

라이시안 페이딩 아래의 유한 해상도 RIS를 이용한 MISO 시스템 공동 빔포밍 설계

정기우, 이인규

고려대학교 전기전자공학과

{keywu00jung, inkyu}@korea.ac.kr

Joint Beamforming Design for RIS-Aided MISO Systems with Finite Resolution Phase Shifts under Rician Fading

Kiwoo Jung, and Inkyu Lee

School of Electrical Engineering, Korea Univ.

요약

본 연구에서는 가시거리(Line-of-Sight, LoS) 성분과 비가시거리(Non-Line-of-Sight, NLoS) 성분이 공존하는 Rician 페이딩 환경에서 지능형 반사표면(Reconfigurable Intelligent Surface, RIS)이 보조하는 다운링크 MISO(Multiple-Input Single-Output) 통신 시스템을 고려한다. 고주파 대역을 활용하는 현대 무선 통신에서는 전파 차단 및 산란으로 인해 기지국과 사용자 간의 직접 경로만으로는 안정적인 통신 성능을 확보하기 어렵다. 이를 극복하기 위해 제안된 RIS는 다수의 수동 반사 소자로 구성되어 입사된 신호의 위상을 능동적으로 조절함으로써 수신 신호 품질을 향상시킨다. 특히, 본 연구는 모든 무선 채널이 Rician 분포를 따른다고 가정하고, 시스템의 에르고딕 용량(Ergodic Capacity)을 최대화하기 위해 송신 빔포밍 벡터와 RIS 반사 위상을 교대 최적화(Alternating Optimization, AO) 기법을 통해 공동 설계한다. 기지국의 빔포밍은 최대 비율 전송(MRT) 기법을 기반으로 갱신되며, RIS 위상은 반사 경로와 직접 경로의 위상을 정렬하는 닫힌형 해(Closed-form solution)를 통해 최적화된다. 아울러, 기존 연구를 확장하여 실제 하드웨어 구현 시 발생하는 RIS 위상의 유한 비트 해상도(Finite bit resolution) 제약을 고려하며, 시뮬레이션을 통해 소자 수 증가 및 양자화 비트 수 변화에 따른 에르고딕 용량 성능을 체계적으로 분석한다.

I. 서론

고주파 대역을 활용하는 차세대 무선 통신 환경에서는 전파의 강한 직진성으로 인해 장애물에 의한 전파 차단(Blockage), 반사, 산란 현상이 빈번하게 발생한다. 이로 인해 기지국과 사용자 사이의 직접 경로(Direct path)가 차단될 경우 수신 신호 세기가 급격히 감소하여 안정적인 통신 성능을 확보하기 어렵다. 특히 도심의 빌딩 숲이나 복잡한 실내 환경에서는 비가시 경로(NLoS)의 영향이 지배적이 되며, 채널 품질의 변동성이 크게 증가한다[1]. 이러한 무선 채널 환경의 물리적 한계를 극복하기 위한 혁신적인 기술로 지능형 반사표면(RIS)이 제안되었다. RIS는 평면에 배열된 다수의 저전력 수동 반사 소자로 구성되며, 각 소자의 반사 위상을 독립적으로 조절함으로써 무선 전파의 경로를 능동적으로 제어하고 수신 신호 품질을 획기적으로 향상시킬 수 있다. 또한, 신호를 증폭하는 중계기(Relay)와 달리 능동 RF 체인을 포함하지 않기 때문에, 하드웨어 비용이 저렴하고 에너지 효율적인 구조를 유지하면서도 전파 환경을 재구성할 수 있다는 장점을 가진다[1, 2].

RIS 시스템의 성능 분석에 있어, RIS가 설치되는 환경은 주로 기지국이나 사용자와의 가시거리(LoS)가 확보되는 경우가 많으므로 채널 모델링 시 LoS 성분이 일정 비율 이상 존재하는 Rician 페이딩 환경을 고려하는 것이 현실적이다[3]. Rician 환경에서는 강한 LoS 성분을 활용하여 위상을 정렬할 경우 높은 빔포밍 이득을 기대할 수 있다. 하지만 실제 RIS 구현에 있어서는 하드웨어 복잡도와 비용 절감을 위해 반사 소자의 위상 제어기가 연속값이 아닌 유한 비트 해상도(Finite bit resolution)로 제한되는 경우가 많다. 따라서 이러한 이산적 위상 제약 하에서 RIS 소자 수와 위상 양자화 해상도가 전체 시스템 성능에 미치는 영향을 분석하는 것은 필수적이다.

이러한 배경에서 본 연구는 RIS가 보조하는 Rician 페이딩 다운링크 MISO 시스템에 대한 선행 연구[3]의 시스템 모델을 기반으로, RIS 소자 수 및 위상 양자화 비트 수 변화에 따른 에르고딕 용량 특성을 정량적으로 분석한다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 단일 기지국(Base Station, BS), 단일 지능형 반사표면(Reconfigurable Intelligent Surface, RIS), 그리고 단일 안테나 사용자로 구성된 RIS 보조 다운링크 MISO(Multiple-Input Single-Output) 시스템을 고려한다. 기지국은 M 개의 송신 안테나를 구비하고 있으며, RIS는 N 개의 수동 반사 소자로 구성되어 별도의 RF 체인이나 신호 처리 장치 없이 입사된 신호의 위상만을 조절한다. 기지국과 사용자 사이에는 직접 경로(Direct path)가 존재하며, 동시에 기지국에서 발사된 신호가 RIS를 경유하여 사용자에게 도달하는 반사 경로(Reflected path)가 존재한다고 가정한다. 기지국은 정보 심볼 s 를 송신 빔포밍 벡터 $\mathbf{f} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 로 선형 전처리하여 사용자에게 전송한다. 이때 송신 신호 벡터 \mathbf{X} 는 다음과 같이 정의되며, 기지국의 총 송신 전력은 1로 정규화된 것으로 가정한다. 여기서 s 는 평균 전력이 1로 정규화된 정보 심볼이다.

$$\mathbf{x} = \mathbf{f}s, \quad \|\mathbf{f}\|_2^2 = 1, \quad \mathbb{E}[|s|^2] = 1$$

사용자가 수신하는 신호 y 는 기지국으로부터 직접 수신된 신호와 RIS에 의해 반사된 신호의 중첩으로 표현되며, 여기에 가산성 백색 가우시안 잡음(AWGN)이 더해진다.

$$y = (\mathbf{h}^H \Phi \mathbf{H} + \mu \mathbf{g}^H) \mathbf{f}s + n$$

여기서 $\mathbf{H} \in \mathbb{C}^{N \times M}$ 는 기지국과 RIS 사이의 채널 행렬, $\mathbf{h} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 는 RIS와 사용자 사이의 채널 벡터, $\mathbf{g} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 는 기지국과 사용자 사이의 직접 채널 벡터를 나타낸다. $(\cdot)^H$ 는 켈레 전치(Hermitian transpose) 연산자를 의미한다. μ 는 직접 경로 대비 RIS 반사 경로의 상대적인 경로 손실 계수이며, $n \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ 는 평균이 0이고 분산이 σ^2 인 복소 가우시안 잡음이다. RIS의 반사 특성은 대각 행렬 Φ 로 모델링되며, 각 대각 성분은 해당 반사 소자에 의한 위상 변위를 나타낸다.

$$\Phi = \text{diag}(e^{j\theta_1}, e^{j\theta_2}, \dots, e^{j\theta_N}), \quad \theta_n \in [0, 2\pi)$$

여기서 θ_n 은 n 번째 RIS 소자의 위상 변이 값이다. 이상적인 경우, 위상 값은 연속적인 값을 가질 수 있지만, 실제 하드웨어 구현에서는 유한한 해상도로 제한될 수 있다. 수신 신호 모델을 간소화하고 빔포밍 설계를 용이하게 하기 위해, 직접 경로와 RIS 반사 경로를 결합한 유효 채널 (Effective Channel) 벡터 \mathbf{h}_{eff} 를 다음과 같이 정의한다.

$$\mathbf{h}_{\text{eff}}^H = \psi^T \text{diag}(\mathbf{h}^*) \mathbf{H} + \mu \mathbf{g}^H, \quad \psi = [e^{j\theta_1}, \dots, e^{j\theta_N}]^T$$

이를 이용하면 수신 신호의 결합 이득 스칼라 z 는 $z = \mathbf{h}_{\text{eff}}^H \mathbf{f}$ 로 표현된다. 이에 따른 수신 신호 대 잡음비(SNR)와 달성 가능한 에르고딕 용량(Ergodic Capacity)은 다음과 같다.

$$\gamma = \frac{|\mathbf{h}_{\text{eff}}^H \mathbf{f}|^2}{\sigma^2}, \quad C = \mathbb{E}[\log_2(1 + \gamma)]$$

본 연구에서는 모든 무선 채널이 Rician 페이딩 분포를 따른다고 가정한다. Rician 채널은 가시거리(LoS) 성분과 비가시거리(NLoS) 산란 성분의 합으로 모델링되며, 이는 다음과 같이 표현된다. 여기서 K 는 Rician factor로, LoS 성분과 NLoS 성분의 전력 비율을 나타낸다. K 값이 클수록 결정적인(Deterministic) LoS 성분이 지배적이 되어 채널의 불확실성이 감소한다.

$$\mathbf{X} = \sqrt{\frac{K}{K+1}} \mathbf{X}_{\text{LoS}} + \sqrt{\frac{1}{K+1}} \mathbf{X}_{\text{NLoS}}$$

본 논문의 목표는 수신 SNR을 최대화하는 최적의 송신 빔포밍 벡터 \mathbf{f} 와 RIS 위상 벡터 Ψ 를 찾는 것이며, 이는 다음의 최적화 문제로 정식화된다. 특히, 실제 하드웨어의 제약을 고려하여 RIS 위상이 유한한 해상도를 갖는 이산 집합 \mathcal{Q}_B 에 속해야 한다는 제약 조건을 포함한다.

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{f}, \Psi} \quad & |\mathbf{h}_{\text{eff}}^H(\Psi) \mathbf{f}|^2 \\ \text{s.t.} \quad & \|\mathbf{f}\|_2^2 = 1, \\ & \psi_n \in \mathcal{Q}_B \triangleq \left\{ e^{j \frac{2\pi k}{2^B}} \mid k = 0, \dots, 2^B - 1 \right\}, \\ & \forall n = 1, \dots, N \end{aligned}$$

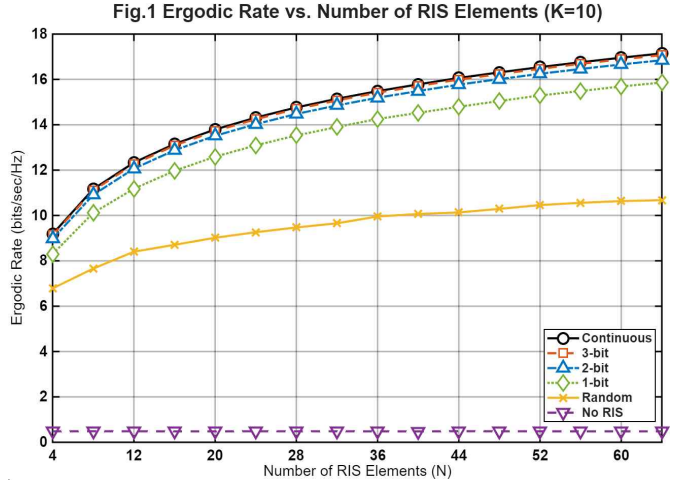
위 문제는 두 변수가 결합된 비볼록(Non-convex) 문제이므로, 본 논문에서는 교대 최적화(AO) 기법을 적용한다. RIS 위상이 고정된 경우, 최적의 송신 빔포밍 벡터 \mathbf{f} 는 유효 채널 방향과 정합되는 최대 비율 전송(MRT) 해로 주어진다.

$$\mathbf{f}^{(t+1)} = \frac{\mathbf{h}_{\text{eff}}(\Psi^{(t)})}{\|\mathbf{h}_{\text{eff}}(\Psi^{(t)})\|}$$

반대로 송신 빔포밍 벡터가 고정된 경우, RIS 위상 Ψ 는 반사 경로의 위상을 직접 경로의 위상과 정렬(Phase Alignment)하여 수신 신호의 크기를 최대화하도록 갱신된다. 연속적인 최적 위상은 다음과 같이 유도된다.

$$\angle \psi_n^{(t+1)} = \angle (\mu \mathbf{g}^H \mathbf{f}^{(t)}) - \angle (h_n^* (\mathbf{H} \mathbf{f}^{(t)})_n)$$

최종적으로, 산출된 연속 위상은 유클리드 거리가 가장 가까운 이산 위상 레벨 \mathcal{Q}_B 로 양자화되어 적용된다.



III. 결론

본 연구에서는 Rician 페이딩 환경에서 RIS가 보조하는 다운링크 MISO 시스템의 에르고딕 용량을 최대화하기 위한 공동 최적화 기법을 제안하고 그 성능을 분석하였다. 기지국 빔포밍과 RIS 반사 위상의 공동 설계를 위해 교대 최적화(AO) 기법을 적용하였으며, 각 부분 문제에 대해 최대 비율 전송(MRT)과 위상 정렬(Phase Alignment) 기반의 닫힌형 해(Closed-form solution)를 유도하여 낮은 복잡도로도 안정적인 수렴을 보장하였다. 특히, 하드웨어 제약을 고려한 이산 위상 시뮬레이션을 통해 RIS 반사 소자 수의 증가가 용량의 단조 증가로 이어짐을 확인하였으며, 위상 양자화 해상도가 약 3비트에 도달하면 이상적인 연속 위상 제어 성능에 수렴함을 입증하였다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 한국연구재단 및 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임. (RS-2022-NR070834, RS-2024-00397480)

참 고 문 헌

- [1] M. A. ElMossallamy et al., "Reconfigurable Intelligent Surfaces for Wireless Communications: Principles, Challenges, and Opportunities," in *IEEE Transactions on Cognitive Communications and Networking*, vol. 6, no. 3, pp. 990-1002, Sept. 2020, doi: 10.1109/TCCN.2020.2992604.
- [2] Z. Chen et al., "Ergodic Rate of Reconfigurable Intelligent Surface-Assisted Multigroup Multicast System," in *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 72, no. 4, pp. 5485-5490, April 2023, doi: 10.1109/TVT.2022.3228794.
- [3] K. K. Kota et al., "Characterization of Capacity and Outage of RIS-Aided Downlink Systems Under Rician Fading," in *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 14, no. 3, pp. 631-635, March 2025, doi: 10.1109/LWC.2024.3518357.