

NOMA 시스템에서 빔포밍 기반 사용자 클러스터링 최적화 기법에 대한 연구

^{1,2}최성균, ³최민혁, ^{1,2}송형규*

¹세종대학교 정보통신공학과, ²세종대학교 지능형드론융합전공, ³세종대학교 전자정보통신공학과
sk4753611@naver.com, alsgurkk@naver.com, *songhk@sejong.ac.kr

A Study on Optimization Techniques for Beamforming-Based User Clustering in NOMA Systems

^{1,2}Seong-Gyun Choi, ³Min-Hyeok Choi, ^{1,2}Hyoung-Kyu Song*

¹Information and Communication Engineering, ²Convergence Engineering for Intelligent Drone,
³Electrical Information and Communication Engineering Sejong University, Seoul, 209 Neungdong-ro,
05006, Korea

요약

본 논문은 Intelligent Reflecting Surface(IRS)와 Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA) 시스템에서 Water-Filling 기법을 적용한 사용자별 전력 할당 알고리즘을 제안한다. IRS는 전파 환경을 능동적으로 제어해 신호 강도를 최적화하는 기술로, NOMA와 결합할 경우 높은 스펙트럼 효율과 더불어 전송 성능을 향상시킬 수 있다. 본 연구는 기존의 고정된 전력 할당 방식이 아닌, 각 사용자의 채널 상태 정보(CSI)에 따라 동적으로 전력을 할당함으로써 시스템 성능을 극대화하는 방안을 모색하였다. 제안된 알고리즘은 Water-Filling 기법을 통해 채널 이득이 높은 사용자에게 더 많은 전력을 할당하고, 낮은 사용자에게는 적은 전력을 할당하는 방식으로 구성된다. 이러한 접근 방식은 각 사용자의 채널 상태에 최적화된 전력 할당을 가능하게 하여 시스템의 비트 오류율(BER)을 개선할 수 있다. 특히 시뮬레이션 결과, 제안된 알고리즘이 기존의 전력 할당 방식과 비교하여 전송 전력 대비 우수한 성능을 보였으며, 저전력 환경에서도 안정적인 성능을 유지하였다. 결과적으로, 본 논문에서 제안한 Water-Filling 기반 전력 할당 알고리즘은 IRS 기반 NOMA 시스템의 전송 성능을 크게 향상시킬 수 있음을 입증하였다. 이는 차세대 통신 시스템에서 효율적인 전력 관리와 자원 할당을 통해 더 높은 통신 품질을 제공할 수 있는 가능성을 시사한다.

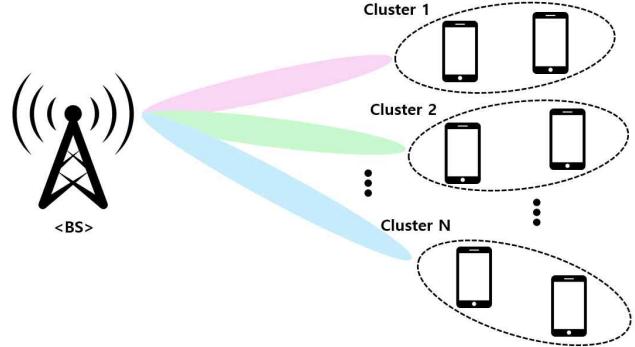
I. 서 론

무선 통신 기술은 5G와 6G와 같은 차세대 네트워크로 발전하면서 점점 더 높은 데이터 전송 속도, 초저지연, 대규모 연결성을 요구한다. 이러한 요구를 충족시키기 위해 다양한 기술이 제안되고 있으며, 그 중 Non-Orthogonal Multiple Access(NOMA) 시스템은 주파수, 시간, 공간 자원을 효율적으로 활용할 수 있는 기술로 주목받고 있다. NOMA는 사용자를 동일한 시간 및 주파수 자원에서 다중화하고, 각 사용자 간 신호를 전력 도메인에서 구별함으로써 스펙트럼 효율을 극대화할 수 있다. 특히 NOMA는 다수의 사용자에게 동시에 서비스를 제공함으로써 대규모 연결 요구사항을 만족시킨다.

기존 연구에서는 NOMA 기반의 사용자 클러스터링 및 빔포밍을 다양한 방식으로 개선하려고 노력해왔다. [1]은 NOMA의 비이상적인 환경을 고려하여 사용자 클러스터링과 자원 할당을 최적화하는 분산형 프레임워크를 제안함으로써 수신기의 감도와 신호 간 간섭을 고려한 현실적인 모델을 도입했다. [2]의 연구에서는 업링크와 다운링크 NOMA 시스템에서 사용자 클러스터링과 전력 할당을 통해 시스템 처리량을 극대화하는 방법을 제안했다. [3]은 mmWave NOMA 시스템에서 계층적 클러스터링 기법을 제안하여, 사용자 그룹 간 간섭을 줄이고 시스템 성능을 개선하였다. 그러나 기존 연구들은 사용자 클러스터링과 빔포밍을 독립적으로 개선하거나, 계산 복잡도가 높은 알고리즘을 제안하여 실시간 처리가 어려운 문제가 발생한다.

본 연구는 이러한 한계를 극복하기 위해 NOMA 시스템에서 빔포밍 기반 사용자 클러스터링 최적화 기법을 제안한다. 사용자 클러스터링과 빔포밍을 통합적으로 최적화하여 스펙트럼 및 에너지 효율성을 극대화하고, 사용자 간 간섭을 최적화함과 동시에 채널 상태 정보(CSI)의 불안정성을 고려해 현실적인 알고리즘을 설계했다.

II. 본론



[그림 1] 시스템 모델

A. 시스템 모델

본 논문에서는 3GPP TR 38.900 표준을 기반으로 하는 채널 보상 알고리즘 및 성능 검증을 수행한다. 채널 모델은 다중 경로와 LOS(Line-of-sight)를 포함하는 SCM 모델을 사용한다. 본 연구에서는 N_t 개의 송신 안테나, N_r 개의 수신 안테나, K 개의 사용자, 그리고 N_d 개의 데이터 스트림을 고려한 MIMO 기반 NOMA 시스템을 모델링했다. 송신 신호는 NOMA의 전력 도메인 다중화를 반영하여 아래와 같이 정의한다.

$$\mathbf{s} = \sqrt{P} \sum_{k=1}^K \alpha_k \mathbf{x}_k, \text{ where } \sum_{k=1}^K \alpha_k = 1 \quad (1)$$

여기서 P 는 송신 전력, α_k 는 k 번째 사용자의 전력 할당 계수, x_k 는 k 번째 사용자의 데이터 벡터를 나타낸다.

B. NOMA-Beamforming 기반 사용자 클러스터링

본 연구에서는 채널 상관성과 사용자 거리 기반으로 사용자 클러스터를 형성한다. 사용자 클러스터링의 목적은 클러스터 내 사용자 간 간섭을 최소화하고, 클러스터 간 간섭을 제어하는 것이다. 클러스터링은 다음 최적화 문제로 정의한다.

$$\max \sum_{(i,j) \in C} \frac{\|\mathbf{h}_i - \mathbf{h}_j\|}{\|d_i - d_j\|}, \text{s.t. } C_k \cap C_l = \emptyset \text{ for } k \neq l \quad (2)$$

사용자 클러스터링 후, 각 클러스터에 대해 ZF(Zero-Forcing) 범포밍을 적용한다. ZF 범포밍은 간섭 제거를 위해 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{W} = (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H \quad (3)$$

여기서 \mathbf{H} 는 클러스터 내 사용자들의 채널 행렬이다.

각 클러스터 내에서 사용자 간 전력 할당은 다음과 같이 설정한다.

$$\alpha_k = \frac{1}{\sum_{j=1}^K \frac{1}{\|\mathbf{h}_j\|}} \quad (4)$$

이로 인해 약한 채널 조건의 사용자에게 더 많은 전력이 할당된다.

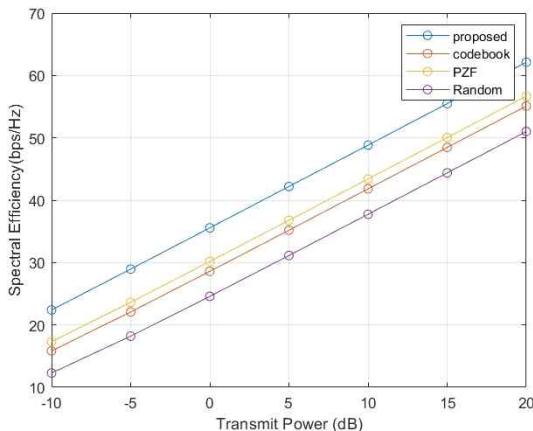
NOMA에서는 SIC(Successive Interference Cancellation)을 통해 사용자 간 간섭을 제거한다. k 번째 사용자의 SINR은 다음과 같이 계산한다.

$$SINR_k = \frac{\alpha_k P \|\mathbf{h}_k \mathbf{w}_k\|^2}{\sum_{j \neq k} \alpha_j P \|\mathbf{h}_k \mathbf{w}_j\|^2 + \sigma^2} \quad (5)$$

(5)의 식을 통해 얻은 사용자 SINR 기반으로 시스템 용량을 계산한다.

$$\text{Capacity} = \sum_{k=1}^K \log_2 (1 + SINR_k) \quad (6)$$

C. 시뮬레이션 결과



[그림 2] Transmit Power에 따른 Capacity 그래프

본 시뮬레이션 결과는 다양한 범포밍 및 사용자 클러스터링 기법의 스펙트럼 효율(Spectral Efficiency)을 전송 전력(Transmit Power)에 따라 비교한 것으로, 제안된 NOMA 기반 범포밍 및 사용자 클러스터링 기법이 다른 기법에 비해 우수한 성능을 보임을 명확히 보여준다. 제안된 기법은 낮은 전송 전력(-10 dB)에서도 약 25 bps/Hz의 스펙트럼 효율을 달성하며, 높은 전송 전력(20 dB)에서는 약 65 bps/Hz에 도달하여 모든 전력 범위에서 가장 높은 성능을 기록했다. 이는 사용자 클러스터링 과정에서 채널 이득 차이를 극대화하고, 범포밍을 통해 클러스터 내 간섭을 효과적으로 억제함으로써 얻어진 결과로 분석된다. 반면, Codebook 기법은 상

대적으로 안정적인 성능을 보이며 -10 dB에서 22 bps/Hz, 20 dB에서 60 bps/Hz를 기록하였으나, 사용자 동적 특성을 충분히 반영하지 못해 제안된 기법에 비해 낮은 성능이 나타났다. PZF(Partial Zero-Forcing) 기법은 간섭 억제를 목적으로 하지만 클러스터 간 간섭 문제를 완전히 해결하지 못해 -10 dB에서 18 bps/Hz, 20 dB에서 55 bps/Hz로 제한적인 성능을 보였으며, Random 기법은 최적화되지 않은 사용자 클러스터링과 범포밍의 한계로 인해 모든 전송 전력 범위에서 가장 낮은 성능(-10 dB에서 12 bps/Hz, 20 dB에서 45 bps/Hz)을 기록했다. 종합적으로, 제안된 기법은 스펙트럼 효율과 간섭 억제 측면에서 기존 기법을 뛰어넘는 우수한 성능을 제공하며, 이는 차세대 무선 통신 시스템에서 스펙트럼 자원의 효율적 활용과 시스템 성능 향상에 크게 기여할 수 있음을 시사한다.

III. 결론

본 연구에서는 NOMA 기반의 범포밍과 사용자 클러스터링 기법을 통합적으로 최적화하여 차세대 무선 통신 시스템에서 스펙트럼 효율과 에너지 효율을 극대화하는 방법을 제안했다. 제안된 기법은 사용자 간 채널 이득 차이를 활용한 효과적인 클러스터링과 ZF(Zero-Forcing) 범포밍을 결합하여 클러스터 내 간섭을 최소화하고, 클러스터 간 간섭을 억제함으로써 기존 Codebook, PZF 및 Random 기법 대비 뛰어난 성능을 보여준다. 시뮬레이션 결과, 제안된 기법은 낮은 전송 전력에서도 안정적으로 높은 스펙트럼 효율을 유지하였으며, 높은 전송 전력 환경에서는 최대 65 bps/Hz의 성능을 기록하며 모든 전송 전력 범위에서 우위를 점하였다. 이러한 결과는 제안된 기법이 차세대 네트워크의 핵심 요구사항인 대규모 연결성, 고속 데이터 전송, 및 효율적 자원 활용을 충족하는 데 크게 기여할 수 있음을 입증한다. 향후 연구에서는 실제 환경에서의 구현 가능성과 다양한 채널 조건 및 사용자 특성을 반영한 확장된 시뮬레이션을 통해 제안된 기법의 범용성을 더욱 검증할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 지원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2020R1A6A1A03038540)

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 정보통신방송혁신인재양성(메타버스융합대학원)사업 연구 결과로 수행되었음 (IITP-2024-RS-2023-00254529)

본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 대학ICT연구센터사업의 연구결과로 수행되었음(IITP-RS-2024-00438007)

참고 문헌

- Celik, A., Tsai, M. C., Radaydeh, R. M., Al-Qahtani, F. S., & Alouini, M. S. (2019). Distributed user clustering and resource allocation for imperfect NOMA in heterogeneous networks. IEEE Transactions on Communications, 67(10), 7211-7227.
- Ali, M. S., Tabassum, H., & Hossain, E. (2016). Dynamic user clustering and power allocation for uplink and downlink non-orthogonal multiple access (NOMA) systems. IEEE access, 4, 6325-6343.
- Marasinghe, D., Jayaweera, N., Rajatheva, N., & Latva-Aho, M. (2020, March). Hierarchical user clustering for mmwave-NOMA systems. In 2020 2nd 6G Wireless Summit (6G SUMMIT) (pp. 1-5). IEEE.