

강화학습 기반 스펙트럼 효율 및 전력 효율을 위한 Active RIS의 부분 활성화 전략

^{1,2}최민혁, ^{1,2}동기창, ^{1,2}정영균, ^{1,2}김자은, ^{1,2}정혜윤, ^{1,2}송형규*

¹세종대학교 정보통신공학과, ²세종대학교 지능형드론융합전공

alsgurkk@sju.ac.kr, tongjohn@sju.ac.kr, 20010892@sju.ac.kr, thinkdana@sju.ac.kr,
zalfenz@sju.ac.kr, *songhk@sejong.ac.kr

Reinforcement Learning-based Partial Activation Strategy for Spectral and Power Efficiency in Active RIS

Min-Hyeok Choi, Ki-Chang Tong, Yeong-Gyun Jung, Ja-Eun Kim,
Hye-Yoon Jeong, Hyoung-Kyu Song*

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

요약

차세대 무선 통신 시스템에서 재구성 가능한 지능형 표면(RIS)은 전파 환경을 능동적으로 조작하여 커버리지 확장 및 성능 향상을 달성하는 핵심 기술로 주목받고 있다. 특히, Active RIS는 Passive RIS의 이중 감쇠 문제를 극복하기 위해 반사 요소에 증폭기를 통합하여 성능을 극대화한다. 그러나 능동 요소의 수가 증가할수록 소비 전력 및 하드웨어 복잡도가 급격히 증가하는 문제가 발생한다. 본 논문에서는 MISO 4×1시스템 환경에서 스펙트럼 효율 고려하여 전체 성능을 크게 저하시키지 않으면서 활성화되는 증폭 요소의 수를 최소화하는 강화학습(Reinforcement Learning, RL) 기반의 선택적 증폭 전략을 제안한다. RL 에이전트는 채널 정보를 기반으로 능동 증폭에 사용할 요소의 비율(Fraction)을 동적으로 결정하며, 이는 SVD 기반 30% Partial Active RIS의 스펙트럼 효율(SE) 성능을 목표로 하되, 낮은 활성화 비율을 유도하는 보상 함수를 통해 학습한다. 시뮬레이션 결과, 제안된 RL 기반 부분 활성화 방식은 고정 30% 증폭 방식과 거의 동등한 종단 간 스펙트럼 효율 성능을 달성하면서, 채널 환경에 따라 능동 요소의 수를 유연하게 조절함으로써 전력 효율을 높일 수 있음을 보여준다.

I. 서론

무선 통신 트래픽의 폭발적인 증가와 6G 시대의 요구사항을 충족시키기 위해, 기존의 통신 패러다임을 뛰어넘는 혁신적인 기술의 도입이 필수적이다. 재구성 가능한 지능형 표면(RIS)은 전파 환경의 수동적인 반사에서 나아가 채널 환경을 프로그래밍할 수 있는 새로운 해법을 제시한다.[1] 최근에는 Passive RIS의 약점인 전송/수신 경로상의 이중 감쇠(Double Fading) 문제를 해결하기 위해, 각 반사 요소에 저전력 증폭기를 통합한 Active RIS에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.[2]

Active RIS는 이론적으로 무제한의 전력 이득을 제공할 수 있으나, Active RIS의 실질적인 구현 가능성과 이득에 대한 깊은 논의가 필요하다.[1] 특히, 능동 요소의 수가 증가할수록 소비 전력 및 하드웨어 복잡도가 급격히 증가하는 문제는 RIS의 주요 장점인 저비용 및 저전력 특성을 상실하게 만든다. Active RIS 환경에서 합산 속도 최대화와 같은 성능 최적화가 중요함에도 이와 동시에 스펙트럼 효율과 전력 효율 간의 균형을 맞추는 것이 필수적이다.[3]

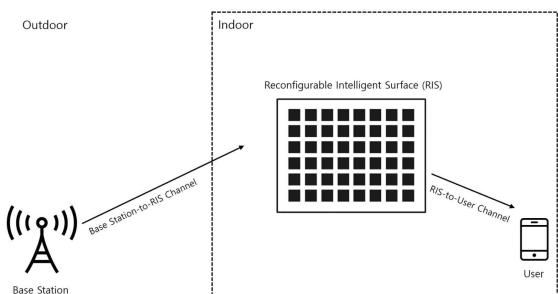
따라서 성능 목표(스펙트럼 효율)를 유지하면서 능동 증폭을 위한 요소의 수를 최소화하는 부분 활성화 제어기술의 개발이 중요하다.

본 논문은 이러한 필요성에 기반하여 강화학습(RL)을 활용한 Active RIS의 부분 활성화 전략을 제안한다. RL 에이전트는 채널 상태를 인식해 SVD 기반 30% Partial Active RIS의 성능을 달성하면서 필요 최소 증폭 비율을 동적으로 학습하여 전력 효율을 극대화 한다.

II. 본론

본 연구에서 고려하는 시스템 모델은 1개의 기지국, 1개의 RIS, 그리고 단일 사용자로 구성된다. 기지국은 4개의 송신 안테나를 가지고 있으며, 사용자는 단일 수신 안테나를 가지고 있다고 가정한다. [그림 1]은 실외의 BS 신호가 실내의 Active RIS 벽면을 통해 사용자에게 전송되는 환경을 보여준다.

A. Active-RIS 기반 시스템



[그림 1] Active-RIS 기반 실외-실내 통신 시스템 모델

수신 신호 y 는 다음과 같이 모델링 된다.

$$y = H_{BR}\Phi H_{RU}x + w \quad (1)$$

식 (1)에서 H_{BR} 는 BS-to-RIS 채널, H_{RU} 는 RIS-to-User 채널, x 는

송신 십볼, w 는 수신단의 잡음, Φ 는 Active RIS의 반사 계수 행렬로 대각행렬이다. Active RIS의 n 번째 요소의 계수는 $\Phi_{n,n} = \alpha_n e^{j\phi_n}$ 이다. 여기서 ϕ_n 는 위상 천이 값이며, α_n 은 증폭 이득을 나타낸다. 따라서 Φ 는 식 (2)와 같이 다시 표현할 수 있다.

$$\Phi = \text{diag}(\alpha_1 e^{j\phi_1}, \alpha_2 e^{j\phi_2}, \dots, \alpha_N e^{j\phi_N}) \quad (2)$$

부분 활성화 전략에서 α_n 은 RIS 요소의 활성화 여부에 따라 결정된다. 활성화된 요소는 $\alpha_n = 2$, 비활성화된 요소는 $\alpha_n = 1$ 의 이득을 갖는다. 시스템의 주요 파라미터는 [표 1]에 정리하였다.

파라미터	값
중심 주파수	$3.5 \times 10^9 [\text{Hz}]$
대역폭	$100 \times 10^6 [\text{Hz}]$
송신전력	20 [W]
잡음전력	-104 [dBm]
Active 증폭 계수	2
RIS 요소 면적	$5.85 \times 10^{-4} [\text{m}^2]$
최대 활성화 비율(F_{\max})	0.30
학습률	0.05
Iteration	10,000

[표 1] 시스템 파라미터

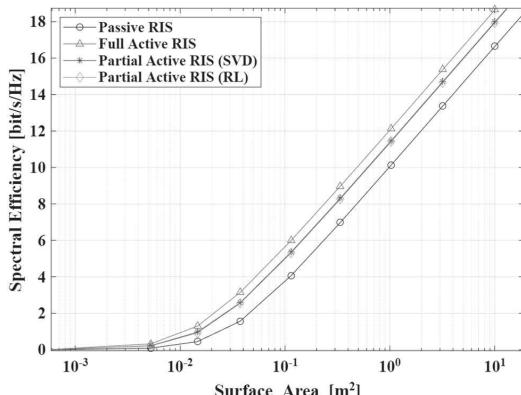
B. 강화학습 기반 부분 활성화 전략

본 논문의 목표는 채널 기여도가 큰 RIS 요소 일부 k 개만 증폭 ($\alpha_n = 2$)하고 전력 효율을 확보하면서도, SVD 기반 30% Partial Active RIS의 SE에 근접하는 것이다. 이를 위해 부분 활성화 비율 $F = k / N$ 을 강화학습으로 동적으로 결정한다. 상태, 행동, 보상은 다음과 같다.

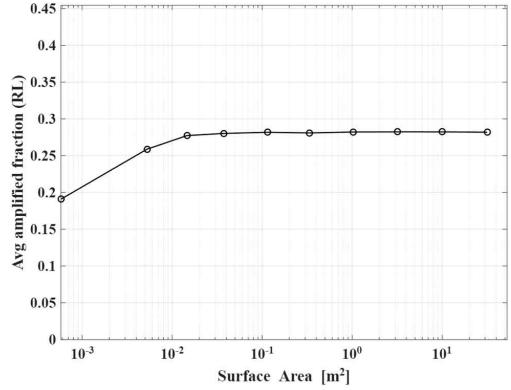
- 상태 (State, S) : 채널에서 각 RIS 요소가 신호에 얼마나 기억하는지 분포를 파악한다.
- 행동 (Action, A) : Active RIS 요소 중 증폭할 부분 활성화 비율 $F \in \{0.00, 0.05, \dots, 0.28, 0.29, 0.30\}$ 을 선택한다.
- 보상 (Reward, R) : 기준 SE에 얼마나 근접했는지로 결정한다.

C. 시뮬레이션 결과

그림 [2], [3]은 RIS 면적 증가에 따른 SE와 RL이 선택한 평균 부분 활성화 비율을 보여준다. Passive RIS 면적 증가에 따른 SE 개선 폭이 가장 작다. Full Active는 SE가 가장 높지만 전력 비효율성이 크다. 제안한 Partial-Active(RL) 기법은 SVD 기반 30% Partial-Active 와 비교하여 전력을 덜 소모하면서도 비슷한 성능을 보인다.



[그림 2] Surface Area에 따른 SE 성능



[그림 3] Surface Area에 따른 SE 성능

III. 결론

본 논문에서는 Active RIS 시스템에서 스펙트럼 효율과 전력 효율 간 상충을 RL 기반 부분 활성화 전략으로 해결했다. 제안한 RL 에이전트는 동적으로 증폭 요소를 선택하여 목표 성능을 달성하는 동시에, 불필요한 전력 소모를 최소화 하는 부분 활성화 비율을 성공적으로 학습하였다. 시뮬레이션 결과, 제안 기법은 Active RIS 요소 중 30% 미만을 활성화 하고도 SVD 기반 30% Partial Active RIS와 유사한 SE를 달성했으며, Active RIS의 전력 효율적 구현을 위한 실질적인 대안을 제시하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2020년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2020R1A6A1A03038540) This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education(2020R1A6A1A03038540) 본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 정보통신방송혁신인재양성(메타버스융합대학원) 사업 연구 결과로 수행되었음(IITP-2025-RS-2023-00254529) This work was supported by Institute of Information & communications Technology Planning & Evaluation (IITP) under the metaverse support program to nurture the best talents (IITP-2025-RS-2023-00254529) grant funded by the Korea government(MSIT) 이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-대학ICT연구센터(ITRC)의 지원을 받아 수행된 연구임(IITP-2025-RS-2024-00438007) This work was supported by the IITP(Institute of Information & Communications Technology Planning & Evaluation)-ITRC(Information Technology Research Center) grant funded by the Korea government(Ministry of Science and ICT)(IITP-2025-RS-2024-00438007)

참고 문헌

- [1] E. Björnson, Ö. Özdogan, and E. G. Larsson, "Reconfigurable intelligent surfaces: Three myths and two critical questions," *IEEE Wirel. Commun.*, vol. 28, no. 5, pp. 22–28, Oct. 2021.
- [2] Z. Zhang, L. Dai, X. Chen, C. Liu, F. Yang, R. Schober, and H. V. Poor, "Active RIS vs. passive RIS: Which will prevail in 6G?," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 71, no. 3, pp. 1707–1721, Mar. 2023.
- [3] H. D. Tuan, A. A. Nasir, E. Dutkiewicz, H. V. Poor, and L. Hanzo, "Active-RIS Enhances the Multi-User Rate of Multi-Carrier Communications," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 73, no. 11, pp. 16948–16962, Nov. 2024.