

에너지 분할 기반 하향링크 STAR-RIS-NOMA 시스템 성능 향상을 위한 결합 최대 우도 검파기술

김수연, 이영석, 정방철
충남대학교 전자공학과

e-mail : sueyeonkim@o.cnu.ac.kr, yslee@o.cnu.ac.kr, bcjung@cnu.ac.kr

A Joint Maximum Likelihood Detection for Improving Performance of Energy Splitting-Based Downlink STAR-RIS-NOMA Systems

Sue Yeon Kim, Young-Seok Lee, Bang Chul Jung

Department of Electronics Engineering, Chungnam National University

Abstract

In this paper, we investigate the simultaneous transmitting and reflecting-reconfigurable intelligent surface-based non-orthogonal multiple access (STAR-RIS-NOMA) as a promising technology for 6G communication systems. Then, we propose to apply joint maximum likelihood (JML) detection to each operation mode in which mode switching and energy splitting are configured respectively. Through simulations, we verify that our proposed technique outperforms the conventional STAR-RIS-NOMA system for all STAR-RIS modes.

I. 서론

동시 전송 및 반사 재구성 가능한 지능형 표면 기반 비직교 다중 접속(simultaneous transmitting and reflecting reconfigurable intelligent surface-based non-orthogonal multiple access: STAR-RIS-NOMA)은 차세대 무선통신시스템을 위한 기술로 최근 주목받고 있다 [1]. STAR-RIS는 360°의 통신 커버리지를 제공할 수 있으므로 다양한 동작 방식을 지원할 수 있으며, 대표적으로, STAR-RIS 안테나를 독립적으로 반사 또는 전송을 위한 안테나로 구별하여 입사 신호를 중계하는 모드 전환(mode switching: MS) 방식과 모든 STAR-RIS의 안테나가 신호 반사와 투과를 동시에 지원할 수 있는 에너지 분할(energy splitting: ES) 방식이 있다 [2].

그러나, 기존 [1]에서는 STAR-RIS 활용도를 제한하여 오직 MS 방식에 대한 STAR-RIS-NOMA 시스템을 제안하였으며, 모든 무선 채널 이득을 전부 활용하지 않고 준 최적 성능을 갖는 연속 간섭 제거(successive interference cancellation: SIC) 검파를 이용한 STAR-RIS-NOMA를 제안하였다. 따라서, 본 논문에서는 STAR-RIS의 일반적인 운용 방식인 ES를 추가로 고려한 일반적인 STAR-RIS 네트워크에 대해 유효 채널 이득을 정의하고 결합 최대 우도(joint maximum

likelihood: JML) 검파를 통한 STAR-RIS-NOMA 시스템을 제안한다. 또한, 모의실험을 통해 기존 기법과 비트당 오류율(bit-error-rate: BER) 측면에서 그 성능을 비교한다.

II. 일반적인 STAR-RIS-NOMA 기법

A. Mode switching (MS)

하향링크 STAR-RIS-NOMA 기법의 시스템 모델은 각각 단일 안테나를 갖는 K 명의 사용자와 단일 안테나를 갖는 기지국 사이에 N 개의 메타물질(meta-material) 안테나를 갖는 STAR-RIS가 존재하는 통신시스템을 고려한다 [3]. 이때, 반사 영역에는 K_r 명, 투과 영역에는 K_t 명의 사용자가 존재하며 각 사용자와 기지국 간 직접 통신 경로는 없다고 가정하였다.

MS로 동작하는 STAR-RIS는 각 영역의 사용자로 신호를 중계하기 위해 $\Lambda \in \{r, t\}$ 영역의 $k \in \{1, \dots, K_\Lambda\}$ 사용자에 N_k^{Λ} 개의 안테나를 할당하여 STAR-RIS를 전체 K 개의 부평면으로 나누어 운용한다. 그러므로, 기지국과 STAR-RIS의 $i \in \{1, \dots, K\}$ 부평면 간 무선 채널을 $\mathbf{h}_i \in \mathbb{C}^{N_i^A}$, STAR-RIS의 i 부평면과 $k \in \{1, \dots, K_\Lambda\}$ 부평면 사용자 간 무선 채널은 $\mathbf{g}_{k,i} \in \mathbb{C}^{N_i^A}$ 로 정의하고 \mathbf{h}_i 와 $\mathbf{g}_{k,i}$ 의 $n \in \{1, \dots, N_i^A\}$ 원소 $h_i^{(n)}$, $g_{k,i}^{(n)}$ 의 위상은 $\angle h_i^{(n)} = \phi_i^{(n)} \in [0, 2\pi)$, $\angle g_{k,i}^{(n)} = \phi_{k,i}^{(n)} \in [0, 2\pi)$ 로 정의할 수 있다. 본 논문에서 모든 무선 채널 벡터의 각 원소는 모두 통계적으로 독립이고 $\mathcal{CN}(0, 1)$ 로 동일한 레일리 페이딩(Rayleigh fading) 채널 모델을 따른다고 가정한다.

따라서, MS로 동작하는 STAR-RIS의 i 부평면은 위상에 대한 원소만을 갖는 대각행렬 $\Theta_i^{MS} \in \mathbb{C}^{N_i^A \times N_i^A}$ 로 표현되며 n 번째 대각 원소는 다음과 같이 무선 채널의 위상을 정렬하여 수신 신호 대 잡음 비(signal-to-noise ratio: SNR)를 최대화하도록 $[\Theta_i^{MS}]_{n,n} = e^{j\theta_i^{(n)}} = e^{-j(\phi_i^{(n)} + \phi_{k,i}^{(n)})}$ 로 정의한다. 따라서, 하향링크 STAR-RIS-NOMA 시스템의 Λ 영역에 있는 k 번째 사용자의 수신 신호는 다음과 같이

나타낼 수 있다.

$$y_k = \sum_{k=1}^{K_A} \sqrt{d_{\text{BS}}^{-\alpha}} \sqrt{d_k^{-\alpha}} \mathbf{g}_{k,i}^T \boldsymbol{\Theta}_k^{MS} \mathbf{h}_k x + n_k,$$

여기서 d_{BS} 는 기지국과 STAR-RIS 간 거리를 의미하며 d_k 는 k 째 사용자와 STAR-RIS 간 거리를 의미하고 α 는 경로 감쇄 지수를 의미한다. n_k 는 k 째 사용자에서 발생하는 부가 잡음을 나타내며 $\mathcal{CN}(0, \sigma_n^2)$ 의 분포를 따른다고 가정하였다. 또한, $x \in \mathbb{C}$ 는 기지국에서 전송하는 신호로 $x = \sum_{i=1}^K \sqrt{a_i P} x_i$ 와 같다. 여기서 P 는 기지국의 송신 전력을 의미하며 $a_i \in [0, 1]$ 는 i 째 사용자에게 전송할 신호에 할당된 전력 비율을 나타내고 x_i 는 i 째 단말로 전송할 변조 신호를 나타낸다. 이후, 각 사용자는 정규화된 변조 심볼의 후보 집합 \mathbf{x} 에 대해 JML 검파기를 적용하여 다음과 같이 신호 $\hat{\mathbf{x}}_{\text{MS}} = [x_1, \dots, x_K]$ 를 검파한다.

$$\hat{\mathbf{x}}_{\text{MS}} = \underset{x_1, \dots, x_K \in \mathbf{x}}{\operatorname{argmin}} \left\{ \left| y_k - \sum_{k=1}^{K_A} \sqrt{d_{\text{BS}}^{-\alpha}} \sqrt{d_i^{-\alpha}} \mathbf{g}_{k,i}^T \boldsymbol{\Theta}_k^{MS} \mathbf{h}_k \sum_{i=1}^K \sqrt{a_i P} x_i \right|^2 \right\}.$$

B. Energy Splitting (ES)

ES 방식은 STAR-RIS는 입사되는 신호에 대해 N 개의 안테나 모두 전송과 반사를 동시에 지원할 수 있어 MS 방식의 일반적인 운용 방식으로 볼 수 있다. 따라서 ES 방식 STAR-RIS의 각 채널 계수는 오직 두 개의 대각행렬 $\boldsymbol{\Theta}_i^{ES} \in \mathbb{C}^{N \times N}$, $\boldsymbol{\Theta}_r^{ES} \in \mathbb{C}^{N \times N}$ 로 표현할 수 있으며 Δ 영역에 위치한 k 째 사용자에게 대해 n 째 대각 원소는 $[\boldsymbol{\Theta}_\Delta^{ES}]_{n,n} = \beta_\Delta e^{j\theta_k^{(n)}} = \beta_\Delta e^{-j(\phi_k^{(n)} + \varphi_k^{(n)})}$ 와 같다. 여기서 β 는 전송 또는 투과 비율로 $\beta_t + \beta_r = 1$ 을 만족한다. 기지국과 STAR-RIS 간 무선 채널은 $\mathbf{h} \in \mathbb{C}^N$ 로, STAR-RIS와 k 째 사용자 간 무선 채널은 $\mathbf{g}_k \in \mathbb{C}^N$ 로 정의할 수 있으며 기지국으로부터 k 째 사용자로 수신되는 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

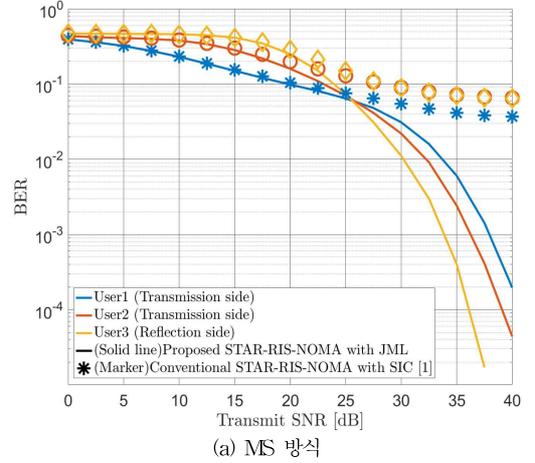
$$y_k = \sqrt{d_{\text{BS}}^{-\alpha}} \sqrt{d_k^{-\alpha}} \mathbf{g}_k^T \boldsymbol{\Theta}_\Delta^{ES} \mathbf{h} x + n_k.$$

이후, 다음과 같이 JML 검파를 이용하여 $\hat{\mathbf{x}}_{\text{ES}} = [x_1, \dots, x_K]$ 를 다음과 같이 검파한다.

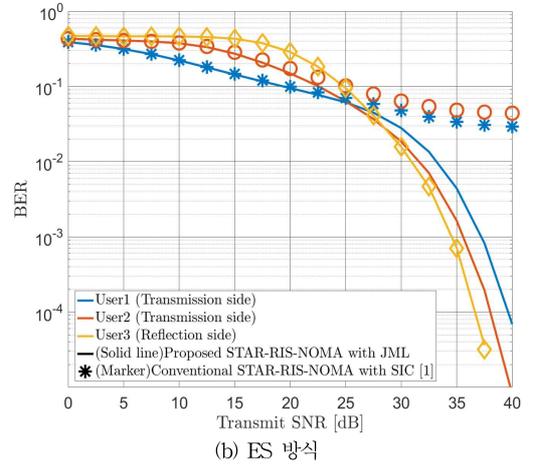
$$\hat{\mathbf{x}}_{\text{ES}} = \underset{x_1, \dots, x_K \in \mathbf{x}}{\operatorname{argmin}} \left\{ \left| y_k - \sqrt{d_{\text{BS}}^{-\alpha}} \sqrt{d_k^{-\alpha}} \mathbf{g}_k^T \boldsymbol{\Theta}_\Delta^{ES} \mathbf{h} \sum_{i=1}^K \sqrt{a_i P} x_i \right|^2 \right\}.$$

III. 모의실험 결과 및 결론

그림 1은 각각 (a) MS 및 (b) ES 방식의 JML 검파 기반 하향링크 STAR-RIS-NOMA 시스템의 기지국 송신 SNR(= P/σ_n^2) 대비 BER 성능을 나타낸다. 본 논문에서는 전송 영역에 두 명, 반사 영역에 한 명의 사용자가 존재하는 상황을 고려하였으며 전반적인 모의 실험 환경은 [3]과 동일하게 구성하였다. 이때, STAR-RIS는 전체 $N=150$ 개의 안테나에 대해 MS 방식에서 각 단말을 위한 부평면은 각각 50개의 안테나로 구성되고 ES 모드에서 전송 및 투과 비율은 $(\beta_t, \beta_r) = (0.7, 0.3)$ 로 설정하였다. 모의실험을 통해, 본 논문에서 제안한 JML 검파 기반 STAR-RIS-NOMA 기법은 MS와 ES 두 경우에 대해 [1]에서 제안된 SIC



(a) MS 방식



(b) ES 방식

그림 1. JML 검파 기반 STAR-RIS-NOMA 기법의 BER 성능. 검파를 이용한 기존 기법보다 모든 송신 SNR에서 더 우수한 BER 성능을 보이는 것을 확인하였다. 특히, 기존 기법에서는 무선 채널의 이득을 완전히 활용하지 못하여 BER 성능이 포화하는 반면, 제안하는 기법은 이러한 문제를 해결하여 견고한 BER 성능을 보인다.

Acknowledgement

이 성과는 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NRF-2021R1A4A1032580, NRF-2022R1I1A3073740).

참고문헌

- [1] 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.
- [2] Y. Liu *et al.*, "STAR: Simultaneous Transmission and Reflection for 360° Coverage by Intelligent Surfaces," *IEEE Wire. Commun.*, vol. 28, no. 6, pp. 102–109, Dec. 2021.
- [3] 김수연, 이영석, 정방철, "6G 무선통신시스템을 위한 결합 최대 우도 검파기 기반 하향링크 STAR-RIS-NOMA 기법," *한국통신학회 추계종합학술발표회*, Nov. 2022.