

MU-MISO 다운링크에서 간섭 억제 기반 그룹 On-Off RIS의 에너지 효율 분석

^{1,3} 정혜윤, ² 김승한, ² 서동우, ² 피재현, ^{1,3} 송형규*

¹ 세종대학교 정보통신공학과, ² 세종대학교 전자정보통신공학과, ³ 세종대학교 지능형드론융합전공
zalfenz@sju.ac.kr, justin5929@naver.com, pinepoetry@naver.com, pi630@naver.com,
*songhk@sejong.ac.kr

Energy Efficiency Analysis of Interference-Mitigation-Based Group On-Off RIS for MU-MISO Downlink

^{1,3}Jeong Hye Yoon, ²Kim Seung Han, ²Seo Dong Woo, ²Pi Jae Hyun, ^{1,3}Song Hyung Kyu*

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

요약

본 논문은 8x8 기반 MU-MISO(MultiUser-MultiInputSingleOutput) 다운링크에서 Always-On RIS(Reconfigurable Intelligent Surface)와 간섭 억제 기반 그룹 On-Off RIS를 비교하여 에너지 효율 중심의 운용 전략을 분석한다. 간섭 억제 기반 RIS는 후보 그룹 조합을 간단한 프록시 지표로 선택한 뒤 선택된 활성 소자에서만 위상을 최적화함으로써, 평균 SINR(Signal-to-Interference-plusNoise Ration)이 소폭 감소하더라도 RIS 소모전력을 줄여 전 구간에서 더 높은 에너지 효율을 달성하였다. 또한 BER(Bit Error Rate)은 전송 전력 증가에 따라 두 모델 모두 빠르게 감소하며 고전력 영역에서는 성능 차이가 제한적이었다. 결과적으로 제안한 그룹 기반 RIS 제어는 링크 성능 저하를 최소화하면서 에너지 효율을 개선하는 실용적 대안임을 확인하였다.

I. 서론

6G 환경에서 RIS는 전파 환경을 능동적으로 제어해 링크 품질을 개선할 수 있는 핵심 기술로 주목받고 있으나, 대부분의 기존 연구는 모든 반사 소자를 항상 활성화(Always-On)하는 이상적 가정에 기반해 실제 구현에서 발생하는 소자 구동 및 제어 회로 전력 소모를 충분히 반영하지 못한다. 특히 다중 사용자 환경에서는 사용자 간 간섭까지 고려해야 하므로 단순 위상 최적화만으로는 에너지 효율(Energy Efficiency, EE) 관점의 최적 운용이 어렵다. 본 논문은 MU-MISO 다운링크에서 그룹 단위 RIS On-Off 제어를 통해 간섭을 억제하면서 RIS 전력 소모를 절감하는 전략을 제시하고, Always-On RIS 대비 후보 조합을 프록시 지표로 선택한 뒤 선택된 활성 소자에서만 위상 최적화를 수행하는 방식의 효율성을 평가한다.

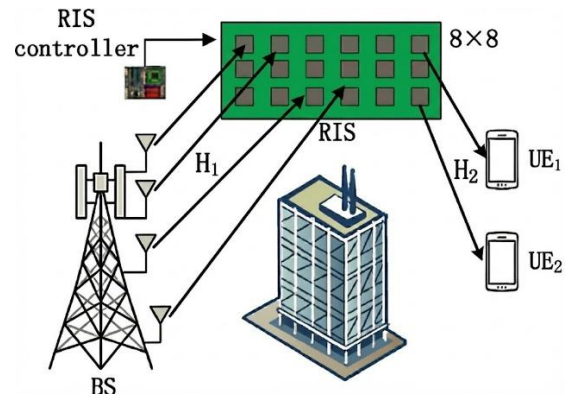
II. 본론

2.1. 시스템 모델

본 논문은 RIS가 보조하는 MU-MISO 다운링크를 고려한다. BS(Base Station)는 $N_t = 4$ 개의 송신 안테나로 $K = 2$ 명의 단일 안테나 UE(User Equipment)에 QPSK 변조 기법을 사용해 동시 전송하며 RIS는 8×8 UPA 로 총 $N = 64$ 개 반사 소자를 가진다. 시스템은 대역폭 $B = 10\text{MHz}$ 와 슬롯 길이 $T_{\text{slot}} = 1\text{ms}$ 에서 동작한다. BS-RIS 채널 $\mathbf{H}_1 \in \mathbb{C}^{N \times N_t}$, RIS-UE 채널 $\mathbf{H}_2 \in \mathbb{C}^{K \times N}$ 는 Rician 페이딩을 따른다. RIS는 대각 행렬 $\boldsymbol{\Theta} = \text{diag}(\boldsymbol{\theta})$ 로 표현하며, 활성 소자는 $|\theta| = 1$, 비활성 소자는 $|\theta| = 0$ 으로 둔다. 이에 따른 유효 채널은

$$\mathbf{H}_{\text{eff}} = \mathbf{H}_2 \boldsymbol{\Theta} \mathbf{H}_1 \in \mathbb{C}^{K \times N_t}. \quad (1)$$

BS는 선형 프리코딩 $\mathbf{W} = [\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_K] \in \mathbb{C}^{N_t \times K}$ 를 사용하고, 사용자당 전력은 $P_u = \frac{P_{\text{tx}}}{K}$ 로 균등 할당한다.



[그림 1] 시스템 모델

k 번째 UE 수신 신호는

$$y_k = P_u \mathbf{h}_{\text{eff},k}^T \mathbf{w}_k s_k + \sqrt{P_u} \sum_{j \neq k} \mathbf{h}_{\text{eff},k}^T \mathbf{w}_j s_j + n_k \quad (2)$$

이며, SINR은

$$\text{SINR}_k = \frac{P_u |\mathbf{h}_{\text{eff},k}^T \mathbf{w}_k|^2}{P_u \sum_{j \neq k} |\mathbf{h}_{\text{eff},k}^T \mathbf{w}_j|^2 + N_0} \quad (3)$$

프리코더는 RZF(Regularized Zero Forcing) 형태 $\mathbf{W} = \mathbf{H}_{\text{eff}}^H (\mathbf{H}_{\text{eff}} \mathbf{H}_{\text{eff}}^H + \mu \mathbf{I}_K)^{-1}$ 를 사용하며, $\mu \propto N_0/P_u$ 로 두고 열 정규화를 적용한다.

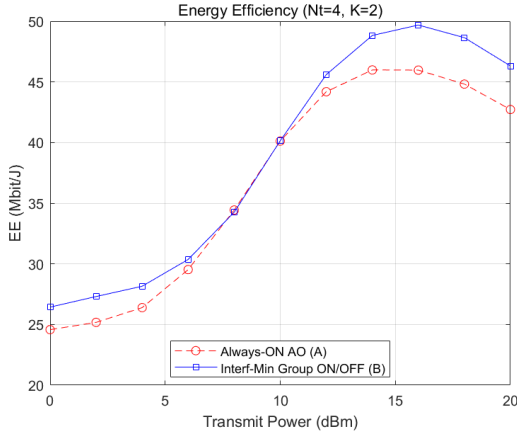
RIS 소자를 4개 사분면 그룹으로 분할하고, 가능한 On-Off 조합은 $2^4 - 1 = 15$ 개이다. 본 논문은 다음 두 기법을 비교한다. Always-On RIS는 모든 RIS 소자를 On으로 두고, $\boldsymbol{\theta}$ 를 최적화하며 간섭 억제 기반 RIS는 조합 후보 중 간섭을 줄이고 링크 이득이 임계치 이상인 조합을 선택한 뒤, 선택된 소자만 위상 최적화한다. 위상 최적화는 $\boldsymbol{\theta}$ 고정 시 \mathbf{W} 갱신, \mathbf{W} 고정 시 활성 소자 부분공간에서 위상을 갱신하는 방식으로 수행된다[1].

슬롯 t 에서 사용자 트래픽 $A_k(t)$ 는 포아송 도착으로 모델링한다. QPSK에서 슬롯당 물리계층 비트 수는 $b_{phy} = \log_2(M)T_{slot}$ 이며($M=4$), SINR 기반 BER 근사로부터 PER(Packet Error Rate)을 얻어 유효 전송량 b_k 를 계산하고, 실제 서비스 비트는 $served_k = \min(b_k, A_k)$ 로 둔다. 에너지 효율은

$$EE = \frac{\sum_{k=1}^K served_k}{E_{tx} + E_{RIS}} \quad (4)$$

로 정의한다. 송신 에너지는 $(P_{fixed} + P_{tx})T_{slot}$ 로, RIS 에너지는 On-Off 소자 전력 및 그룹 제어 전력을 조합별로 합산하여 계산한다[2].

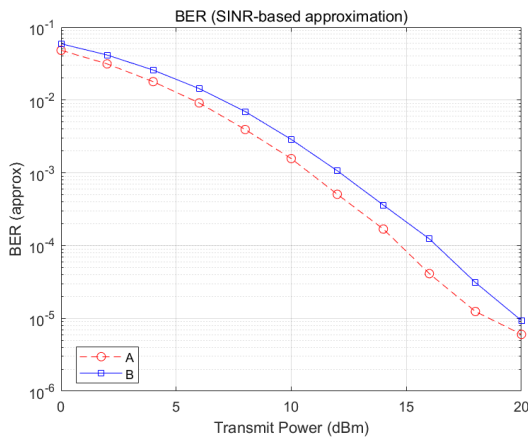
2.2. 시뮬레이션 결과 분석



[그림 2] 각 기법의 에너지 효율 비교

[그림 2]에서 간섭 제어 기반 RIS가 전 구간에서 Always-On RIS 대비 더 높은 에너지 효율을 보인다. 특히 중간 전력 영역(대략 12-18 dBm)에서 에너지 효율 이득이 가장 크게 나타나며, 최대 약 8-10% 수준의 에너지 효율 개선이 관찰된다. 이는 간섭 제어 기반 RIS가 그룹 단위로 RIS를 부분 활성화하여 RIS 회로/제어 전력 소모를 절감하면서도, 위상 최적화로 링크 성능 저하를 완화하기 때문이다.

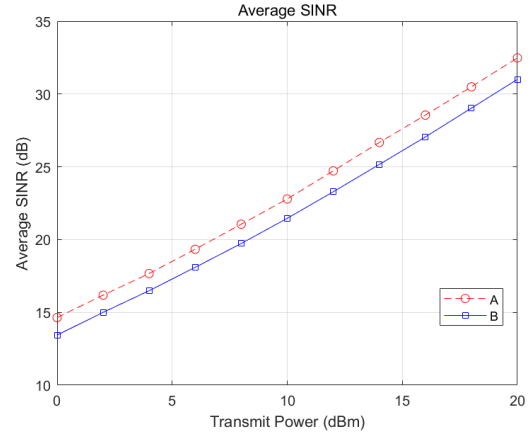
또한 저전력 구간에서는 전송 전력이 증가할수록 SINR이 개선되어 슬롯당 유효 전송량이 증가하므로 에너지 효율이 상승하는 반면 고전력 구간에서는 b_{phy} 및 트래픽 제한(도착량 A_k)에 의해 전송량 증가폭이 둔화되고, 송신 에너지 $E_{tx} \propto (P_{fixed} + P_{tx})T_{slot}$ 가 선형적으로 증가하여 에너지 효율이 감소한다.



[그림 3] 각 기법의 BER 결과 비교

[그림 3]의 BER은 SINR 기반 근사 결과로, 전송 전력 증가에 따라 두 모드 모두 BER이 단조 감소한다. 간섭 억제 기반 RIS는 SINR 열세로 인해 대부분 구간에서 Always-On RIS보다 BER이 약간 높으나, 고전력 영역에서는 두 모드 모두 10^{-5} 수준까지 수렴하며 차이가 제

한적이다. 이는 간섭 억제 기반 RIS가 일부 소자를 Off 하더라도 $K=2$ 환경에서 RZF 프리코딩이 간섭을 효과적으로 억제하고, 위상 정렬을 선택된 활성 소자에서 수행하여 성능 저하를 완화하기 때문이다.



[그림 4] 각 기법의 SINR 비교

[그림 4]에서 평균 SINR은 Always-On RIS가 간섭 억제 기반 RIS보다 일관되게 높게 나타난다. 이는 Always-On RIS가 RIS 전 소자를 활성화(최대 개구 이득)하여 유효 채널 이득을 극대화하는 반면, 간섭 억제 기반 RIS는 일부 그룹을 Off로 두기 때문에 유효 반사 면적 감소에 따른 채널 이득 저하가 발생한다.

III. 결론

본 논문은 RIS 8×8 환경에서 Always-On RIS와 간섭 억제 기반 그룹 On-Off RIS를 비교하였다. 시뮬레이션 결과, 간섭 억제 기반 RIS는 일부 RIS 그룹을 비활성화함으로써 평균 SINR이 소폭 감소하더라도 RIS 소모전력을 절감하여 전 구간에서 더 높은 에너지 효율을 달성하였다. 반면 BER은 두 방식 모두 전송 전력 증가에 따라 급격히 감소하며, 고전력 영역에서는 성능 차이가 제한적이었다. 따라서 제안한 그룹 기반 RIS 제어는 링크 성능 저하를 최소화하면서 에너지 효율을 개선하는 실용적인 RIS 운용 전략임을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2020R1A6A1A03038540). 본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 정보통신방송혁신인재양성(메타버스융합대학원)사업 연구 결과로 수행되었음(II TP-2025-RS-2023-00254529). 이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-대학 ICT 연구센터(ITRC)의 지원을 받아 수행된 연구임(II TP-2024-RS-2024-00437191).

참고 문헌

- [1] Q. Wu and R. Zhang, "Intelligent reflecting surface enhanced wireless network via joint active and passive beamforming," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 18, no. 11, pp. 5394-5409, Nov. 2019.
- [2] C. Huang, A. Zappone, G. C. Alexandropoulos, M. Debbah, and C. Yuen, "Reconfigurable intelligent surfaces for energy efficiency in wireless communication," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 18, no. 8, pp. 4157-4170, Aug. 2019.