

실외 및 실내 무선 네트워크 환경에서 단일 및 다중 RIS 배치에 따른 성능 분석

김도은 정수현 김현찬 채대명 정수민*

금오공과대학교 전자공학부/IT융복합공학과

doeun0401@naver.com, sumin.jeong@kumoh.ac.kr*

Performance Comparison and Analysis of Single and Multiple RIS Deployments in Outdoor and Indoor Wireless Networks

Doeun Kim, Suhyeon Jeong, Hyunchan Kim, Daemyeong Chae, Sumin Jeong*

Kumoh National Institute of Technology

요약

본 논문은 실내의 시나리오에서 재구성 가능한 지능형 반사 표면(Reconfigurable Intelligent Surface, RIS) 기반 무선 통신 시스템을 단일/다중 RIS 구조로 구분하여 서비스 범위, 평균 전송률, 면적 스펙트럼 효율 지표를 중심으로 성능 특성을 비교/분석한다. 단일 RIS는 서비스 범위 확장과 전송률 향상의 잠재력을 보이나, 신호 차단(blockage)과 경로 다양성 부족과 같은 구조적 한계가 존재한다. 반면, 다중 RIS는 분산 배치와 협력 빔포밍을 통해 경로 다양성 및 공간 다이버시티를 확보함으로써 서비스 범위와 전송률, 스펙트럼 효율을 개선할 수 있다. 그러나 실내 환경에서는 사용자 이동성과 시간에 따른 장애물 배치 변화가 성능에 유의한 영향을 미치므로 동적 요소를 반영한 모델링이 요구된다. 이에 본 논문은 문헌 분석을 통해 RIS 시스템 성능을 분석하고 실내 환경에서 동적 요소를 반영한 모델링과 제어 전략을 향후 핵심 연구 과제로 제시한다.

I. 서론

재구성 가능한 지능형 반사 표면(Reconfigurable Intelligent Surface, RIS)은 무작위성이 지배적인 무선채널을 다수의 반사소자의 위상/진폭을 제어하여 조정가능한 대상으로 전환하는 기술이다[1]. 고전력 고주파(RF) 체인과 복잡한 연산을 요구하는 대규모 다중 안테나(Massive MIMO)나 증폭/재생 중 잡음이 누적되는 능동 중계기(active relay)에 비해 전력 효율적으로 유효개구면 확장 및 분산 배치를 용이하게 하여 비용/에너지 효율과 확장성에서 우위를 확보한다[2]. 따라서 RIS는 무선 시스템의 패러다임을 **채널이용**에서 **채널설계**로 전환한 획기적인 기술이다[1, 2].

단일 RIS 구조는 구현이 단순하고 분석적 모델링이 용이하여 초기 연구의 대부분이 이 구조를 고려하여 서비스 범위 확대, 평균 전송률 향상, 면적 스펙트럼 효율 개선 등 다양한 성과가 보고되었다 [3]. 그러나 단일 RIS는 (i) 차단 환경에서 신규경로 제공 능력 제한; (ii) 높은 사용자 위치 의존성; (iii) 경로 다양성 부족으로 네트워크 차원의 용량 확장에 제약이 존재한다. 이러한 한계를 극복하기 위한 해법으로 다중 RIS 구조가 제안되었으며, 분산 배치와 협력 빔포밍을 통해 경로/공간 다이버시티를 활용함으로써 범위, 전송률, 면적 스펙트럼 효율을 동시에 개선할 수 있음이 확인되었다 [4]. 다만 다중 RIS는 성능 이득과 함께 채널 상태정보 취득 부담, 제어 오버헤드, 설치/운용 복잡도 증가라는 단점도 수반하므로, 장단점을 균형 있게 고려한 설계가 필요하다.

단일 및 다중 RIS의 이득과 비용은 전파 환경에 따라 지배 요인이 달라지므로 실외와 실내를 구분하여 분석하여야 한다. 실외 환경은 대규모 셀의 기하 구조, 최소한 다중경로, 원거리 경로 손실과 보행자/차량에 의한 확률적 차단(blockage) 통계가 성능을 좌우하며 RIS 배치에는 설치 고도, 가시성, 전원 및 백홀(backhaul) 제약이 크게 작용한다. 반면 실내 환경은 짧은 연결 거리, 풍부한 반사, 사람과 장애물 이동에 따른 변동성, 제어 지연과 채널 상태 정보(Channel State Information, CSI) 획득 부담으로 인해 서비스 범위/평균 전송률/면적 스펙트럼 효율의 지배 향이 달라진다. 따라서 본 논문은 실내외를 분리하여 공통된 성능 지표를 기준으로 단일/다중 RIS를 비교한다. 특히 실내의 경우 사용자 이동과 장애물 재배치 등 동적 요소를 모델에 포함한 제어 및 자원 관리 전략의 필요성을 제시한다.

II. 단일 RIS 구조 성능 분석

A. 실외 환경

- **서비스 범위:** 대체 경로를 제공, 서비스 범위를 확장한다 [1]. 차단으로 인한 중단(outage) 확률이 감소하고 특정 영역에서 신호 도달 확률이 증가한다 [6]. 다만 반사 경로가 하나에 국한되어 심각한 비가시선(NLoS) 환경에서는 서비스 범위 확장이 충분하지 않다.
- **평균 전송률:** 소자 수가 증가함에 따라 전송률이 개선된다[3]. 또한 위상 양자화 정밀도가 제한된 경우에도 성능 열화는 크지 않다 [7]. 그러나 단일 경로 제공이라는 구조적 특성 때문에, 고 SNR 영역에서는 추가적인 성능 개선이 제한적이다.
- **면적 스펙트럼 효율:** 단일 RIS 연구는 주로 서비스 범위와 전송률에 집중되었으며, ASE 개선 효과는 제한적으로만 다루어졌다. 소규모 셀 환경에서는 부분적 ASE 향상이 가능하나, 대규모 네트워크 차원에서는 다중경로 제공능력 부족으로 ASE 개선 효과가 크지 않다 [8].

B. 실내 환경

- **서비스 범위:** 실내 환경에서는 RIS 적용으로 수신 신호 세기가 수십 dB 향상되는 실험적 결과가 보고되었으며, 이는 서비스 범위 확장 효과로 직결된다. 단일 RIS는 짧은 전파 거리와 풍부한 반사 조건 덕분에 실내에서 범위 개선에 효과적이다 [3].
 - **평균 전송률:** 시뮬레이션 결과, RIS 반사를 통해 신호 세기가 증가하면서 평균 전송률이 개선되었으며, 위상 제어 정밀도가 낮아도 전송률 저하는 크지 않았다. 그러나 반사 경로가 제한적이어서 최소 사용자 전송률 보장에는 제약이 따른다 [9].
 - **면적 스펙트럼 효율:** 관련 연구는 주로 범위와 전송률 개선에 초점이 맞추어져 있으며, ASE 분석은 부족하다. 작은 실험 환경에서는 ASE 향상 가능성이 있으나 사용자 수가 많거나 복잡한 다중 사용자 환경에서는 네트워크 차원의 ASE 개선 효과를 일반화하기 어렵다 [9].
- 실외 환경에서는 차단 완화/전송률 향상에 기여하나 ASE 개선은 한계가 있다. 실내에선 범위와 전송률 개선 효과가 뚜렷하지만 ASE 성능 검증은 미비하다. 따라서 단일 RIS는 환경 특성에 따라 부분적인 이득을 제공하나 네트워크 차원의 용량 확장 측면에서는 구조적 한계가 존재한다.

III. 다중 RIS 구조 성능 분석

A. 실외 환경

- **서비스 범위:** 분산된 다중경로를 제공, 차단 상황을 완화한다. 배치 밀도가 증가할수록 중단 확률이 감소하고 서비스 범위가 정량적으로 확장된다. 멀티 홉 구조나 경로 스케줄링과 결합할 경우, 단일 RIS로는 도달 불가능한 NLoS 영역에서 안정적인 연결이 가능하다 [10].
- **평균 전송률:** 협력 빔포밍과 멀티 홉 전송 경로를 활용하여 평균 전송률을 향상시킨다. 최소 사용자 전송률이 개선되고 다중 경로로 인해 고 SNR 영역에서 복수 RIS 간의 위상 정렬과 최적 경로 선택이 결합되면 단일 RIS 대비 전송률 증가 폭이 크게 확대된다 [10].
- **면적 스펙트럼 효율:** 밀도, 배치 전략, 소자 수에 따라 ASE가 선형적으로 증가한다. 다중 RIS 배치 시 단위 면적당 전송 용량이 단일 RIS 대비 크게 개선되며 이는 다중 RIS가 네트워크 차원 스펙트럼 효율 측면에서 우위에 있음을 보여준다 [11].

B. 실내 환경

- **서비스 범위:** 짧은 링크와 풍부한 반사 조건을 활용하여 안정적 범위를 확장할 수 있다. Nakagami-m 페이딩 기반 해석에서는 RIS 수 증가에 따라 중단 확률이 감소하고 범위 확률이 향상된다 [12].
- **평균 전송률:** 협력적 빔포밍과 멀티 홉 반사 구조가 최소 사용자 전송률을 개선한다. 단일 RIS 대비 경로 다양성이 확보되어 위치 의존성이 완화되고 전송률이 상대적으로 안정적으로 유지된다 [9].
- **면적 스펙트럼 효율:** 실내 환경에서의 다중 RIS ASE 분석은 본격적으로 이루어지지 않았으나 실외 네트워크 분석 결과를 고려할 때 유사한 경향이 적용될 수 있다.

실외 환경에서 분산 배치와 협력 빔포밍을 통해 서비스 범위, 평균 전송률, 면적 스펙트럼 효율을 종합적으로 개선하며 단일 RIS의 구조적 한계를 극복한다. 실내 환경에서도 다중 RIS는 위치 의존성 완화와 안정적인 경로 다이버시티 확보를 통해 성능을 향상시킬 잠재력을 지니고 있다. 다만 실내에서의 다중 RIS 성능은 아직 이론 및 시뮬레이션 중심으로 제시되고 있어, 실험적 검증이 향후 주요 과제로 남아 있다.

IV. 결론

본 논문은 단일 및 다중 RIS의 성능을 서비스 범위, 평균 전송률, 면적 스펙트럼 효율 지표를 중심으로 실외와 실내 시나리오로 나누어 비교/분석하였다. 단일 RIS는 구형 용이성과 국소적인 성능 개선에 강점을 보였으나 차폐 환경에서의 한계와 네트워크 차원 확장성 부족이 확인되었다. 반면 다중 RIS는 분산 배치와 협력 빔포밍을 통해 경로 및 공간 다이버시티를 활용함으로써 단일 RIS의 구조적 제약을 극복하고 네트워크 전반의 범위와 전송률, 스펙트럼 효율을 동시에 향상시킬 수 있음을 보였다. 특히 실내 환경에서는 짧은 링크와 풍부한 반사 조건으로 인해 성능 개선 효과가 더욱 뚜렷하였다. 하지만 사용자 이동성과 장애물 재배치 등 시변 요소(time-varying elements)가 성능 변동성을 크게 유발한다. 따라서 향후 연구에서는 동적 환경을 반영한 모델링과 제어 전략을 통해 다중 RIS의 잠재력을 실질적으로 검증하고, 실내외 시나리오 전반에서 안정적이고 확장성 있는 통신 성능을 보장하는 방향으로 발전이 필요하다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신 기획평가원-지역지능화혁신인재양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임(IITP-2025-RS-2020-II201612).

참 고 문 헌

- [1] E. Basar, M. Di Renzo, J. De Rosny, M. Debbah, M. -S. Alouini and R. Zhang, "Wireless Communications Through Reconfigurable Intelligent Surfaces," in IEEE Access, vol. 7, pp. 116753-116773, 2019, doi: 10.1109/ACCESS.2019.2935192.
- [2] M. Di Renzo et al., "Smart Radio Environments Empowered by Reconfigurable Intelligent Surfaces: How It Works, State of Research, and The Road Ahead," in IEEE Journal on Selected Areas in Communications, vol. 38, no. 11, pp. 2450-2525, Nov. 2020, doi: 10.1109/JSAC.2020.3007211.
- [3] Q. Wu and R. Zhang, "Towards Smart and Reconfigurable Environment: Intelligent Reflecting Surface Aided Wireless Network," in IEEE Communications Magazine, vol. 58, no. 1, pp. 106-112, January 2020, doi: 10.1109/MCOM.001.1900107.
- [4] M. Aldababsa, A. M. Salhab, A. A. Nasir, M. H. Samuh and D. B. da Costa, "Multiple RISs-Aided Networks: Performance Analysis and Optimization," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 72, no. 6, pp. 7545-7559, June 2023, doi: 10.1109/TVT.2023.3242046.
- [5] W. Tang et al., "Wireless Communications With Reconfigurable Intelligent Surface: Path Loss Modeling and Experimental Measurement," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 20, no. 1, pp. 421-439, Jan. 2021, doi: 10.1109/TWC.2020.3024887.
- [6] T. Wang, G. Chen, M. -A. Badiu and J. P. Coon, "Performance Analysis of RIS-Assisted Large-Scale Wireless Networks Using Stochastic Geometry," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 22, no. 11, pp. 7438-7451, Nov. 2023, doi: 10.1109/TWC.2023.3250667.
- [7] H. Zhang, B. Di, L. Song and Z. Han, "Reconfigurable Intelligent Surfaces Assisted Communications With Limited Phase Shifts: How Many Phase Shifts Are Enough?," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 69, no. 4, pp. 4498-4502, April 2020, doi: 10.1109/TVT.2020.2973073.
- [8] Q. Wu and R. Zhang, "Intelligent Reflecting Surface Enhanced Wireless Network via Joint Active and Passive Beamforming," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 18, no. 11, pp. 5394-5409, Nov. 2019, doi: 10.1109/TWC.2019.2936025.
- [9] X. Tan, Z. Sun, D. Koutsonikolas and J. M. Jorret, "Enabling Indoor Mobile Millimeter-wave Networks Based on Smart Reflect-arrays," IEEE INFOCOM 2018 - IEEE Conference on Computer Communications, Honolulu, HI, USA, 2018, pp. 270-278, doi: 10.1109/INFOCOM.2018.8485924.
- [10] M. Aldababsa, A. M. Salhab, A. A. Nasir, M. H. Samuh and D. B. da Costa, "Multiple RISs-Aided Networks: Performance Analysis and Optimization," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 72, no. 6, pp. 7545-7559, June 2023, doi: 10.1109/TVT.2023.3242046.
- [11] X. Ma, H. Zhang, X. Chen, Y. Fang and D. Yuan, "Multi-Hop Multi-RIS Wireless Communication Systems: Multi-Reflection Path Scheduling and Beamforming," in IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 23, no. 7, pp. 6778-6792, July 2024, doi: 10.1109/TWC.2023.3333050.
- [12] Y. Cao, X. Wu, J. He, T. Ohtsuki and T. Q. S. Quek, "Coverage and Rate Performance Analysis of Multi-RIS-Assisted Dual-Hop mmWave Networks," in IEEE Transactions on Wireless Communications, doi: 10.1109/TWC.2025.3601815