

수동 소자 반사 계수의 확률적 분포에 따른 지능형 재구성 표면 성능 분석

성주형, 조성윤, 박경원
한국전자기술연구원

{jh.sung, sycho, kwpark}@keti.re.kr

Performance Analysis of Reconfigurable Intelligent Surface under Probabilistic Distribution of Passive Elements

Juhyoung Sung, Sungyoon Cho, Kyoungwon Park
Korea Electronics Technology Institute (KETI)

요약

차세대 통신의 핵심 기술 중 하나로 주목받고 있는 지능형 재구성 표면(Reconfigurable intelligent surface, RIS)은 능동 소자의 높은 전력 소모와 하드웨어(hardware, HW) 복잡도 제약 조건에 따라 위상만 제어할 수 있는 수동 소자로 구성된다. 본 논문에서는 공정 과정에서의 오차 및 전파의 굴절 등으로 인한 실제 구현 상의 손실을 반영하기 위하여 RIS를 구성하는 수동 소자의 반사 계수가 확률 분포를 따르도록 모델링하고, 수동 소자 반사 계수의 확률적 분포에 따라 데이터 통신 성능의 변화를 분석한다. 반사 계수 분포에 따른 성능 분석 결과는 향후 실제 구현 환경을 반영한 최적 RIS 설계를 위한 자료로 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

I. 서 론

차세대 통신 시스템의 주요 요구사항인 초고속·초저지연·초연결 서비스 지원을 위해서 5세대 이동통신 시스템에서의 밀리미터 주파수와 같은 높은 주파수 대역의 활용이 확대되고 있다. 높은 주파수 대역에서는 이용 가능한 대역폭이 증가하는 반면, 전파의 직진성이 강해지고 경로 순발력이 크게 발생하여 건물이나 장애물 등으로 인한 통신 음영 지역이 발생하는 문제가 있다. 통신 음영 지역 해소를 위해 중계기나 추가적인 기지국 설치가 고려되고 있으나, 높은 초기 구축 비용과 전력 소모로 인하여 현실적인 한계가 존재한다. 이러한 배경 속에서 지능형 재구성 표면(Reconfigurable intelligent surface, RIS)을 통하여 무선 채널의 전파 환경 자체를 제어하는 기술이 많은 주목을 받고 있다[1]. RIS는 다수의 반사 소자로 구성된 인공 표면으로, RIS를 구성하는 소자를 제어하여 RIS에 입사되는 전파를 원하는 방향으로 재구성할 수 있다. 전통적인 통신 시스템에서 높은 비용과 하드웨어(hardware, HW) 복잡도를 요구하는 능동 소자를 이용한 릴레이(relay) 기술과 달리, RIS는 수동 소자로 구성되어 신호의 종종 없이 전파를 반사하는 저전력 방식으로 동작 가능하다는 특징이 있다. 이러한 수동 소자의 위상을 제어함으로써 원하는 방향으로 신호를 모을 수 있어, 기지국과 수신기 사이에 LoS (line-of-sight) 경로가 형성되지 않더라도 효과적으로 데이터 통신을 지원할 수 있다. 이상적인 RIS의 경우, 입사되는 전파가 손실 없이 원하는 경로로 전반사 되어야 하지만 실제 환경에서는 공정 과정에서의 오차, RIS에서의 전파 흡수, 굴절 등으로 인한 손실을 고려해야 한다.

본 논문에서는 이러한 반사 과정에서의 손실을 보다 현실적으로 반영하기 위하여 RIS를 구성하는 수동 소자의 반사 계수에 대한 확률적 모델링을 수행한다. 이를 위하여, 반사 계수가 베타 분포를 따른다고 가정하여 반사 효율의 불균형성을 반영한다. 추가로, 베타 분포의 파라미터를 조정하면서 반사 특성을 변화시키고, 이에 따른 데이터 전송률 성능 변화를 정량적으로 평가한다. 이를 통하여, 이상적인 반사 가정을 적용한 경우와 비교하여 실제 RIS 구현 환경에서의 성능 특성을 현실적으로 분석한다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 기지국과 수신기 사이에 장애물이 존재하여 직접적인 통신 링크가 형성되지 않고, 기지국이 RIS를 통하여 수신기에 통신을 지원하는 환경을 가정한다. 안테나의 개수가 N 인 기지국이 수동 소자의 개수가 M 인 RIS를 이용하여 단일 안테나를 사용하는 1개의 수신 단말을 지원하는 경우, 수신 신호 y 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$y = \sqrt{P} \mathbf{h}^H \boldsymbol{\Theta} \mathbf{G} \mathbf{f} s + n, \quad (1a)$$

$$\boldsymbol{\Theta} = [\gamma_1 e^{j\phi_1}, \dots, \gamma_M e^{j\phi_M}]^T, \quad (1b)$$

$$\boldsymbol{\Theta} = \text{diag}(\boldsymbol{\Theta}), \quad (1c)$$

여기서, P , s 는 각각 송신 전력, 송신 복소 심볼을 의미하며, $\mathbf{h} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 는 RIS와 수신기 사이의 채널, $\boldsymbol{\Theta} \in \mathbb{C}^{M \times M}$ 는 수동 소자 반사 행렬, $\mathbf{G} \in \mathbb{C}^{M \times N}$ 는 기지국과 RIS 사이의 채널, $\mathbf{f} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 는 송신 범포밍 벡터를 나타내며, $n \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_n^2)$ 은 가우시안 잡음 신호를 의미한다. RIS

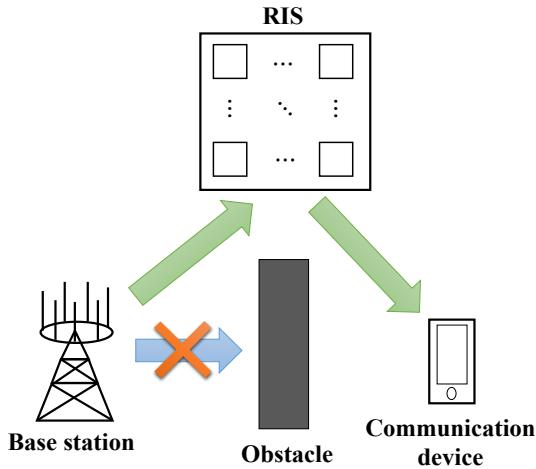


그림 1. 장애물이 존재하는 시스템에서 RIS를 이용한 통신 시스템 구조

특성을 결정하는 파라미터 γ_m , ϕ_m 은 각각 m 번째 수동 소자의 반사 계수와 위상을 의미한다. 이상적인 전반사를 가정하는 경우 모든 m 에 대해 $\gamma_m = 1$ 이 성립하지만 현실적인 RIS 구현 환경에서의 손실을 반영하기 위해, 본 논문에서는 다음과 같이 확률적 모델링을 통하여 반사 계수를 베타 분포를 따르도록 하여 0과 1 사이의 값을 갖도록 한다.

$$\gamma_m \sim \text{Beta}(\alpha, \beta), \forall m. \quad (2)$$

한편, 수신기의 데이터 전송률의 최적화를 위한 \mathbf{f} 와 Θ 를 구하기 위해, 행렬과 벡터의 선형 연산을 통하여 (1a)는 다음과 같이 다시 표현할 수 있다.

$$\mathbf{y} = \sqrt{P}\mathbf{\Theta}^T \text{diag}(\mathbf{h}^H)\mathbf{G}\mathbf{f}\mathbf{s} + \mathbf{n}. \quad (3)$$

실제 RIS 구현 환경에서는 모든 수신 소자의 반사 계수에 대한 정확한 값을 알 수 없기 때문에 전반사 가정을 고려하며, 데이터 전송률을 최대화 시키는 \mathbf{f} 와 Θ 는 모두 \mathbf{h} 및 \mathbf{G} 에만 의존한 결과로 도출할 수 있다[2].

III. 반사 계수의 확률적 분포에 따른 RIS 성능 분석

본 절에서는 모의 실험을 통하여 II절에서 나타낸 RIS를 구성하는 수동 소자의 반사 계수를 결정하는 확률 분포를 변화시키면서 이에 따른 수신기의 데이터 전송 효율을 분석한다. 모의 실험 환경은 기지국의 송신 안테나의 개수와 RIS의 수동 소자 개수가 각각 64가 되도록 설정하고, 1개의 수신 안테나를 갖는 단일 수신기를 지원하도록 구성한다. 전반사 가정을 통하여 데이터 통신 효율을 최대화 시키는 송신 빔포밍 벡터와 수동 소자의 위상을 구하고[2], 확률 분포를 통해 수동 소자의 반사 계수를 반영한다. 반사 계수의 분포를 조정하기 위하여 (2)의 베타 분포에서 $\beta = 1$ 로 고정하고, α 를 변화시킨다. 베타 분포의 통계적 특성에 따라, α 의 값이 증가할 수록, 반사 계수의 평균은 1에 근접한 값을 가지면서 분산은 작아지게 되어 수동 소자가 입사된 신호에 대한 전반사를 적용하는 이상적인 RIS 환경과 근접한 특성을 갖게 된다.

그림 2는 신호 대 잡음 비(Signal-to-noise ratio, SNR)를 $\text{SNR} = \frac{P}{\sigma_n^2}$ 로 정의하였을 때, 베타 분포의 파라미터 α 를 0.5에서 100까지 변화시키면서 수신기의 데이터 전송률을 변화를 분석한 결과이다. Shannon의 채널

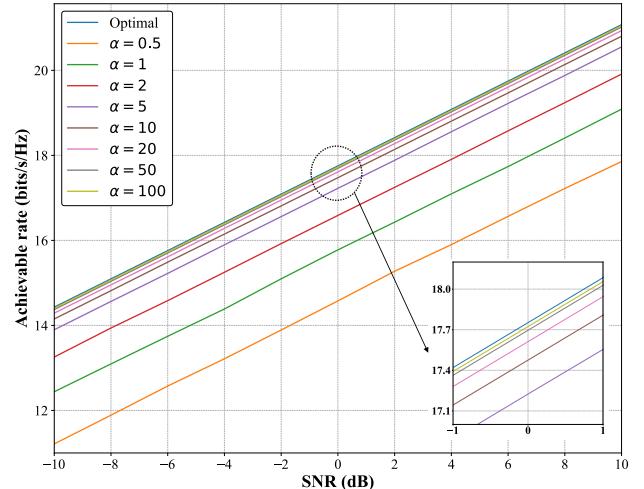


그림 2. 수동 소자 반사 계수의 베타 분포 파라미터 α 및 SNR 변화에 따른 데이터 전송률

용량에 따라 α 와 무관하게 SNR 증가에 따라 데이터 전송률이 향상되는 것을 확인 할 수 있다. 이에 더해, 동일한 SNR에서는 α 가 증가할 수록 데이터 전송률이 향상되는 것을 관측할 수 있다. 이는 앞서 예상한대로 α 가 커짐에 따라 수동 소자가 이상적인 전반사 특성을 따르도록 동작하여 RIS로 입사되는 전파에 대한 손실을 감소시키면서 수신기 방향으로 신호를 반사 시킬 수 있기 때문이다. 한편, α 의 증가에 따라 베타 분포를 따르는 반사 계수의 평균이 충분히 큰 구간에서는 유효 채널 이득이 포화되어 통신 성능 향상 폭이 제한적인 것을 확인 할 수 있다.

IV. 결론

본 연구에서는 RIS 기반 통신 시스템에서 베타 분포 기반의 확률적 모델을 도입하여 수동 소자의 반사 손실을 반영하고, 분포 파라미터 변화에 따른 성능 특성을 분석하였다. 반사 계수의 평균이 작은 값을 따르는 분포에서 큰 값을 따르는 분포로 변화함에 따라 데이터 전송률이 개선되지만, 동시에 평균이 충분히 큰 구간에서는 포화되는 특성을 확인하였다. 이와 같은 결과는 RIS가 적용된 통신망의 성능을 향상시키기 위해, 빔포밍 및 수동 소자의 위상 제어 뿐만 아니라 반사 계수의 분포 특성을 고려한 현실적인 모델링이 필요함을 시사한다.

ACKNOWLEDGEMENT

이 논문은 2026년 해양수산부 및 과학기술정보통신부의 재원으로 해양수산과학기술원 및 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2024-00397992, 무선신호 탐지 기술을 통한 선박 식별 기술체계 개발, RS-2025-25442867, SDx 지능형 서비스의 최적 실행을 위한 생성형AI 지원 시스템SW 프레임워크 기술개발)

참고 문헌

- [1] K. K. Kota, P. D. Mankar, and H. S. Dhillon, "Characterization of capacity and outage of RIS-aided downlink systems under rician fading," *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, vol. 14, no. 3, pp. 631–635, Mar. 2025.
- [2] N. K. Kundu and M. R. McKay, "RIS-assisted MISO communication: Optimal beamformers and performance analysis," in *Proc. IEEE Globecom Workshops*, 2020, pp. 1–6.