

RIS 기반 OFDM 시스템에서의 Outage Probability 및 최소 요구 반사 소자 수 분석

최서연, 정민채*

세종대학교 전자정보통신공학과, 세종대학교 지능정보융합학과*

alwaysy02@sju.ac.kr, mcjung@sejong.ac.kr*

Analysis of Outage Probability and Minimum Required Reflecting Elements in RIS-Aided OFDM Systems

Seoyeon Choi, Minchae Jung*

Department of Electronics and Information Engineering, Sejong University

Department of Artificial Intelligence and Information Technology, Sejong University*

요 약

본 논문은 RIS(Reconfigurable Intelligence Surface) 기반 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 시스템에서의 효율적인 시스템 운영 방안에 대해 제시한다. 특히, 본 논문에서는 목표 서비스 품질을 만족하기 위해 필요한 RIS 반사 소자의 개수에 대한 수식적인 분석을 진행하였다. 이를 위해 목표 outage probability 제약 하에서 필요한 최소 RIS 반사 소자의 수를 OFDM 부반송파 수의 함수로 표현하는 폐쇄형 근사식을 유도하였다. 제안하는 수식을 통해 RIS 반사 소자의 개수와 OFDM 파라미터 간의 상충 관계를 규명하였고 이를 시뮬레이션을 통해 정확성을 검증하였다.

I. 서 론

향후 6G 무선 통신의 주요 후보 기술로 재구성 가능한 지능형 표면(RIS)이 각광받고 있다[1]. RIS는 다수의 반사 소자의 위상을 조절하여 수신 신호 강도를 높이거나 간섭을 줄임으로써, 통신 시스템의 스펙트럼 및 에너지 효율을 획기적으로 향상시킬 수 있다[2]. 또한, 5G 이후 6G 이동통신 환경에서는 초광대역 전송과 대규모 다중접속을 동시에 지원해야 하므로, RIS 기반 orthogonal frequency division multiplexing(OFDM) 시스템의 활용 가능성이 더욱 주목받고 있다. 그러나 RIS 기반 OFDM 시스템의 성능은 RIS 소자 수와 OFDM 부반송파 수에 의해 결정되며, 이는 차세대 무선 통신의 시스템 설계에서 검토해야 할 고려 요소 가운데 하나이다[3]. 따라서, 제한된 자원 내에서 목표 서비스 품질을 만족시키기 위해 이들 설계 변수를 어떻게 최적화할 것인가가 중요한 연구 주제로 제시될 수 있다.

기존 연구들은 주로 주어진 RIS 기반 OFDM 시스템의 성능을 분석하는 데 집중했다[3],[4]. 본 논문에서는 목표 서비스 품질을 만족하기 위해 필요한 OFDM 부반송파 수와 RIS 반사 소자 수라는 현실적인 시스템 파라미터를 대상으로 분석을 수행하였다. 이를 위해, 목표 성능을 만족시키는 최소 RIS 소자 수를 추정하는 폐쇄형 근사식을 유도하였다. 도출한 근사식을 통해 OFDM 부반송파 수에 맞추어 필요한 RIS 반사 소자 수를 복잡한 사전 과정 없이 도출하였으며, 주어진 OFDM 시스템에 적합한 RIS 운용 방안을 제시하였다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 기지국(BS, base station), RIS, 단일 사용자(UE, user equipment)로 구성된 하향링크 통신 환경을 고려한다. BS와 UE 사이의 직접 경로는 장애물로 인해 차단되었다고 가정하며, BS의 신호는 BS-

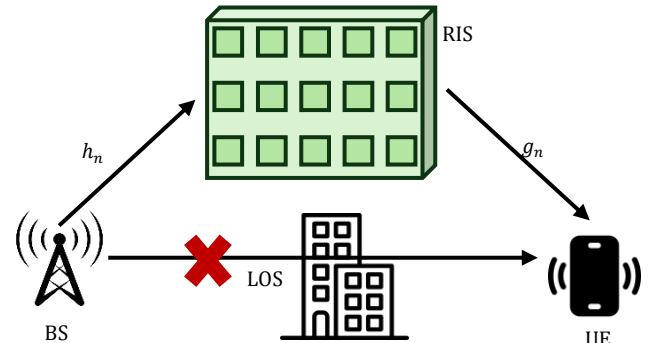


그림 1. 고려하는 RIS 기반 OFDM 통신 시스템 모델

RIS-UE 경로를 통해서만 전달될 수 있다. RIS는 독립적으로 위상 제어가 가능한 N 개의 반사소자로

구성된다. BS-RIS 간 채널은 $\mathbf{h} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$, RIS-UE 간 채널은 $\mathbf{g} \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 으로 정의한다. 두 채널은 서로 독립적이고 동일한 분포를 따른다고 가정하였으며, 두 채널 벡터의 $i \in \{1, \dots, N\}$ 번째 원소는 $h_i = |h_i|e^{j\theta_i}$, $g_i = |g_i|e^{j\psi_i}$ 으로 표현된다. 또한 두 채널의 구성 요소들은 모두 $\mathcal{CN}(0,1)$ 분포를 따르는 레일리 페이딩 채널을 가정한다. RIS 반사 소자의 위상 천이는 $\Phi = \text{diag}(e^{j\phi_1}, \dots, e^{j\phi_N}) \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 로 나타내고 수신 신호는 $\mathbf{r} = \mathbf{g}^T \Phi \mathbf{h} \mathbf{x} + \mathbf{n}$ 으로 표현된다. 여기서 \mathbf{n} 은 잡음으로 평균 0, 분산 1의 정규분포를 따른다고 가정한다. 신호를 최적화하기 위해 각 소자의 위상을 $\phi_i = \theta_i + \psi_i$ 로 설정하여 위상을 정렬하면, 합성 채널은 $\mathbf{g}^T \Phi \mathbf{h}$ 로 합성 채널 이득 A 는 다음과 같다.

$$A = \sum_{i=1}^N |h_i| |g_i|. \quad (1)$$

따라서, 수신 signal-to-noise ratio(SNR)은 다음과 같이 표현될 수 있다[2].

$$\gamma = \rho \left(\sum_{i=1}^N |h_i| |g_i| \right)^2 = \rho A^2. \quad (2)$$

기지국에서 전송하는 전송 전력을 ρ 로 정의하고 M 개의 부반송파에 균등하게 전력을 할당하였을 경우 시스템의 capacity 는 다음과 같이 표현된다.

$$R_{\text{sum}} = M \log_2(1 + \frac{\rho}{M} A^2). \text{ (bits/s/Hz)} \quad (3)$$

본 논문에서는 (3)을 기반으로 주어진 목표 capacity R_{th} 과 outage probability ε 에 대해 $P_{out} = P(R_{\text{sum}} < R_{th}) \leq \varepsilon$ 를 만족하는 최소 RIS 반사 소자의 개수에 대해서 분석한다.

III. 최소 요구 RIS 반사 소자 수 분석

목표 capacity 에 대한 폐쇄형 근사식을 유도하기 위해, 먼저 outage probability 을 채널 이득 A 에 대한 조건으로 다음과 같이 변환한다.

$$\Pr(A < \sqrt{T(M)}) \leq \varepsilon \Leftrightarrow \Pr(A \geq \sqrt{T(M)}) \geq 1 - \varepsilon, \quad (4)$$

여기서 임계 값 $T(M) = \frac{M}{\rho} \left(2^{\frac{R_{th}}{M}} - 1 \right)$ 이다. A 는 N 이 충분히 클 때 중심극한정리에 의해 평균이 $\mu_A = \frac{N\pi}{4}$, 분산이 $\sigma_A^2 = N \left(1 - \frac{\pi^2}{16} \right)$ 인 정규 분포로 근사할 수 있다. 이를 이용하면, 위의 확률 부등식은 다음과 같이 변환된다.

$$\mu_A - z\sigma_A \geq \sqrt{T}, \quad (5)$$

여기서 z 는 표준 정규 분포의 역 누적분포함수 값으로, $z = \Phi^{-1}(1 - \varepsilon)$ 이다. 간결한 표기를 위해 $c_1 = \frac{\pi}{4}$, $c_2 = \sqrt{1 - \frac{\pi^2}{16}}$ 로 정의하면, \sqrt{N} 에 대한 2 차 부등식은 다음과 같이 표현된다.

$$c_1 N - z c_2 \sqrt{N} - \sqrt{T} \geq 0, \quad (6)$$

이 부등식을 만족하는 N 의 최솟값, 즉 N 은 위 2 차 방정식의 양의 근을 구하여 얻을 수 있다. 최종적으로, 목표 outage probability 을 만족시키는 최소 RIS 반사 소자 수 N 에 대한 폐쇄형 근사식은 다음과 같다.

$$N^* = \left\lceil \left(\frac{z c_2 + \sqrt{(z c_2)^2 + 4 c_1 \sqrt{T}}}{2 c_1} \right)^2 \right\rceil. \quad (7)$$

ε 이 작아질수록 $z = \Phi^{-1}(1 - \varepsilon)$ 가 단조 증가하므로, (7) 식의 N^* 는 증가한다. 즉, 더 낮은 outage probability 을 요구할수록 동일한 조건에서 더 많은 RIS 반사 소자가 필요하다는 결론을 도출할 수 있다.

IV. 시뮬레이션 결과

최소 RIS 반사 소자 수 N 에 대한 폐쇄형 근사식을 검증하기 위해 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하고, 이론 값과의 정합성을 확인하였다. 실험 환경은 송신 전력이 10 dB, 목표 capacity $R_{th} = 300$ bits/s/Hz, 목표 outage probability 을 $\varepsilon = 0.1$ 로 설정하였다.

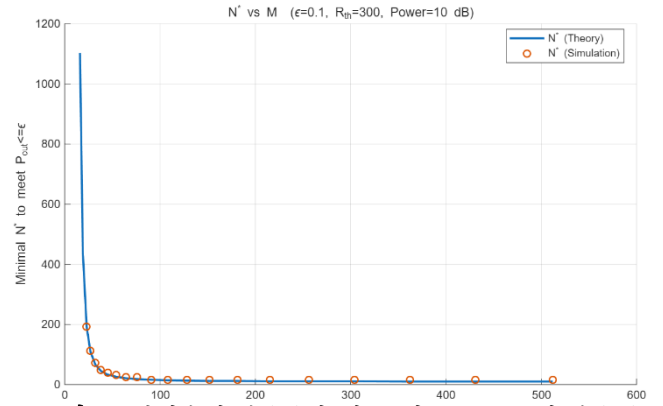


그림 2. 부반송파 수(M)에 따른 최소 RIS 소자 수(N^*)

그림 2 에서 실선은 (7)을 통해 도출한 폐쇄형 근사식 결과이며, 원형 마커는 시뮬레이션 결과를 보여준다. 그림 2 를 통해 (7)을 통한 이론 결과와 실험을 통한 결과가 일치함을 확인할 수 있다. 실험 결과, M 이 증가함에 따라 필요한 최소 RIS 반사 소자 수 N^* 는 완만히 감소하다 일정 값으로 포화하는 경향을 보인다. 이는 임계치 $T(M)$ 가 $M \rightarrow \infty$ 에서 $\frac{\ln 2}{\rho} R_{th}$ 로 빠르게 수렴하고, $N^* \propto \sqrt{T(M)}$ 의 스케일을 갖기 때문임을 확인하였다. 따라서 부반송파 수(M)는 적정 수준만 확보하면 추가 증가의 이득은 제한적이며, 목표 신뢰도(ε)를 충족하기 위해서는 RIS 반사 소자 수가 중요한 요소로 작용함을 확인하였다.

V. 결론

본 논문에서는 RIS 기반 OFDM 시스템의 효율적인 자원 할당을 위해, 목표 outage probability 을 만족시키는 최소 RIS 반사 소자 수를 OFDM 부반송파 수의 함수로 도출하는 폐쇄형 근사식을 제시하였다. 제안된 근사식은 시뮬레이션 결과와 비교 분석하여 높은 정확도를 가짐을 실험을 통해 입증하였다. 이는 시스템 구현에 앞서 부반송파 증가에 따른 성능 저하를 상쇄하기 위해 필요한 RIS 소자 수를 정량적으로 예측할 수 있는 이론적 토대를 제공하며, 이를 통해 비용 효율적인 RIS 기반 OFDM 통신 시스템 구축에 기여할 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2021R1C1C1012950).

참 고 문 헌

- [1] W. Saad et al, "A vision of 6G wireless systems: Applications, trends, technologies, and open research problems,". *IEEE Network*, vol. 34, no. 3, pp. 134-142, May 2020.
- [2] E. Basar, M. Di Renzo, J. De Rosny, M. Debbah, M. -S. Alouini, and R. Zhang, "Wireless communications through reconfigurable intelligent surfaces,". *IEEE Access*, vol. 7, pp. 116753-116773, Aug 2019.
- [3] Y. Yang, S. Zhang, and R. Zhang, "IRS-enhanced OFDM: Power allocation and passive array optimization," *IEEE Global Commun. Conf. (GLOBECOM)*, pp.1-6, Dec,2019.
- [4] Y. Yang, B. Zheng, S. Zhang, and R. Zhang, "Intelligent reflecting surface meets OFDM: Protocol design and rate maximization," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 68, no. 7, pp. 4522-4535, Mar 2020.