

6G 무선통신 시스템에서 신호 성상도 조정을 통한 하향링크 RIS-NOMA 기법의 성능 향상

백주영, 이영석, 정방철

충남대학교

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

Performance Improvement of Downlink RIS-NOMA Technique through Signal Constellation Adjustment for 6G Wireless Communication Systems

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

Chungnam National University

요약

본 논문에서는 6G 무선통신 시스템에서 디지털 변조 신호의 성상도를 조절(constellation adjustment: CA)하는 재구성 가능한 지능형 표면(reconfigurable intelligent surfaces: RIS)기반 하향링크 비직교 다중 접속(non-orthogonal multiple access: NOMA) 기법을 제안한다. 특히, 본 논문에서는 제안한 시스템의 수신기에서 결합 최대 우도(joint maximum likelihood: JML)기반 최적 검파기를 사용할 때의 비트 오류 확률(bit-error-rate: BER) 성능을 수학적으로 분석한다. 모의실험을 통해 CA 기법을 적용하는 제안한 하향링크 RIS-NOMA 시스템이 BER 측면에서 기본 기법 대비 큰 성능 향상을 보이는 것을 확인한다. 또한, 본 논문에서 이론적으로 분석한 CA 기반 RIS-NOMA 기법의 BER이 모의실험 결과를 잘 예측함을 검증한다.

I. 서론

차세대 이동통신 시스템에서 고려되는 밀리미터파나 테라헤르츠 밴드와 같은 초고주파 대역은 물리적 전파 특성에 의해 장애물에 의한 전파 막힘(blockage) 문제와 극심한 경로 손실(path-loss)이 통신 성능에 큰 영향을 미친다. 한편, 재구성 가능한 지능형 표면(reconfigurable intelligent surfaces: RIS) 기술은 입사되는 신호의 위상을 조절하여 통신 링크 간 가상의 경로를 형성할 수 있어 이와 같은 초고주파 대역에서의 전파 전파(wave propagation) 문제를 효과적으로 해결할 것으로 촉망받고 있다 [1]. 또한, 최근에는 주파수 효율성과 대규모 연결성을 크게 향상시킬 수 있는 비직교 다중 접속(non-orthogonal multiple access: NOMA)에 RIS를 적용하는 연구가 활발히 진행되고 있다 [2], [3]. 특히, [3]에서는 상향링크 RIS-NOMA 시스템에 신호 성상도 간 최소 거리를 최대화할 수 있도록 설계된 신호 성상도 조절(constellation adjustment: CA) 기술의 접목을 제안하여 CA를 적용한 RIS-NOMA 시스템의 통신 성능이 크게 향상될 수 있음을 검증하였다.

그러나, CA를 적용한 하향링크 RIS-NOMA 시스템은 아직 문헌에서 보고되지 않았고, CA 기반 RIS-NOMA 시스템의 비트 당 오류율(bit-error-rate: BER) 성능은 이론적으로 분석되지 않았다. 따라서, 본 논문에서는 하향링크 RIS-NOMA 시스템에서 BER 성능을 크게 향상시키기 위한 CA 기반 RIS-NOMA 시스템을 제안한다. 또한, 본 논문에서는 제안한 시스템에서 수신기가 결합 최대 우도(joint maximum likelihood: JML) 검파기를 고려할 때의 BER 성능을 수학적으로 분석한다. 모의실험을 통해, CA 기반 RIS-NOMA 시스템의 통신 성능 향상을 확인하고, 이론적으로 분석한 결과가 모의실험의 결과를 잘 나타내는 것을 검증한다.

II. CA 기반 RIS-NOMA 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 각각 단일 안테나를 가지는 K 개의 단말과 기지국 사이에 $N(\gg K)$ 개의 안테나를 갖는 RIS가 존재하는 하향링크 RIS-NOMA 시스템을 고려한다. 이때, RIS는 K 개의 부평면(subsurface)으로 전체 안테나를 분할하고 N_k 개의 안테나를 갖는 $k(\in \{1, \dots, K\})$ 제 부평면은 k 제 단말과 일대일 매핑되어 기지국과 RIS 및 RIS와 단말 간 무선 채널을 정렬한다고 가정하였다. 또한, 본 논문에서는 k 제 단말과 RIS의 임의의 $i(\in \{1, \dots, K\})$ 제 부평면 간 무선 채널을 $\mathbf{g}_{k,i} \in \mathbb{C}^{1 \times N_i}$, RIS의 i 제 부평면과 기지국 간 무선 채널을 $\mathbf{h}_i \in \mathbb{C}^{N_i}$ 로 정의하였으며 모든 무선 채널은 동일하고 독립인 통계적 특성을 따르고 각각 $\mathbf{g}_{k,i} \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, l_{\text{BR}}^{\alpha} \mathbf{I}_{N_i})$ 와 $\mathbf{h}_i \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, l_k^{\alpha} \mathbf{I}_{N_i})$ 인 복소 가우시안 분포를 따른다고 가정하였다. 여기서, α , l_{BR} , l_k 는 각각 경로 감쇄 지수, 기지국과 RIS 간의 거리, RIS와 k 제 단말 간의 거리를 의미한다. 또한, 본 논문에서는 지형지물과 같은 전파 방해물에 의해 사용자와 기지국 간의 직접적인 통신 경로는 없다고 가정하였다.

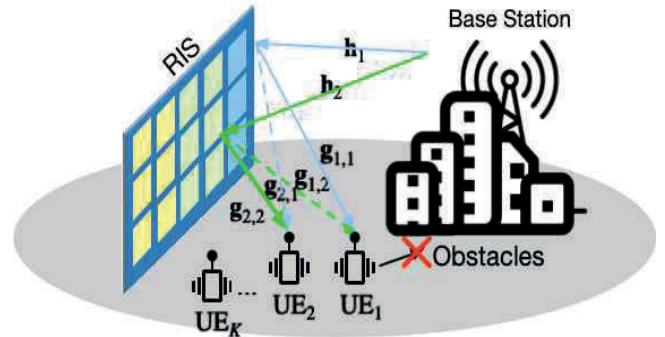


그림 1. 성상도 조절 기반 하향링크 RIS-NOMA 시스템

본 논문에서 RIS는 수신 신호 대 잡음 비(signal-to-noise ratio: SNR)를 최대화하도록 기지국과 RIS 및 RIS와 단말 간의 무선 채널의 위상을 정렬한다고 가정한다. 따라서, $\mathbf{h}_i$ 와 $\mathbf{g}_{k,i}$ 의 $n \in \{1, \dots, N_i\}$ 제 원소인 $h_{i,n}$ 와 $g_{k,i,n}$ 의 위상(phase)을 각각 $\angle h_{i,n} := \phi_{i,n}$ 와 $\angle g_{k,i,n} := \vartheta_{k,i,n}$ 로 정의하면 RIS 내 i 제 부평면의 위상 천이는 대각행렬 $\boldsymbol{\Theta}_i \in \mathbb{C}^{N_i \times N_i}$ 로 표현되며 $\boldsymbol{\Theta}_i$ 의 n 제 대각 원소는 $e^{-j(\phi_{i,n} + \vartheta_{k,i,n}^*)}$ 로 나타낼 수 있다. 그러므로, 하향링크 RIS-NOMA 시스템에서 k 제 사용자가 수신하는 신호는 다음과 같다.

$$y_k = \left(\sum_{i=1}^K \mathbf{g}_{k,i} \boldsymbol{\Theta}_i \mathbf{h}_i \right) x + w_k$$

여기서 w_k 은 k 제 단말에서 발생하는 부가 열잡음을 나타내며, $\mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ 분포를 따른다고 가정한다. 또한, $x \in \mathbb{C}$ 는 기지국에서 전송한 신호를 나타낸다. 본 논문에서는 직교 위상 천이(quadrature phase shift keying: QPSK) 변조를 가정하고 신호 성상도 간 최소 거리를 최대화하기 위해 신호의 크기 및 위상을 조절하는 요소를 포함하는 CA 기술을 적용한다 [4]. 따라서, x 는 각 단말에 대한 신호에 전력과 위상이 조정된 QPSK 심볼의 가중합을 나타내며 다음과 같이 정의된다.

$$x = \sum_{k=1}^K \sqrt{a_k P} s_k e^{j\delta_k}$$

여기서 $\tilde{a}_k$ 은 k 제 사용자로 전송되는 신호의 전력 할당 비율을 나타내고 s_k 은 k 제 단말로 전송되는 정규화된 QPSK 변조 심볼을 나타내며 δ_k 는 k 제 단말의 위상 조절 각도를 의미한다.

따라서, k 제 단말은 결합 최대 우도(joint maximum likelihood: JML) 검파기를 통해 다음과 같이 심볼 $\hat{\mathbf{s}} = [\hat{s}_1, \dots, \hat{s}_M]$ 검파하여 자신에게 해당되는 신호를 추출한다 [5].

$$\hat{\mathbf{s}} = \underset{s_1, \dots, s_K \in \mathbf{s}}{\operatorname{argmin}} \left\{ \left\| \mathbf{y}_k - \left(\sum_{i=1}^K \mathbf{g}_{k,i} \boldsymbol{\theta}_i \mathbf{h}_i \right) \mathbf{x} \right\|^2 \right\}$$

이때 $\mathbf{s}$ 는 정규화된 변조 심볼의 후보 집합을 의미하며 다음과 같다.

$$\mathbf{s} = \{c_1, c_2, c_3, c_4\} = \left\{ \frac{-1+j}{\sqrt{2}}, \frac{-1+j}{\sqrt{2}}, \frac{-1+j}{\sqrt{2}}, \frac{-1+j}{\sqrt{2}} \right\}.$$

III. 제한한 성상도 조절기반 RIS-NOMA 기법의 BER 성능 분석

본 논문에서는 기지국이 QPSK 변조를 사용하고 두 단말을 RIS를 통해 하향링크 통신을 수행하는 환경에서의 BER 성능을 수학적으로 분석한다. 이때, 성상도 조절 기법이 적용된 $m \in \{1, \dots, 16\}$ 짝 중첩 성상 신호는 다음과 같이 정의하였다 [4].

$$C_m = e^{j\delta_1} \sqrt{a_1} c_{\lfloor \frac{m}{4} \rfloor} + e^{j\delta_2} \sqrt{a_2} c_{((m-1) \bmod 4) + 1}$$

여기서 최적의 전력 할당 비율과 단말 간의 위상 차이는 성상 간의 최소 거리를 최대화하도록 [6]와 같이 설정되었다. 오류 확률을 유도하기 위해

$$k \in \{1, 2\} \text{ 짝 유효 채널 } \varphi_k = \sum_{i=1}^2 \mathbf{g}_{k,i} \boldsymbol{\theta}_i \mathbf{h}_i \text{는 대규모 안테나를 갖는 RIS}$$

특성을 활용하여 중심 극한 정리(central limit theorem: CLT)에 의해 평균이 0이 아닌 실수 가우시안 분포(non-central Gaussian distribution)와 복소 가우시안 분포(complex Gaussian distribution)의 합으로 나타낼 수 있다 [2]. 여기서, RIS의 각 부평면은 대응되는 단말의 수신 SNR을 극대화하기 위해 해당 무선 채널의 위상을 정렬한다. 따라서, 유효 채널 φ_k 은 이러한 RIS의 위상 정렬 특성으로 인해 상대적으로 실수부가 허수부에 비해 매우 큰 값을 갖는다. 따라서, 본 논문에서는 유효 채널의 크기 $|\varphi_k|$ 를 φ_k 의 실수부로 근사하여 BER 성능의 상한(upper bound)을 유도하고자 한다. 유효 채널 φ_k 의 실수부를 $\rho_k := \mathcal{R}\{\varphi_k\} \sim \mathcal{N}(\mu_k, v_k)$ 로 정의하면, 평균 μ_k 와 분산 v_k 은 다음과 같이 각각 유도된다.

$$\mu_k = N_k \sqrt{I_{\text{BR}}^\alpha} \frac{\pi}{4}, v_k = N_k I_{\text{BR}}^\alpha \left(1 - \frac{\pi}{16} \right) + \frac{I_{\text{BR}}^\alpha I_k^\alpha (N - N_k)}{2}$$

본 논문에서는 일반성을 잃지 않고, QPSK 성상의 대칭성을 이용하여 첫 번째 단말이 c_1 심볼을 전송했을 때의 오류 확률을 유도한다. 따라서, ρ_1 이 주어졌을 때, 조건부 확률의 합계 상한(union bound)은 다음과 같다.

$$\Pr(\epsilon_1 | \rho_1) \leq \frac{1}{4} \sum_{p=1}^4 \sum_{q=5}^{16} Q \left(\rho_1 \sqrt{\frac{D_{p,q}^2}{2}} \right)$$

여기서 $D_{p,q}$ 은 $p, q \in \{1, \dots, 16\}$ 인 C_p 과 C_q 사이의 유클리디안 거리(Euclidean distance)를 의미하고, $\gamma = P/\sigma^2$ 는 송신 SNR을 나타낸다. 이때, 위 식은 정확한 BER 성능의 상한을 도출하는데 수학적으로 다루기 어렵기 때문에, 본 논문에서는 아래 Q-함수의 근사식을 사용한다.

$$Q(x) \approx e^{(-t_1 x^2 - t_2 x - t_3)}$$

여기서 t_1, t_2, t_3 는 Q-함수의 fitting 파라미터를 나타낸다 [7]. 따라서, CA를 적용한 RIS-NOMA시스템 BER 성능의 상한은 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$\Pr(\epsilon_1) \leq \frac{1}{4} \sum_{p=1}^4 \sum_{q=5}^{16} \mathbb{E}_{\rho_1} [f(\rho_1)], \Pr(\epsilon_2) \leq \frac{1}{4} \sum_{p=1}^4 \sum_{q \neq p} \mathbb{E}_{\rho_2} [f(\rho_2)],$$

$$\mathbb{E}_{\rho_k} [f(\rho_k)] \leq \frac{e^{-\frac{2t_3 v_k + \mu_k^2}{2v_k}} \cdot e^{-\frac{(t_2 v_k D_{p,q} \sqrt{\gamma} - \sqrt{2} \mu_k)^2}{4t_1 v_k^2 D_{p,q}^2 \gamma + 4v_k}}}{2 \sqrt{t_1 v_k D_{p,q}^2 \gamma + 1}} \times \left[1 + \operatorname{erf} \left(\sqrt{\frac{(t_2 v_k D_{p,q} \sqrt{\gamma} - \sqrt{2} \mu_k)^2}{4t_1 v_k^2 D_{p,q}^2 \gamma + 4v_k}} \right) \right] \right\}$$

$$f(\rho_k) = e^{-t_1 \left(\rho_k \sqrt{\frac{D_{p,q}^2}{2}} \right)^2 - t_2 \left(\rho_k \sqrt{\frac{D_{p,q}^2}{2}} \right) - t_3}$$

이때 $\mathbf{Z}_p$ 는 기지국이 C_p 를 전송했을 때 두 번째 단말 관점에서 오류가 나지 않는 성상의 인덱스 집합을 나타낸다.

IV. 모의실험 결과 및 결론

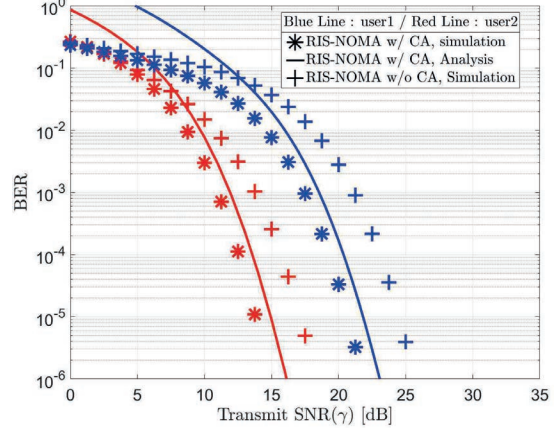


그림 2. 제한한 성상도 조절 기반 RIS-NOMA 시스템의 BER 성능

모의실험을 통해 CA 기반 하향링크 RIS-NOMA의 BER 성능을 확인하고, 제한한 기법의 수학적 BER 성능 분석 결과를 실제 모의실험 결과와 비교하여 검증한다. 본 모의실험에서는 기지국-RIS-단말 간의 거리를 각각 $l_{\text{BR}} = 15\text{m}$, $l_1 = 7\text{m}$, $l_2 = 3\text{m}$ 로 설정하였고, RIS의 안테나 수는 $N = 240$ 로 설정하였으며, 경로 감쇄 지수는 $\alpha = 2$ 로 설정하였다. 또한, 두 단말을 지원하기 위한 부평면의 안테나 수는 $N_1 = N_2 = 120$ 로 설정하였다. 그림 2는 단말별 CA 기반 RIS-NOMA 시스템의 송신 SNR에 따른 BER 성능을 도시한 결과이다. 그림 2를 통해 CA 기반 하향링크 RIS-NOMA의 BER 성능이 CA를 적용하지 않았을 경우보다 큰 BER 성능 향상을 갖는 것을 확인하였으며 본 논문에서 분석한 BER 상한이 제한한 시스템의 성능을 잘 표현하는 것을 검증하였다.

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] C. Pan *et al.*, "Reconfigurable intelligent surfaces for 6G systems: Principles, applications, and research directions," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 59, no. 6, pp. 14-20, Jun. 2021.
- [2] A. Chauhan, S. Ghosh and A. Jaiswal, "RIS partition-assisted non-orthogonal multiple access (NOMA) and quadrature-NOMA with imperfect SIC," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 22, no. 7, pp. 4371-4386, July 2023.
- [3] B. Y. D. Rito, and K. H. Li, "SER-effective constellation scaling and rotation in STAR-RIS-assisted uplink NOMA," *IEEE Commun. Lett.*, Jul. 2023 (Early access).
- [4] K. -H. Lee, J. S. Yeom, J. Joung, and B. C. Jung, "Performance analysis of uplink NOMA with constellation rotated STLC for IoT Networks," *IEEE Open J. Commun. Soc.*, vol. 3, pp. 705-717, Apr. 2022.
- [5] J. S. Yeom, H. S. Jang, K. S. Ko, and B. C. Jung, "BER performance of uplink NOMA with joint maximum-likelihood detector," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 68, no. 10, pp. 10295 - 10300, Oct. 2019.
- [6] C. Lin, S. Shieh, T. Chi and P. Chen, "Optimal inter-constellation rotation based on minimum distance criterion for uplink NOMA," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 68, no. 1, pp. 525-539, Jan. 2019.
- [7] M. López-Benítez and F. Casadevall, "Versatile, accurate, and analytically tractable approximation for the Gaussian Q-function," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 59, no. 4, pp. 917 - 922, Apr. 2011.