

근거리장 NOMA 시스템을 위한 사용자별 최소 전송률 제약 조건 기반 전력 할당 기법

오민규, 정방철

아주대학교

mkoh@ajou.ac.kr, bcjung@ajou.ac.kr

Power Allocation Technique Based on Minimum Rate Constraint for Near-Field NOMA Systems

Minkyu Oh, Bang Chul Jung

Ajou University

요약

본 논문에서는 근거리장 NOMA 시스템에서 사용자별 최소 요구 전송률을 만족하는 전력할당 기법을 제안한다. 제안 기법은 공통 빔 기준과 자기 빔 기준의 최소 요구 전송률을 각각 정의하고, 각 기준에서 두 유저의 전송률 제약을 동시에 만족하는 전력할당 가능 영역을 도출한다. 특히 자기 빔 기준은 각 유저가 적교 자원에서 단독 서비스될 때의 수신 이득을 반영하므로, 공통 빔 기준보다 실제 단독 서비스 환경에 더 부합한다. 모의실험 결과, 자기 빔 기준을 적용하면 저이득 유저의 최소 요구 전송률이 증가하고, 이에 따라 NOMA 전력할당 가능 영역이 축소됨을 확인하였다.

I. 서론

차세대 통신 시스템에서는 고성능 응용 서비스를 지원하기 위해 초대규모 다중입출력(extremely large-scale multiple-input multiple-output, XL-MIMO)이 주목받고 있다. XL-MIMO 환경에서는 다수의 사용자가 근거리장(near-field) 영역에 위치하게 되며, 이에 따라 구면파 전파 특성을 고려한 다양한 다중안테나 기술이 연구되고 있다 [1]. 또한 비직교 다중접속(non-orthogonal multiple access, NOMA)은 동일 자원에서 다수 사용자 신호를 중첩하여 주파수 효율을 향상시키는 기법으로 연구되어 왔다 [2]. 근거리장 환경에서는 거리 영역의 자유도를 활용할 수 있지만, 빔 분해능이 충분하지 않은 경우 사용자 간 채널 상관도가 높아져 개별 빔 기반 분리가 어려워진다. 이러한 문제를 해결하기 위해 하나의 근거리장 빔을 다수 사용자가 공유하는 근거리장 NOMA가 대안으로 제안되었다 [3]. 근거리장 NOMA에서는 각 유저의 전송률이 사용자별 최소 요구 전송률을 만족해야 한다. 기존 문헌은 이 기준을 NOMA 공통 빔(common beam, CB)으로 계산하지만, 이는 자기 빔(self beam, SB) 기반 단독 서비스 기준을 충분히 반영하지 못한다. 본 논문에서는 최소 전송률 기준에 따른 NOMA 전력할당 가능 영역 변화를 모의실험을 통해 확인하였다.

II. 사용자별 최소 전송률 만족을 위한 전력할당 기법

본 논문에서는 N 개의 안테나를 갖는 ULA 기지국이 두 명의 단일 안테나 유저를 서비스하는 하향링크 근거리장 NOMA 시스템을 고려한다. 유저는 거리 순서에 따라 $r_1 \leq r_2$ 로 인덱싱하며, NOMA 공통 빔은 기존 근거리장 NOMA 분석과 동일하게 근거리 유저 위치 (r_1, ϕ_1) 에 포커싱된 빔 $\mathbf{b}(r_1, \phi_1)$ 으로 설정한다. 단일 가시선 근거리장 채널에서 i 번째 유저의 수신신호는 다음과 같이 표현된다.

$$y_i = \mathbf{h}_i^H \mathbf{b}(r_1, \phi_1) (\sqrt{\alpha} \mathbf{P} u_s + \sqrt{(1-\alpha)} \mathbf{P} u_l) + n_i,$$

여기서 $\mathbf{h}_i$ 는 i 번째 유저의 근거리장 가시선 채널, $\mathbf{P}$ 는 전체 송신 전력, α 는 채널이득이 높은 유저의 전력 비율이다. 또한 u_s 와 u_l 는 각각 채널 이득이 높은 유저와 낮은 유저의 송신 심볼이며, $n_i \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ 는 복소 가우시안 잡음이다. 이때, 근거리장 빔 포커싱 벡터 $\mathbf{b}(r, \phi)$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$[\mathbf{b}(r, \phi)]_n = N^{-1/2} e^{-jk_0(r_n(r, \phi) - r)},$$

$$r_n(r, \phi) = \sqrt{r^2 - 2r \left(n - \frac{N+1}{2} \right) d \sin \phi + \left[\left(n - \frac{N+1}{2} \right) d \right]^2}$$

여기서 $r_n(r, \phi)$ 는 위치 (r, ϕ) 에 존재하는 유저와 n 번째 안테나 사이의 전파 거리이며, r 는 해당 유저와 배열 중심 사이의 거리이다. 또한 d 는 안테나 간격, $k_0 = 2\pi/\lambda$ 는 파수이다.

NOMA 공통 빔에 대한 유효이득을 $g_i^{\text{CB}} = |\mathbf{h}_i^H \mathbf{b}(r_1, \phi_1)|^2$ 로 정의하고, $g_s^{\text{CB}} \geq g_l^{\text{CB}}$ 가 되도록 유저를 정렬한다. 순차적 간섭 제거가 성공적으로 수행된다고 가정하면 NOMA의 합 전송률은 다음과 같다.

$$R_{\text{sum}}^{\text{NOMA}}(\alpha) = \log_2 \left(1 + \frac{\alpha P g_s^{\text{CB}}}{\sigma^2} \right) + \log_2 \left(1 + \frac{(1-\alpha) P g_l^{\text{CB}}}{\alpha P g_l^{\text{CB}} + \sigma^2} \right)$$

이때, 기준 $q \in \{\text{CB}, \text{SB}\}$ 에 따른 유효이득과 사용자별 최소 요구 전송률은 다음과 같이 정의된다.

$$g_i^{\text{CB}} = |\mathbf{h}_i^H \mathbf{b}(r_1, \phi_1)|^2, \quad g_i^{\text{SB}} = |\mathbf{h}_i^H \mathbf{b}(r_i, \phi_i)|^2$$

$$R_i^{\text{req}, q} = \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{P g_i^q}{\sigma^2} \right).$$

$$\mathcal{A}_q = \{ \alpha \in [0, 1] | R_s^{\text{req}, q}(\alpha) \geq R_s^{\text{req}, q}, R_l^{\text{req}, q}(\alpha) \geq R_l^{\text{req}, q} \}$$

III. 모의실험 결과 및 결론

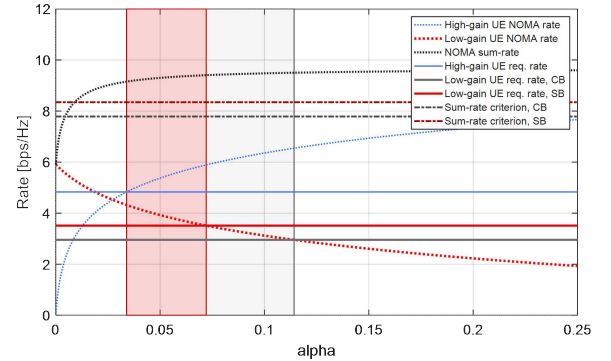


그림 1. 사용자별 최소 요구 전송률 기준에 따른 NOMA 전력할당 가능 영역 비교.

그림 1은 NOMA 전송률과 사용자별 최소 요구 전송률 기준을 도시한 결과이다. 공통 빔 기준에서는 사용자별 최소 요구 전송률을 NOMA 공통 빔 기준으로 계산하므로, 저이득 유저의 요구 전송률이 상대적으로 낮게 설정되며 NOMA가 두 유저의 요구 전송률을 동시에 만족하는 전력할당 가능 영역이 넓게 나타난다. 반면, 자기 빔 기준에서는 각 유저가 자기 위치에 포커싱된 빔으로 단독 서비스되는 경우의 전송률을 최소 요구 전송률로 사용한다. 이 경우 저이득 유저의 요구 전송률이 증가하여, 동일한 NOMA 전송률 곡선에서도 전력할당 가능 영역이 축소된다. 이는 자기 빔 기준이 각 유저가 적교 자원에서 단독 서비스될 때의 수신 이득을 반영하는 보다 현실적인 최소 요구 전송률 기준임을 의미한다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-대형ICT연구센터(ITRC)의 지원(IITP-2026-RS-2024-00436406, 50%) 및 한국연구재단(RS-2026-25489627, 50%)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- [1] Y.-S. Lee, Y. D. Kim, and B. C. Jung, "Continuous-Aperture OAM Communication Systems: An Electromagnetic Information Theory Perspective," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 14, no. 3, pp. 676-680, Mar. 2025.
- [2] J. S. Yeom, H. S. Jang, K. S. Ko, and B. C. Jung, "BER Performance of Uplink NOMA with Joint Maximum-Likelihood Detector," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 68, no. 10, pp. 10295-10300, Oct. 2019.
- [3] Z. Xu, Z. Wu, and L. Dai, "How to Enhance Spectrum Efficiency for Near-Field Communications: From LDMA to NOMA?," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 73, no. 11, pp. 10709-10723, Nov. 2025.