고 분산 σ_n^2 인 독립 복소 가우시안 분포를 따른다고 가정한다. 수신단에서 프리코딩된 채널 정보를 완벽히 알고 있다고 가정했을 때, k 번째 사용자의 m 번째 부반송파에서의 SINR 은 아래와 같다.

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

본 논문에서는 송신단에서 채널 정보를 완벽히 알고 있다고 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 할당되어 있는 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.

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

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

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

여기서 $\mathbf{A}_{k,m}$ 와 $\mathbf{B}_{k,m}$ 은 양의 정치행렬로,

$$(7)$$

$$(8)$$

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

$$\begin{aligned} \mathbf{B}_{k,m} &= \mathbf{e}_m \mathbf{e}_m^\top \otimes ((\mathbf{I}_K - \mathbf{e}_{k,j} \mathbf{e}_j^\top) \otimes (\mathbf{h}_{k,m} \mathbf{h}_{k,m}^\top)) \\ &\quad + \frac{\sigma_n^2}{P} \mathbf{I}_{KMN}, \end{aligned} \quad (8)$$

이때, $\mathbf{e}_m \in \mathbb{Z}^{M \times 1}$ 은 m 번째 성분만 1이고 나머지는 모두 0인 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,

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

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

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 반복 단계에서 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 수렴할 때까지 복하는 횟수를 J 라 하였을 때, 제안하는 방법의 계산복잡도는 $O(JMKN^3)$ 이다.

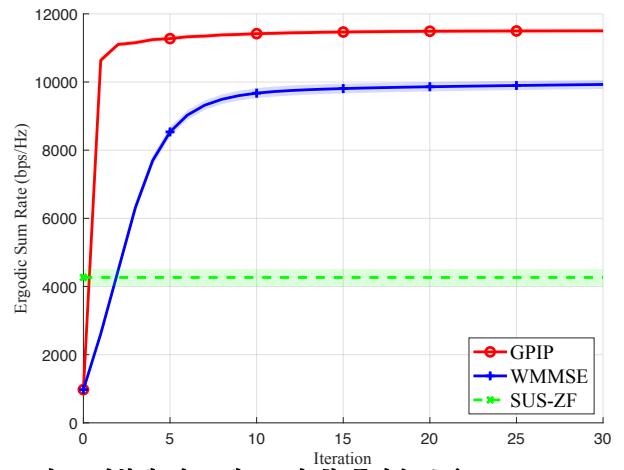


그림 1. 반복에 따른 에르고딕 합 주파수 효율.

IV. 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 간단한 합성채널에 대해서 주파수 효율 최대화 기법의 성능을 관찰한다. 기지국은 8×8 크기의 UPA를 사용하고, 사용자는 32명, 부반송파는 64개로 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 GPIP과 WMMSE 모두 동일한 MRT precoder를 초기값으로 최적화를 진행하였다. 제안하는 GPIP 가 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.