

Rician 채널 환경에서 고정전송률 상향링크 NOMA를 위한 Dumb 안테나를 활용한 다중사용자 스케줄링

장민재, 강민철, 김준수, 김수민*
한국공학대학교

E-mail: {jang665, swrkdalscjf, junsukim, *suminkim}@tukorea.ac.kr

Fixed-Rate Multi-User Scheduling Using Dumb Antennas for Uplink NOMA over Rician Channels

Min Jae Jang, Min Chul Kang, Junsu Kim, Su Min Kim*
Tech University of Korea

요약

본 논문에서는 LoS 가 보장된 Rician 채널 환경에서 IoT 응용을 위한 고정 전송률 (fixed-rate) 상향링크 비직교 다중접속 (NOMA) 사용자 스케줄링 기법을 제안한다. 순차간섭제거 (SIC) 기반 상향링크 NOMA 에서 강한 LoS 성분을 갖는 라이시안 환경일 때는 사용자 간 채널 이득 분포가 집중되어 스케줄링 효율이 저하되는 문제가 발생한다. 이를 해결하기 위해, 본 논문에서는 사용자 단말에 유무 dumb 안테나를 활용하여 실효 채널 이득의 분포를 확대하여 동시에 스케줄링 인원을 증가시켜 합전송률 (sum-rate)을 향상시킨다. 시뮬레이션 결과, 제안 방식이 단일 안테나 라이시안 채널 환경 대비 평균 합전송률 및 스케줄링 가능한 사용자 수 측면에서 유의미한 성능 향상을 달성함을 확인하였다.

I. 서 론

비직교 다중접속 (NOMA)은 동일한 시간 주파수, 공간 차원 상에서 다수의 사용자 신호를 동시에 전송하고, 수신단에서 순차간섭제거 (SIC)를 통해 신호를 단계적으로 복호 및 분리하는 방식으로 차세대 다중접속 기술로 주목받고 있다 [1]. 상향링크 NOMA 에서 SIC 가 성공적으로 동작하기 위해서는 복호 단계에서 해당 사용자가 요구 전송률을 만족할 수 있는 충분한 신호대간섭음비 (SINR)를 확보해야 한다. 그러나 다수 사용자가 동시에 전송하는 환경에서는 사용자 간 간섭이 누적되어 일부 사용자가 요구 전송률을 만족하지 못해 수신 성능이 저하될 수 있다 [1]. 이러한 이유로, SIC 간섭제거의 안정성을 고려한 사용자 스케줄링은 상향링크 NOMA 의 전송률 성능을 결정하는 핵심 요소로 작용한다. 한편, 강한 기사선 (LOS) 성분을 포함하는 Rician 채널 환경에서는 Rayleigh 채널에 비해 사용자 간 채널 이득 분포의 분산이 감소하는 경향이 있으며, 이로 인해 사용자 스케줄링에서 선택 가능한 사용자 조합의 다양성이 제한될 수 있다. 예를 들어, 자동형 반사표면 (IRS) 도움 다중사용자 스케줄링 기준 연구에서는 IRS 를 경유한 채널이 주로 LoS 기반의 Rician 채널 특성을 갖기 때문에 다중사용자 디버시티 이득이 제한적임이 확인되었다 [2]. Dumb 안테나를 이용한 기회주의 적 범포밍 기술은 복잡한 채널 상태정보 피드백 없이, 랜덤 위상 및 전력 분할로 실효 채널 이득 분포의 분산을 확대시키는 단순하면서도 효과적인 안테나 방법으로 알려져 있다 [3]. 본 논문에서는 이러한 dumb 안테나 특성을 활용하여 Rician 채널 환경에서 사용자 실효 채널 이득 분포를 퍼뜨림 (spreading)으로써 상향링크 NOMA 다중사용자 스케줄링에 유리한 채널 환경을 형성하여 합 전송률 성능을 향상하는 기법을 제안한다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 하나의 기지국과 고정전송률 (fixed-rate) 요구도를 갖는 K 명의 단순한 IoT 사용자로 구성된 상향링크 NOMA 시스템을 고려한다. 기지국은 단일 안테나, 각 사용자 단말은 N 개의 안테나를 갖는다. 사용자 단말은 각 안테나에 대해 전력 분할 계수 $\alpha_{n,k}$ 와 위상 $e^{j\phi_{n,k}}$ 를 조절해 신호를 전송한다. 여기서 $\sum_{n=1}^N \alpha_{n,k} = 1$ 이며, $j\phi_{n,k}$ 는 $[0, 2\pi)$ 에서 균일 분포를 따른다. 따라서 기지국에서 수신하는 상향링크 신호는 동시에 스케줄링된 사용자들의 신호를 합산한 형태로 나타낼 수 있다.

$$y = \sum_{k=1}^{|K|} \sum_{n=1}^N (\sqrt{\alpha_{n,k}} e^{j\phi_{n,k}} h_{n,k}) x_k + n = \sum_{k=1}^{|K|} \lambda_k x_k + n, \quad (1)$$

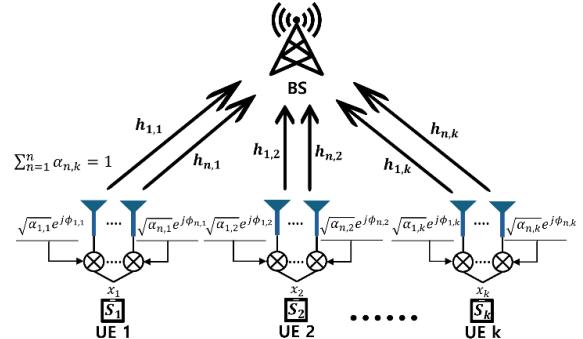


그림 1. Dumb 안테나를 가진 상향링크 NOMA 시스템

여기서 \tilde{K} 는 스케줄링된 사용자 집합, x_k 는 k 번째 사용자의 송신신호, λ_k 는 k 번째 사용자의 실효 채널 $h_{k,1}, h_{k,2}$ 는 사용자 k -기지국 간 채널 계수, n 은 평균 0, 분산 σ^2 인 백색 가우스 잡음을 나타낸다.

III. 제안 Dumb 안테나를 활용한 상향링크 NOMA 다중사용자 스케줄링 기법

SIC 기반 상향링크 NOMA 시스템에서는 각 사용자가 자신의 메시지를 성공적으로 복호하기 위해 요구 전송률을 만족하는 최소 수준의 수신 신호 품질을 확보해야 한다. 이 때 중요한 요소는 개별 사용자의 신호 품질 자체보다도 사용자 집합 전반에 걸친 수신 신호 전력의 분포 형태이다. 사용자 간 채널 이득이 넓은 범위에 걸쳐 분산되어 있을 경우, 작은 신호세기부터 큰 신호세기까지 요구 전송률에 맞추어 다수 사용자들을 단계적으로 퍼킹할 수 있어 SIC 과정에서의 누적 간섭을 효과적으로 제어할 수 있다. 반면, 채널 이득이 특정 영역에 집중될 경우 다중사용자 NOMA 스케줄링에서 선택 가능한 사용자 조합의 다양성이 감소하며, 이는 스케줄링 가능한 사용자 수를 제한하는 요인으로 작용한다.

강한 LoS 성분을 포함하는 Rician 채널 환경에서는 Rayleigh 채널에 비해 사용자 간 채널 이득 분포가 상대적으로 LoS 채널로 집중되는 경향이 있으며, 이로 인해 스케줄링에서 사용자 간 채널 이득 차이가 감소한다 [2]. 이러한 채널 이득의 분산 감소는 동일한 스케줄링 기법 하에서도 전송률 성능이 채널 환경에 따라 크게 달라질 수 있음을 의미한다.

본 논문에서는 이러한 문제를 완화하기 위해 상향링크 NOMA 시스템에서 사용자 단말에 dumb 안테나를 활용하여 큰 복잡도 증가 없이

Rician 채널 환경에서의 실효 채널 이득 분포를 퍼뜨리는 (spreading) 방법을 제안한다. Dumb 안테나 기술은 복잡한 채널 상태 정보 피드백이나 빔포밍 없이, 각 안테나에 랜덤한 위상과 전력 분할을 적용하여 다중 안테나 채널 성분을 결합하는 단순한 구조이지만 사용자별 실효 채널 이득은 확률적으로 더 큰 변동성을 가지게 되며, 단일 안테나 기반 Rician 채널에 비해 수신 전력의 분포 범위가 넓어지게 된다. 이 때, 랜덤 위상 및 전력 분할에 따라 k 번째 사용자의 실효 채널 이득은 다음 범위 내에서 변화한다.

$$0 \leq |\lambda_k|^2 \leq \sum_{n=1}^N |h_{n,k}|^2, \quad (2)$$

이러한 채널 이득의 분산 퍼짐은 사용자 간 채널 이득 차이를 인위적으로 증대시키고 NOMA 사용자 스케줄링에서 선택 가능한 사용자 조합의 다양성을 높인다. 결과적으로, 제안하는 dumb 안테나 활용 상향링크 NOMA 사용자 스케줄링 기법은 Rician 환경에서 관찰되는 스케줄링 성능 저하를 효과적으로 완화시킨다.

매 상향링크 프레임 시작에서 각 사용자는 기지국으로 파일럿 신호를 전송하고, 기지국은 이를 사용자별로 순차적으로 수신하여 각 사용자의 수신전력을 추정한다. 추정된 수신전력을 바탕으로, 기지국은 요구 전송률을 만족하는 사용자들 중 수신전력이 가장 작은 사용자를 우선적으로 선택하여 최우선 스케줄링한다. 선택된 사용자는 SIC 복호 순서상 가장 마지막에 복호되며, 이후에 스케줄링되는 사용자들에게는 간섭으로 작용한다. 기지국은 선택된 사용자의 신호 전력을 누적 간섭에 반영한 후, 업데이트된 간섭량으로 동일한 기준을 적용하여 다음 사용자를 선택한다. 즉, 각 단계마다 현재 누적 간섭을 고려하여 요구 전송률을 만족하는 사용자 집합을 다시 형성하고 그 중 수신 전력이 가장 작은 사용자를 선택하는 과정을 반복한다. 이러한 스케줄링 절차는 누적 간섭의 증가로 인해 더 이상 요구 전송률을 만족할 수 있는 사용자가 존재하지 않을 때 종료된다. 결과적으로, 제안 스케줄링 방식은 SIC 과정에서 간섭으로 인한 복호 실패를 방지하기 위해 각 단계에서 요구 전송률 조건을 엄격히 민족시키는 사용자만을 선택하면서도, 주어진 채널 환경에서 동시에 스케줄링 가능한 사용자 수를 최대화하게 된다. 사용자 스케줄링이 완료된 이후, 기지국은 선택된 사용자 집합에 대한 스케줄링 정보를 브로드캐스트하고, 해당 사용자들은 동일 자원 상에서 NOMA 데이터 전송을 수행한다.

IV. 성능평가

본 논문에서는 상향링크 NOMA 환경에서 dumb 안테나를 활용한 제안 사용자 스케줄링 기법의 성능을 평균 합전송률 (sum-rate)로 평가한다. 성능 비교는 Rician 채널 환경에서 단일 안테나 (Single), 안테나 2 개 (Dumb, $N = 2$), 안테나 4 개 (Dumb, $N = 4$)인 경우에 대해서 살펴보고 Rayleigh 채널 환경에서의 성능을 다중사용자 디버시티 (multiuser diversity) 관점에서의 성능 상한으로 간주하여 참고로 비교한다.

다중사용자 스케줄링 이득을 살펴보는 것에 초점을 맞추어 채널 모델은 소규모 (small-scale) 페이딩만 고려하고, 모든 채널은 K_f Rician 인자를 가진 Rician 채널을 겪는 것으로 한다. 이 때, $K_f = 0$ 이면 Rayleigh 채널이 된다. 각 사용자의 요구 고정전송률 (fixed-rate)은 0.5 bps/Hz, SNR = 10(dB), 전력 분할 비율 $\alpha_{n,k}$ 은 $\sum_{n=1}^N \alpha_{n,k} = 1$ 인 균등 분포, 안테나 위상 $e^{j\phi_{n,k}}$ 은 $[0, 2\pi]$ 구간에서 균등 분포로 랜덤하게 설정한다. 총 시뮬레이션 터임슬롯의 수는 100,000 으로 설정한다.

그림 2 는 전체 사용자 수 K 와 Rician 인자 K_f 변화에 따른 스케줄링된 사용자들의 합 전송률을 보여준다. 그림 2(a)는 $K_f = 10$ 일 때, 전체 사용자 수 K 를 증가시켜 평균 합전송률을 비교한 것이다. 기본적으로 다중사용자 이득으로 인해 사용자 수가 증가함에 따라 평균 합 전송률이 증가하는 경향을 갖는다. Rayleigh 채널이 Rician 보다 더 긴 꼬리 (tail) 분포를 가지기 때문에 Rayleigh 단일 안테나 경우에 가장 높은 합전송률을 성취한다. Rician 채널 환경에서 제안 Dumb 기법들에서는 사용자 수가 증가할수록 사용자 집합 전반에 걸쳐 수신 신호 전력의 분포가 보다 넓은 범위로 퍼뜨려지기 때문에 단일 안테나 경우 대비 더 높은 합전송률을 성취한다. 이러한 채널 이득 분포의 확대는 NOMA 스케줄링에서 선택 가능한 사용자의 수를 증가시키며, 안테나 수가 늘어날수록 그 효과가 더 커진다.

그림 2(b)는 $K = 20$ 일 때, Rician 인자 K_f 를 변화시키며 평균 합 전송률을 비교한 것이다. 전반적으로 K_f 가 증가함에 따라 모든 Rician 채널에서 평균 합 전송률이 감소하는 경향을 확인할 수 있다. 이는 K_f 가 커

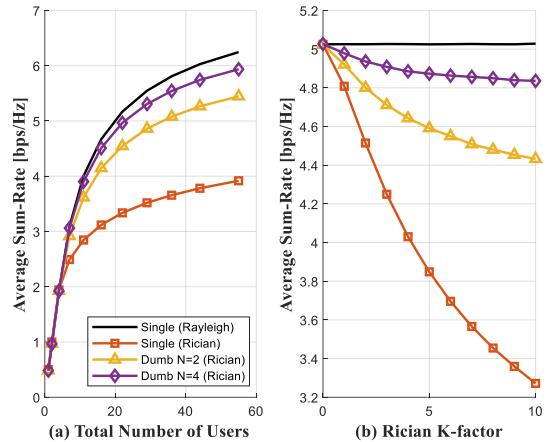


그림 2. 평균 합전송률: (a) 사용자 수, (b) Rician K_f 인자

질수록 LoS 성분이 지배적으로 작용하여 사용자 간 채널 이득 분포가 점점 특정 값 주변으로 집중되기 때문이다. 이러한 채널 이득 분포의 분산 감소는 NOMA 사용자 스케줄링에서 필요한 사용자 간 채널 이득 차이를 줄여 스케줄링 가능한 사용자 수를 줄인다. 반면 Rayleigh 채널은 $K_f = 0$ 인 경우에 해당하므로 K_f 변화에 영향을 받지 않아 전체 구간에서 동일한 값으로 유지된다. 제안 Dumb 기법에서 $N = 2$ 인 경우가 $N = 4$ 보다 K_f 증가에 따른 성능 저하가 더 빠르게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는 안테나 수가 적을 경우 랜덤 위상 결합으로 생성되는 실효 채널 이득의 변동성이 제한적이기 때문이다. 반면, 안테나 수가 증가할수록 랜덤 결합으로 인한 채널 이득 분포의 퍼뜨려짐 효과가 크게 유지되어 K_f 증가에 따른 성능 저하가 완만해진다.

V. 결론

본 논문에서는 각 사용자가 고정전송률을 전송을 요구하는 상향링크 NOMA 시스템에서 Rician 채널 특성으로 인한 사용자 스케줄링 성능 저하 문제를 개선하기 위한 dumb 안테나 활용 다중사용자 NOMA 스케줄링 기법을 제안하였다. Rician 환경에서는 강한 LoS 성분으로 인해 사용자 간 채널 이득 분포가 집중되어 NOMA 사용자 스케줄링의 합전송률 성능이 저하된다. 반면 제안 기법은 사용자 단말에 다수의 dumb 안테나를 활용하여 랜덤 위상 및 전력 결합을 통해 실효 채널 이득의 분포를 인위적으로 퍼뜨린다. 시뮬레이션 결과, dumb 안테나를 활용한 경우 사용자 수 증가에 따라 채널 이득 분포의 분산 확장 효과로 인해 단일 안테나 경우보다 더 많은 사용자를 동시에 스케줄링 할 수 있음을 확인하였다. 또한 Rician K_f 인자가 증가함에 따라 단일 안테나 방식의 성능은 급격하게 저하되는 반면 제안 dumb 안테나 기반 방식은 성능 저하를 효과적으로 완화함을 보였다. 향후 연구에서는 본 논문에서 제안 dumb 안테나 활용 스케줄링 기법을 대표적인 강한 LoS 환경인 IRS 도움 상향링크 NOMA 환경에 적용하여 성능을 분석하고 새로운 기법을 제안할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 과학기술정보통신부의 재원으로 정보통신기획평가원-학석사 연계 ICT 핵심인재 양성(IITP-2026-RS-2022-00156326, 100%)의 지원을 받아 수행된 연구임.

참 고 문 헌

- [1] L. Dai, B. Wang, Z. Ding, Z. Wang, S. Chen, and L. Hanzo, "A Survey of Non Orthogonal Multiple Access for 5G," *IEEE Commun. Surv. & Tut.*, vol. 20, no. 3, pp. 2294–2323, 3rd Quart. 2018.
- [2] M. C. Kang, J. Kim, and S. M. Kim, "User scheduling for sum-rate maximization in IRS-assisted uplink non-orthogonal multiple access with IoT applications," in Proc. *IEEE ICUFN*, July 2025.
- [3] P. Viswanath, D. N. C. Tse, and R. Laroia, "Opportunistic beamforming using dumb antennas," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 48, no. 6, pp. 1277–1294, June 2002.