

하향링크 RIS-NOMA 시스템에서 일반화된 M-QAM 기법의 성능 분석

백주영, 이영석, 정방철

충남대학교

gybaek@o.cnu.ac.kr, yslee@o.cnu.ac.kr, bcjung@cnu.ac.kr

Performance Analysis of Generalized M-QAM Technique in Downlink RIS-NOMA Systems

Ju Yeong Baek, Young-Seok Lee, Bang Chul Jung

Chungnam National University

요약

본 논문에서는 M-진 직교 진폭 변조(quadrature amplitude modulation: QAM) 신호를 이용한 하향링크 재구성 가능한 지능형 표면 기반 하향링크 비직교 다중 접속(reconfigurable intelligent surfaces-based non-orthogonal multiple access: RIS-NOMA) 기법의 단말의 비트 당 오류율(bit-error-rate: BER) 성능의 수학적 표현을 도출한다. 본 논문의 수학적 분석은 각 단말에 서로 다른 차수의 QAM 신호를 고려할 수 있도록 일반화되었으며, 모의실험을 통해 본 논문에서 분석한 하향링크 RIS-NOMA 시스템의 수학적 BER 표현이 실제 모의실험 결과를 잘 나타내는 것을 확인한다. 이러한 성능 분석 결과는 추후 시스템 최적화 및 다양한 통신 환경에서의 성능 예측에 효과적으로 활용될 수 있다.

1. 서론

고주파수 대역을 고려하는 차세대 이동통신 시스템에서 극심한 경로 손실(path-loss)과 지형·지물에 의한 전파 차단(blockage)으로 인한 통신 커버리지 감소 문제를 효과적으로 해결하기 위해 재구성 가능한 지능형 표면(reconfigurable intelligent surfaces: RIS) 기반 통신 시스템 연구가 활발히 진행되고 있다. 특히, RIS는 비직교 다중 접속 기술(non-orthogonal multiple access: NOMA)과 결합되어 높은 에너지 효율 및 전반적인 통신 성능 향상을 달성할 수 있을 것으로 예상된다 [1].

이와 관련하여, 시스템 파라미터 최적화와 성능 예측을 위한 RIS-NOMA 기법의 이론적 성능 분석 연구가 다양한 통신 환경에 대해 진행되었다 [2-4]. 구체적으로, [2]에서는 성상 조절을 적용한 직교 위상 편이(quadrature phase shift keying: QPSK) 변조 신호에 대한 하향링크 RIS-NOMA 시스템의 비트 당 오류율(bit-error-rates: BER) 성능이 수학적으로 분석되었으며, [3]에서는 기지국으로부터 각각 근-원거리(near-far)에 있는 두 단말에 각기 다른 차수의 직교 진폭 변조(quadrature amplitude modulation: QAM)를 고려한 하향링크 RIS-NOMA 시스템의 BER 성능이 이론적으로 분석되었으나 RIS로부터 각 단말에 발생할 수 있는 간섭 채널을 고려하지 않았다. [4]에서는 간섭 채널을 잡음과 같이 고려한 RIS-NOMA 기법의 이론적 성능 분석이 진행되었으나, 하향링크 통신환경을 고려할 때 신호 검파 관점에서 간섭 채널의 이득을 추가적으로 활용한 성능 향상 요인이 존재한다. 따라서, 본 논문에서는 간섭 채널의 이득을 추가적으로 활용할 수 있는 시스템 모델 [2]을 고려하여 M-진 QAM 신호를 이용한 이론적인 BER 성능을 최초로 분석한다. 또한, 모의실험을 통해 수학적 분석 결과가 실제 모의실험을 통한 BER 성능을 잘 나타내는 것을 검증한다.

II. 하향링크 RIS-NOMA 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 단일 안테나를 가지는 기지국과 각각 단일 안테나를 가지는 K 개의 단말이 존재하는 하향링크 통신 환경을 고려한다. 이때, 기지국과 단말 간 직접 경로는 존재하지 않는다고 가정하였으며 기지국과 모든 단말 사이에 $N(\gg K)$ 개의 안테나를 갖는 RIS가 존재하여 NOMA를 통해 기지국에서 각 단말로 서로 다른 차수의 QAM 신호를 전송한다고 가정하였다. RIS는 K 개의 부평면(subsurface)으로 분할되어 동작하며, N_k 개의 안테나를 갖는 $k(\in\{1, \dots, K\})$ 째 부평면은 k 째 단말의 수신 신호 대 잡음 비(signal-to-noise ratio: SNR)를 최대화하도록 동작한다. 또한, 본 논문에서는 기지국과 임의의 $i(\in\{1, \dots, K\})$ 째 부평면 간 무선 채널을 $\mathbf{h}_{i,k} \in \mathbb{C}^{N_i}$, 임의의 i 째 부평면과 k 째 단말 간의 무선 채널을 $\mathbf{g}_{k,i} \in \mathbb{C}^{1 \times N_i}$ 로 정의하였고 모든 무선 채널은 서로 독립이며 각각 $\mathbf{h}_i \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, d_{BR}^{\alpha} \mathbf{I}_{N_i})$ 와

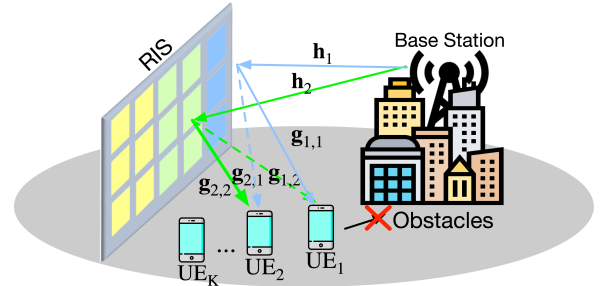


그림 1. 하향링크 RIS-NOMA 시스템 모델.

$\mathbf{g}_{k,i} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, d_{BR}^{\alpha} \mathbf{I}_{N_i})$ 분포를 따르는 레일리 페이딩(Rayleigh fading) 채널 환경을 고려하였다. 여기서, α , d_{BR} , d_k 는 각각 경로 감쇄 지수, 기지국과 RIS 간의 거리, RIS와 k 째 단말 간의 거리를 의미한다. 또한, 무선 채널 $\mathbf{h}_i$ 와 $\mathbf{g}_{k,i}$ 의 $n \in \{1, \dots, N_i\}$ 째 원소인 $h_{i,n}$ 와 $g_{k,i,n}$ 의 위상을 각각 $\angle h_{i,n} := \vartheta_{i,n}$ 와 $\angle g_{k,i,n} := \varphi_{k,i,n}$ 로 정의하였으며, RIS의 k 째 부평면의 위상 전이는 대각행렬 $\boldsymbol{\Theta}_k \in \mathbb{C}^{N_k \times N_k}$ 로 표현되어 n 째 대각 원소는 $e^{-j(\vartheta_{k,n} + \varphi_{k,k,n})}$ 로 나타낼 수 있다. 따라서, 하향링크 RIS-NOMA 시스템의 k 째 사용자가 수신하는 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y_k = \left(\mathbf{g}_{k,k} \boldsymbol{\Theta}_k \mathbf{h}_k + \sum_{i \neq k} \mathbf{g}_{k,i} \boldsymbol{\Theta}_i \mathbf{h}_i \right) x + z_k$$

여기서 z_k 은 k 째 단말에서 발생하는 부가 열잡음을 의미하며 $\mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ 분포를 따른다고 가정한다. 또한, $x \in \mathbb{C}$ 는 기지국에서 송신한 신호의 가중합을 의미하며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$x = \sum_{k=1}^K \sqrt{q_k P} s_k$$

여기서 $\tilde{q}_k$ 는 k 째 단말로 전송되는 신호의 전력 할당 비율을 나타내고 s_k 은 k 째 단말로 전송되는 정규화된 M_k 진 QAM 심볼을 나타낸다. 따라서, k 째 단말은 결합 최대 우도(joint maximum likelihood: JML) 검파기를 사용하여 다음과 같이 심볼 $\hat{\mathbf{s}} = [\hat{s}_1, \dots, \hat{s}_M]$ 를 검파한다:

$$\hat{\mathbf{s}} = \underset{s_1, \dots, s_K \in \mathcal{S}}{\operatorname{argmin}} \left\{ \left| y_k - \left(\mathbf{g}_{k,k} \boldsymbol{\Theta}_k \mathbf{h}_k + \sum_{i \neq k} \mathbf{g}_{k,i} \boldsymbol{\Theta}_i \mathbf{h}_i \right) x \right|^2 \right\}$$

이때 $\mathcal{S}$ 는 정규화된 QAM 심볼의 후보 집합을 의미한다.

III. 하향링크 RIS-NOMA 시스템에서 일반화된 M-QAM의 성능 분석

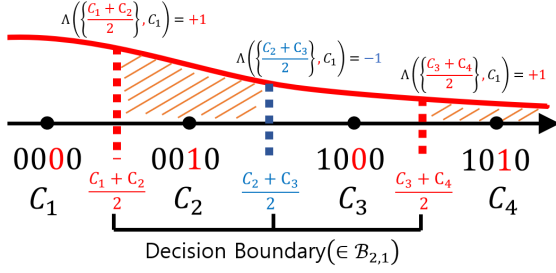


그림 2. $M_1 = M_2 = 4$ -진 QAM 신호에 대해 실수축으로 사영된 신호 성상 예시.

본 논문에서는 하향링크 RIS-NOMA 시스템에서 기지국이 임의 차수의 QAM 신호를 이용하여 두 단말을 지원할 때의 BER 성능을 수학적으로 분석한다. [2]와 같이 $k \in \{1, 2\}$ 짝 유효 채널 $\zeta_k = \sum_{i=1}^2 \mathbf{g}_{k,i} \mathbf{\Theta}_i \mathbf{h}_i$ 의 진폭을 유효 채널의 실수부 $\rho_k := \Re\{\zeta_k\} \sim \mathcal{N}(\mu_k, v_k)$ 로 근사하여 BER을 유도한다. 여기서 μ_k, v_k 는 각각 ρ_k 의 평균과 분산을 의미하며 [2]와 같다.

M_k -진 QAM 신호는 $\sqrt{M_k}$ -진 펄스 진폭 변조 (pulse amplitude modulation: PAM) 신호로 해석하여 이론적인 BER을 유도할 수 있다 [5]. 따라서, 유효 채널이 주어졌을 때 k 째 단말의 조건부 오류 확률의 상한은 다음과 같다.

$$\Pr(\epsilon_k | \rho_k) \leq \frac{2}{\sqrt{M_1 M_2} \log_2 \sqrt{M_k}} \sum_{p=1}^{\log_2 \sqrt{M_k}} \sum_{\beta \in B_{k,p}} \sum_{a=1}^{\sqrt{M_1 M_2}/2} \Lambda(\beta, C_a) \cdot Q\left(\rho_k \sqrt{2D_{\beta, C_a}^2} \gamma\right)$$

여기서 C_a 는 [5]와 같이 실수축으로 사영한 $a \in \{1, \dots, \sqrt{M_1 M_2}\}$ 짝 성상을 나타내며, $B_{k,p}$ 는 k 째 단말의 $p \in \{1, \dots, \log_2 \sqrt{M_k}\}$ 짝 비트의 결정 경계 (decision boundary) 집합을 의미한다. 이때, $\beta \in B_{k,p}$ 는 집합 $B_{k,p}$ 내의 임의의 결정 경계 원소를 나타내며 $\Lambda(\beta, C_a)$ 는 C_a 가 주어진 β 를 기준으로 오류가 발생했을 때 Q -함수의 부호를 나타내고 D_{β, C_a} 는 C_a 와 주어진 β 사이의 유클리디안 거리(Euclidean distance)를 의미한다. 또한, $\gamma = P/\sigma^2$ 는 송신 SNR을 나타낸다. 구체적으로, 그림 2는 $M_1 = M_2 = 4$ 일 때 두 번째의 단말의 첫 번째 비트의 오류가 발생하는 영역을 도시한 그림이다. 따라서, 이러한 상황에서 결정 경계 집합은 $B_{2,1} = \left\{ \frac{C_1 + C_2}{2}, \frac{C_2 + C_3}{2}, \frac{C_3 + C_4}{2} \right\}$

와 같이 정의될 수 있으며, 일례로 $\Lambda\left(\frac{C_1 + C_2}{2}, C_1\right)$ 는 양의 부호를 갖는 것을 확인할 수 있다. 두 번째 비트의 경우 허수축으로 사영하여 동일한 조건부 오류 확률을 구할 수 있으며 이러한 방식을 통해 임의의 정방형 QAM 신호에 대한 모든 조건부 오류 확률을 계산할 수 있다.

본 논문에서는 닫힌형 형태의 수학적 BER 표현을 얻기 위해 $Q(x) \approx e^{(-\delta_1 x^2 - \delta_2 x - \delta_3)}$ 와 같이 근사식을 활용하였고, 이때 각 파라미터는 [4]와 같이 설정하였다. 따라서, M -진 QAM 변조 신호를 이용한 하향링크 RIS-NOMA 시스템의 최종적인 BER 성능은 다음과 같이 유도된다.

$$\Pr(\epsilon_k) \approx \frac{2}{\sqrt{M_1 M_2} \log_2 \sqrt{M_k}} \sum_{p=1}^{\log_2 \sqrt{M_k}} \sum_{\beta \in B_{k,p}} \sum_{a=1}^{\sqrt{M_1 M_2}/2} \Lambda(\beta, C_a) \cdot e^{-\frac{2\delta_1 v_k + \mu_k^2}{2v_k}} \cdot e^{-\frac{(\delta_2 v_k D_{\beta, C_a} \sqrt{2\gamma} - \mu_k)^2}{8\delta_1 v_k^2 D_{\beta, C_a}^2 \gamma + 2v_k}} \cdot Q\left(\frac{(\delta_2 v_k D_{\beta, C_a} \sqrt{2\gamma} - \mu_k)}{\sqrt{4\delta_1 v_k D_{\beta, C_a}^2 \gamma + 1}}\right)$$

IV. 모의실험 결과 및 결론

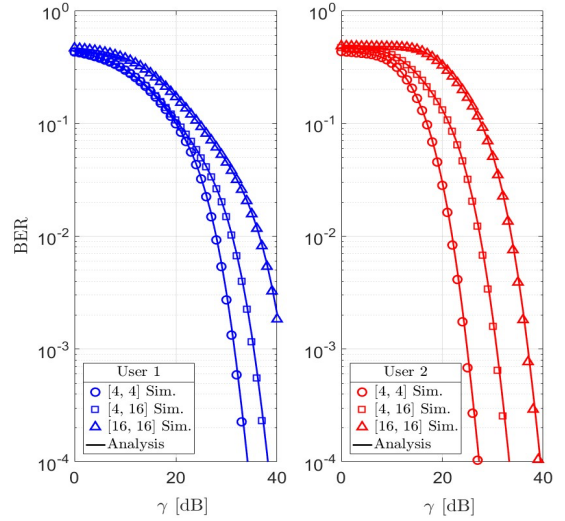


그림 3. 하향링크 RIS-NOMA 시스템 BER 성능 분석 결과.

그림 3은 다양한 M -진 QAM 신호에 대한 하향링크 RIS-NOMA 시스템의 송신 SNR 대비 BER 성능을 도시한 결과이다. 본 모의실험에서는 $[M_1, M_2] = \{[4, 4], [4, 16], [16, 16]\}$ 에 대한 변조 신호를 가정하였으며 신호의 전력 할당 비율 (q_1, q_2) 은 각각 $(0.8, 0.2)$, $(0.7826, 0.2174)$, $(0.9474, 0.0526)$ 로 설정하였다. 기지국-RIS 및 RIS-단말 간의 거리는 각각 $d_{BR} = 20\text{m}$, $d_1 = 10\text{m}$, $d_2 = 4\text{m}$ 로 가정하였고 경로 감쇠 지수는 $\alpha = 2$ 로 가정하였다. RIS의 안테나 수는 $N = 100$ 로 설정하였으며, 각 부평면의 안테나 수는 $N_1 = N_2 = 50$ 로 설정하였다. 모의실험을 통해, 본 논문에서 수학적으로 분석한 하향링크 RIS-NOMA 시스템의 BER 성능이 실제 모의실험 결과를 잘 나타내는 것을 검증하였다. 이러한 분석 결과는 추후 RIS-NOMA 시스템의 파라미터 최적화와 같은 응용에 활용될 수 있을 것으로 예상된다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원(2021-0-00486, ABC-MIMO: 증강 빔 라우팅 기반 차세대 다중 입출력 통신 시스템) 및 한국연구재단의 지원(No. NRF-2022R111A3073740)을 받아 수행된 연구임.

참고 문헌

- [1] A. S. D. Sena et al., "What role do intelligent reflecting surfaces play in multi-antenna non-orthogonal multiple access?," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 27, no. 5, pp. 24-31, Oct. 2020.
- [2] J. Y. Baek, Y. -S. Lee, and B. C. Jung, "Downlink RIS-NOMA with constellation adjustment for 6G wireless communication systems," In *Proc. IEEE 21th Consum. Commun. Netw. Conf.*, Las Vegas, NV, USA, Jan. 2024.
- [3] V. C. Thirumavalavan and T. S. Jayaraman, "BER analysis of reconfigurable intelligent surface assisted downlink power domain NOMA system," In *Proc. Int. Conf. Commun. Syst. Netw. (COMSNETS)*, Bengaluru, India, Jan. 2020, pp. 519-522.
- [4] M. Aldababsa, A. Khaleel, and E. Basar, "STAR-RIS-NOMA networks: An error performance perspective," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 26, no. 8, pp. 1784-1788, Aug. 2022.
- [5] K. Cho and D. Yoon, "On the general BER expression of one and two-dimensional amplitude modulations," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 50, no. 7, pp. 1074-1080, Jul. 2002.