

근거리장 채널에서의 STAR-RIS 지원 다중안테나 상향링크 시스템

오승현, 김윤희

경희대학교 전자정보융합공학과

{ohioandy99, yheekim}@khu.ac.kr

요약

본 논문은 STAR-RIS (simultaneously transmitting and reflecting-reconfigurable intelligent surface)에 의해 유도되는 근거리장 (near-field) 채널의 거리-각 자유도가 기지국 다중 수신 안테나 지원 NOMA (non-orthogonal multiple access)와 SDMA (space division multiple access) 시스템의 최적화된 성능에 미치는 영향을 살펴본다.

I. 서론

6세대 무선통신에서 전방위 커버리지를 제공하면서 가시성을 (line of sight) 확보할 수 있는 STAR-RIS (simultaneously transmitting and reflecting-reconfigurable intelligent surface) 활용 연구가 주목을 받고 있다 [1]. 전파 환경을 재구성하는 RIS는 저비용으로 링크 품질을 개선하지만, 사용자-RIS-기지국의 연결 채널의 곱셈 경로 손실을 보상하기 위해 대규모 배열을 도입하여야 한다. 이 경우 기존의 평면파 특성의 원거리장과 달리 구면파 특성의 근거리장 채널 특성을 보이는 영역이 확대되면서 거리-각 자유도가 생겨 성능 특성이 다르게 된다. 선행 연구에서는 에너지 분할 STAR-RIS 활용 상향 링크에서 기지국 수신 안테나가 하나일 때 NOMA 성능을 살펴보았다 [2]. 한편, 다중 기지국 수신 안테나에 대해 SDMA 성능 최적화 연구를 제안하였으나 [3], NOMA는 고려하지 않았다. 본 논문은 다중 기지국 안테나 환경에서 STAR-RIS에 의해 근거리장 채널이 유도될 경우 NOMA와 SDMA 성능을 살펴본다.

II. 시스템 모형과 최적화 방법

본 논문에서는 STAR-RIS 지원 다중 사용자 상향링크 시스템을 고려한다. 기지국(BS)은 STAR-RIS 지원으로 K 명의 사용자와 통신하며, 이때 BS는 M 개의 수신 안테나, 사용자 단말은 단일 안테나, STAR-RIS는 N 개의 소자로 구성되며 에너지 분할 모드를 따른다.

BS-사용자 직접 경로 채널은 없으며, BS와 STAR-RIS 사이 채널은 $\mathbf{G} \in \mathbb{C}^{M \times N}$, STAR-RIS와 사용자 k 채널은 $\mathbf{f}_k \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 로 나타낸다. 이때 채널 \mathbf{G} 는 라이시안 페이딩, $\mathbf{f}_k = \sqrt{\omega_{f_k}} \tilde{\mathbf{f}}_k$ 는 근거리장 채널로 모델링하며, 여기서 ω_{f_k} 는 경로손실이고 STAR-RIS의 n 번째 원소와 사용자 k 의 위치를 각각 $\mathbf{q}_n^{\text{ST}}, \mathbf{q}_k$ 이라 할 때 해당 채널 응답은 다음과 같다.

$$[\tilde{\mathbf{f}}_k]_n = \exp(-j \frac{2\pi}{\lambda} \|\mathbf{q}_n^{\text{ST}} - \mathbf{q}_k\|) \quad (1)$$

여기서 $\lambda = 3 \times 10^8 / f_c$ 는 반송파 파장 길이이고 f_c 는 반송파 주파수이다. 모든 사용자가 동일한 시간-주파수 자원에서 동시에 전송할 때, BS의 수신 신호는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\mathbf{y} = \sum_{k=1}^K \sqrt{p_k} \mathbf{H}_k \boldsymbol{\theta}_{s(k)} x_k + \mathbf{n}, \quad \mathbf{n} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \sigma^2 \mathbf{I}_M) \quad (2)$$

여기서 $\mathbf{H}_k = \mathbf{G} \text{diag}(\mathbf{f}_k)$ 는 사용자 k 에서 STAR-RIS 경유, BS으로의 채널을 나타내며, p_k 와 x_k 는 각각 사용자 k 의 송신 전력과 전송 심볼을 의미한다. BS는 사용자별 선형 결합기 \mathbf{w}_k 를 적용하고, 순차간섭제거 (successive interference cancellation: SIC)로 복호한다 [2]. 이때 사용자

k 의 수신 SINR은 $\gamma_k = \frac{p_k \mathbf{w}_k^H \mathbf{H}_k \boldsymbol{\theta}_{s(k)} \mathbf{H}_k^H \mathbf{w}_k}{\sum_{i \in \mathcal{U}_k} p_i \mathbf{w}_k^H \mathbf{H}_i \boldsymbol{\theta}_{s(i)} \mathbf{H}_i^H \mathbf{w}_k + \sigma^2 \|\mathbf{w}_k\|^2}$ 로 주어지며, \mathcal{U}_k 는 k 보다

나중에 복호되어 아직 제거되지 않은 간섭 사용자 집합이다. 달성 가능한 합 전송률은 $R_{\text{sum}} = \sum_{k=1}^K \log_2(1 + \gamma_k)$ 이다. 이 때, SIC를 적용하지 않으면

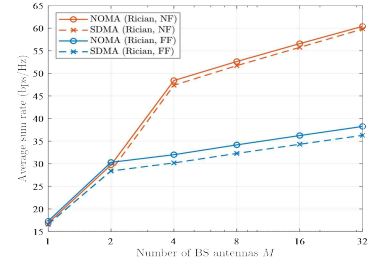


그림 1 $K=4$, $N=128$ 일 때 기지국 안테나 수에 따른 시스템 합 전송률. SDMA 성능이 얻어진다.

고려한 시스템의 합 전송률 최대화 문제는 다음과 같다.

$$\max_{\mathbf{p}, \mathbf{w}, \boldsymbol{\theta}} R_{\text{sum}} = \sum_{k=1}^K \log_2(1 + \gamma_k) \quad (3a)$$

$$\text{s.t.} \quad |\theta_{t,n}|^2 + |\theta_{r,n}|^2 \leq 1, \quad \forall n, \quad (3b)$$

$$0 \leq p_k \leq P_{\text{max}}, \quad \forall k, \quad (3c)$$

$$\mathbf{w}_k \neq \mathbf{0}, \quad \forall k, \quad (3d)$$

문제 (3)는 비선형, 비볼록이므로 분수 계획 (fractional programming)과 교대 최적화 기반으로 해를 구한다 [2]. 이 때 목적 함수를 라그랑지 듀얼 변환과 2차 (quadratic) 변환으로 동등한 함수를 얻고, STAR-RIS 계수, 사용자 전력, 수신 빔포밍, 보조 변수를 돌아가며 최적화한다.

III. 실험 결과

모의실험을 위해 $K=4$, $N=128$, $f_c=3\text{GHz}$, $p_k=23\text{ dBm}$, $\sigma^2=-100\text{ dBm}$ 으로 설정하였고 BS와 STAR-RIS는 각각 (8.35, 6.68, 5) m와 (0, 0, 0) m에 고정하였다. 사용자 위치는 라이시안 채널 \mathbf{G} 의 비가시 경로 수는 $L=4$ 로 설정하였고, 사용자와 STAR-RIS 사이 채널 \mathbf{f}_k 는 근거리장 채널과 (NF) 원거리장 채널로 (FF) 모델링 한 경우를 비교하였다. 기지국 수신 안테나 수 M 이 커질수록 \mathbf{G} 채널의 자유도가 증가하고, 또한 근거리장 채널이 제공하는 거리-각 자유도 증가로 사용자 간 채널이 서로 직교하게 되므로 수신 안테나 수가 커질수록 NF와 FF의 성능 격차가 더욱 커진다. 또한, SDMA 대비 NOMA 성능이 일관되게 좋으나, 성능 이득은 NF 채널에서 작아지며, 이는 NF 채널의 특성에 의해 사용간 채널 상관성이 낮아져 간섭이 적어지기 때문이다.

ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the National Research Foundation of Korea (NRF) under Grant RS-2025-16-067576 and by the Institute for Information & Communications Technology Planning & Evaluation (IITP) under the Information Technology Research Center (ITRC) support program (IITP-RS-2021-II212046), funded by the Ministry of Science and ICT (MSIT), Korea.

참고 문헌

- [1] M. Ahmed, et al., "A survey on STAR-RIS: Use cases, recent advances, and future research challenges," *IEEE Internet Things J.*, vol. 10, no. 16, pp. 14689-14711, Aug. 2023.
- [2] S. H. Oh, et al., "Low-Complexity Optimization for Near-Field STAR-RIS Uplink NOMA," 2024 15th Int. Conf. Inf. Commun. Technol. Convergence (ICTC), Jeju Island, Korea, Republic of, Oct. 2024.
- [3] S. H. Oh, et al., "Uplink multiuser SIMO empowered by extremely large STAR-RIS," in *Proc. IEEE Veh. Technol. Conf.*, Oslo, Norway, Jun. 2025.