

트래픽 인지 기반 RIS On-Off 제어를 통한 링크 에너지 효율 향상에 대한 연구

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

¹세종대학교 정보통신공학과, ²세종대학교 지능형드론융합전공

zalfenz@sju.ac.kr, thinkdana@sju.ac.kr, tongjohn98@sju.ac.kr, 20010892@sju.ac.kr, alsgrukk@sju.ac.kr
, *songhk@sejong.ac.kr

A Study on the Traffic-Aware RIS On-Off Control for Energy Efficiency

^{1,2}Hye-Yoon Jeong, ^{1,2}Ja-Eun Kim, ^{1,2}Ki-Chang Tong, ^{1,2}Yeong-Gyun Jung, ^{1,2}Min-Hyeok Choi,
^{1,2}Hyung-Kyu Song*

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

요약

본 논문은 6G 무선접속망의 지속가능성 관점에서, 상시 구동되는 재구성 가능한 지능형 표면 (Reconfigurable Intelligent Surface, RIS)의 고정 소모전력이 저부하 구간의 에너지 효율을 저하시킬 수 있다는 문제를 지적하고, 트래픽 상태에 적응하는 임계치 기반 RIS On-Off 제어의 효과를 정량적으로 규명한다. 슬롯 단위로 제공 트래픽이 임계치를 초과할 때만 RIS를 활성화하고, 채널은 Base Station(BS) - RIS - User Equipment(UE) 연쇄의 Rician 모델과 슬롯별 위상 정렬을 사용하며, 송신 체인과 RIS의 On-Off 전력을 구분한 현실적 전력 모델을 적용한다. Eb/N0 전 구간에 대해 몬테카를로 평가를 수행하고, 에너지 효율, UE별 Bit Error Rate(BER), goodput-per-Joule을 지표로 비교한다. 결과적으로 제안 정책은 전 Singnal to Noise Ratio(SNR)에서 일관된 에너지효율 향상과 J/Mbit 감소를 달성하면서 BER 및 UE 공정성 유지를 확인하였다.

I. 서론

RIS는 전통적인 BS 증설 방식의 한계를 극복하고 에너지 효율을 극대화 할 6G의 핵심 기술로 주목받고 있다. RIS는 수많은 저전력 반사 소자를 통해 전파 환경을 능동적으로 제어하여, 신호 품질을 개선하고 통신 거리를 확장하는 혁신적인 솔루션이다. 하지만 RIS의 반사 소자와 제어부 역시 상시 전력을 소모하므로, 트래픽이 거의 없는 저부하 구간에서 RIS를 항상 켜두는(always-on) 방식은 오히려 전체 네트워크의 에너지 효율을 저해하는 문제점을 야기할 수 있다[1].

본 연구는 트래픽 상태에 따라 RIS를 동적으로 켜고 끄는 적응형 On-Off 제어 방식을 제안하고, 그 에너지 효율 개선 효과를 체계적으로 분석했다. 제안된 방식은 실시간 트래픽 양이 미리 설정된 임계치를 넘을 때만 RIS를 활성화하고, 그렇지 않을 경우 저전력 수면 모드로 전환시킨다. BS - RIS - UE로 구성된 Rician 페이딩 채널 환경에서, 4명의 UE를 라운드로빈 방식으로 스케줄링하는 시뮬레이션을 통해 제안 방식의 성능을 검증했으며, RIS의 On-Off 상태별 전력 소모량을 현실적으로 모델링하여 분석의 정확도를 높였다. 분석 결과, 제안한 기법은 저·중 부하에서 높은 Off 비율을 통해 에너지 효율을 일관되게 향상시키며, 적절한 임계치 설정 하에서 Bit Error Rate (BER) 열화 없이 goodput-per-Joule을 동시에 개선한다.

II. 본론

2.1. 시스템 모델

본 시스템은 단일 안테나 BS, 단일 안테나 UE 4명, N=64개 소자를 갖는 수동 RIS로 구성된다. 그림 1과 같이 BS - UE 직경로는 차폐물 등으로 차단(Non Line-Of-Sight, NLOS) 되어 무시하며, 통신은 BS → RIS → UE

의 경로만을 이용한다. RIS는 전면에 일렬로 배치된 64개의 반사 소자를 갖는 Uniform Linear Array (ULA)로 모델링하고, 소자 간 반파장 간격을 가정한다. 제어 복잡도와 구동 전력을 현실적으로 반영하기 위해 소자 집합을 G=4개의 연속 Sub-array 그룹으로 분할한다. 각 그룹은 하나의 On-Off 스위치와 공통 위상 제어를 갖고, 그룹 단위로 활성화된다. 슬롯마다 대기 UE를 정해진 순서로 하나씩 번갈아 서비스하여 UE 모두에게 동등한 기회를 주는 라운드로빈 스케줄링 기법을 사용한다[2]. 활성 소자의 위상은 $\phi_n^* = -\angle(h_{2,k}(n)h_1(n))$ 으로 정렬해 유효 이득 $|\mathbf{h}_{2,k}^T \mathbf{\Phi} \mathbf{h}_1|$ 을 최대화한다. On-Off는 트래픽 임계치 R_{th} 기반 정책으로 결정한다. 채널은 거리 기반 경로 손실을 갖는 Rician 페이딩, 잡음은 Additive White Gaussian Noise (AWGN)으로 모델링한다.

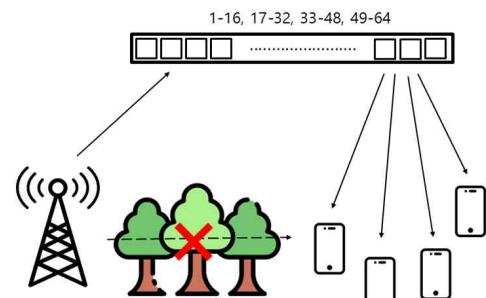


그림 1. 시스템 모델

2.2. 시뮬레이션 결과 분석

시뮬레이션은 반송파 주파수 28GHz으로 진행하였으며, BS-RIS, RIS-UE 간 거리는 각각 50m, 10m이다. 트래픽은 $R \sim \text{Unif}(0,8)$ Mbps로

생성하며, 슬롯 단위 임계치 $R_{th}=2$ Mbps를 초과할 때만 RIS를 활성화하고 미만이면 수면 모드로 전환한다. UE 수는 4명으로 슬롯은 라운드로빈으로 배정해 모든 UE의 공정성을 확보하며 각 SNR 지점마다 50,000 슬롯을 몬테카를로 반복하여 통계적 신뢰도를 보장한다.

그림 2는 always-on RIS 대비, 트래픽-인지형 임계값 On-Off가 에너지 효율과 신뢰도에 미치는 영향을 비교한 결과를 보여준다. 전 SNR 구간에서 트래픽-인지형 방식이 일관된 우위를 보였고, 향상폭은 저 SNR에서는 제한적이나 중·고 SNR로 갈수록 유의미하게 확대되었다. 이는 Off 슬롯에서 고정 구동전력을 제거해 에너지를 줄이고, On 슬롯에서는 동일 위상 정렬로 물리계층 이득을 유지한 결과다.

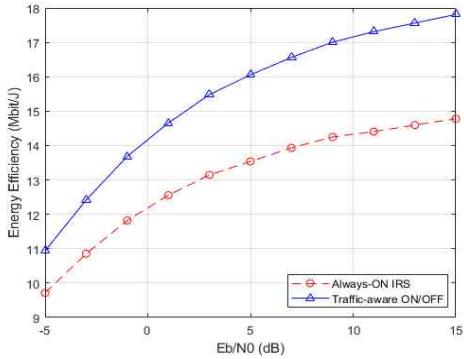


그림 3은 전달된 비트당 에너지(J/Mbit)를 나타낸다. 전 SNR 구간에서 트래픽-인지형 On-Off가 always-on RIS 대비 일관되게 낮은 J/Mbit를 보이며, 이는 Off 슬롯에서 고정 구동전력을 제거해 전달 비트는 유지하면서 소비 에너지를 줄인 결과다. 두 곡선은 SNR이 증가할수록 단조 감소하며, 중·고 SNR로 갈수록 격차가 더 뚜렷해지는데, 이는 용량 증가로 인한 비트당 전송시간이 짧아질수록 always-on RIS의 고정 전력 폐널티가 상대적으로 커지기 때문이다. 반대로 저 SNR에서는 노이즈 지배로 절대 goodput이 작아 두 방식의 차이가 상대적으로 축소된다. goodput 산출에 BER 보정을 반영했음에도 제한한 On-Off 정책의 이점이 유지된다는 점으로, 이는 전송 시점의 물리계층 신뢰도를 훼손하지 않으면서 에너지 소비만을 경감함을 시사한다[3].

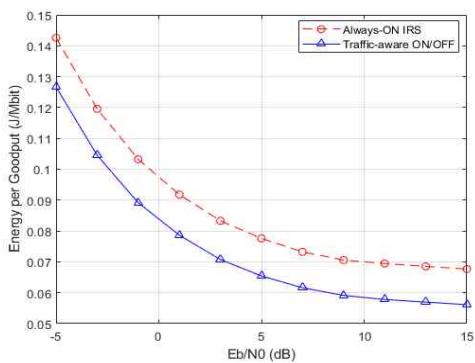


그림 4의 네 곡선(UE1 - UE4)은 SNR 전 구간에서 거의 완전히 중첩되어, 라운드로빈 스케줄과 슬롯별 위상정렬 하에서 UE 간 BER 편차가 사실상 없고 공정성(fairness)이 유지됨을 보여준다. 곡선은 오차바닥 없이 단조 감소하며, 기울기는 AWGN 지배 구간의 전형적 형태를 따른다. 본 결과가 Always-On 기준임에도 트래픽-인지형 On-Off와 동일한 처리(On 슬롯에서 동일 위상정렬·복조)를 공유하므로, 두 정책의 BER 분포는 구조적으로 동일하고, 앞선 에너지 효율/Goodput 개선은 전송 선택(Off 슬롯 전력 절감)에서 기인한다.

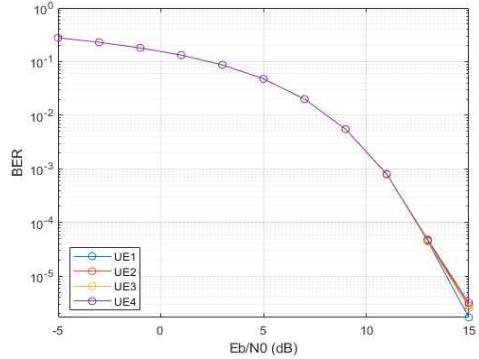


그림 4. UE별 BER 성능

III. 결론

본 연구는 Always-on RIS 대비 트래픽-인지형 임계치 기반 On-Off 제어가, 슬롯 단위의 단순 정책만으로도 전 SNR 구간에서 일관된 에너지 효율 우위를 확보하면서 전송 시점의 물리계층 신뢰도와 UE 간 공정성을 유지함을 보였다. 핵심 메커니즘은 불필요한 슬롯을 Off로 전환해 RIS의 정지 전력을 제거하고, On 슬롯에서는 동일한 위상 정렬로 등가 채널 이득을 보전하는 데 있다. 실제로 전송 슬롯 기준 BER과 UE별 BER 분포는 두 방식 간 유의미한 차이를 보이지 않아, 신뢰도 저하 없이 에너지만 절감됨을 확인하였다. 설계 관점에서 임계값은 에너지 효율 - 지연 절충을 조절하는 단일한 직관적인 조절 변수이며, 운영 단계에서 트래픽 통계 변화에 맞춘 적응형 임계값 업데이트만으로도 실용적인 에너지 절감이 가능하다. 다만 본 모형은 큐잉/지연을 단순화했으므로, 향후 지연 - 신뢰도 - 에너지의 종단간 분석, 임계값의 학습 기반 최적화, 다중 UE 동시 전송, 불완전 Channel State Information (CSI), 스위칭 오버헤드/반응시간을 포함한 견고성 평가가 필요하다.

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.(IITP-2025-RS-2023-00254529) 이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원-대학ICT연구센터(ITRC)의 지원을 받아 수행된 연구임.(IITP-2025-RS-2024-00438007)

참 고 문 헌

- [1] S. Sun, C. Huang, G. Chen, P. Xiao, and R. Tafazolli, "Deep Learning-Based Traffic-Aware Base Station Sleep Mode and Cell Zooming Strategy in RIS-Aided Multi-Cell Networks," *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, vol. 11, no. 4, pp. 2171–2184, Aug. 2025
- [2] M. I. S. Mamode and T. P. Fowdur, "Survey of Scheduling Schemes in 5G Mobile Communication Systems," *Journal of Electrical Engineering, Electronics, Control and Computer Science (JEEECCS)*, vol. 6, no. 20, pp. 21 - 30, 2020
- [3] H. Xie and D. Li, "To Reflect or Not to Reflect: On-Off Control and Number Configuration for Reflecting Elements in RIS-Aided Wireless Systems," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 71, no. 12, pp. 7409–7424, Dec. 2023