6G 무선통신시스템을 위한 결합 최대 우도 검파기반 하향링크 STAR-RIS-NOMA 기법

김수연, 이영석, 정방철

충남대학교

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

A Joint Maximum Likelihood Detector-Based Downlink STAR-RIS-NOMA Technique for 6G Wireless Communication Systems

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

Chungnam National University

요 약

본 논문에서는 6G 무선통신시스템을 위한 하향링크 동시 전송 및 반사 재구성 지능형 표면 기반 비직교 다중 접속(simultaneously transmitting and reflecting reconfigurable intelligent surface-based non-orthogonal multiple access: STAR-RIS-NOMA) 기법을 다중 사용자 중첩 전송(multi-user superposition transmission: MUST) Category 2로 고려하여 각 단말의 수신 신호 내 유효 채널을 재정의하고 결합 최대 우도(joint maximum likelihood: JML) 검파기를 이용한 STAR-RIS-NOMA 기법을 제안한다. 모의실험을 통해 제안한 MUST 기반의 JML 검파기를 이용한 STAR-RIS-NOMA 시스템이 기존 제안된 STAR-RIS-NOMA 시스템보다 비트 당 오류율(bit-error-rate: BER) 측면에서 더 우수한 성능을 보이는 것을 확인하였다.

Ⅰ. 서 론

6세대(sixth-generation: 6G) 무선통신시스템에서 급증하는 데이터 트래픽의 효율적인 처리와 초고속 통신을 위해 테라헤르츠(terahertz: THz)와 같은 초고주파 대역의 사용을 고려함에 따라 높은 경로 손실로 인한 통신 커버리지 확보와 통신 서비스 품질 개선할 수 있는 통신 기술에 대한 필요성이 크게 대두되고 있다. 재구성 가능한 지능형 표면(reconfigurable intelligent surfece: RIS) 기술은 입사된 신호의 진폭과 위상을 조절하여 재구성할 수 있는 대규모 메타물질로 이루어진 평면 소자로, 장애물을 피해 전파를 반사 시켜 통신 커버리지를 개선하거나 무선 채널의 위상을 정렬하여 수신 신호 대 잡음 비(signal-to-noise ratio: SNR)를 극대화할 수 있어 6G 무선통신시스템을 위한 기술로 학계 및 산업계에서 최근 주목받고 있다 [1].

그러나, RIS는 입사 신호의 반사를 위해 송신 단말과 수신 단말이 RIS를 기준으로 동일한 공간에 존재해야 하므로 그 활용도와 운용에 제약이 있다. 이를 위해, 360° 커버리지를 제공할 수 있도록 입사 신호를 반사(reflecting)함과 동시에 전송(transmitting)도 할 수 있는 기술인 동시 전송 및 반사 RIS(simultaneous transmitting and reflecting RIS: STAR-RIS) 기술이 최근 제안되었으며 [2], 높은 주파수 효율 및 대규모 연결성을 위해 비직교 다중 접속(non-orthogonal multiple access: NOMA)과 STAR-RIS 기술을 접목한 STAR-RIS-NOMA 기법이 제안되었다 [3]. 구체적으로, STAR-RIS-NOMA 기법은 전송 및 반사 공간에서 각 단말에 대해 RIS의 부평면(sub-surface)을 서로 배타적으로(exclusively) 정의하고 전송 및 반사 측 단말 간 무선 채널을 서로 상이하게 재구성하여 효율적인 NOMA를 지원하도록 설계되었다.

그러나, 기존 제시된 하향링크(downlink: DL) STAR-RIS-NOMA 시스템은 오직 RIS를 통해 각 단말에 대한 무선 채널의 위상을 정렬한 채널만을 유효 채널로 정의하고 동일한 공간에 존재하는 단말에 대한 채널을 간섭으로 구분하였다. 이는 무선 채널에 대한 이득을 전부 이용하지 못하여 각 단말이 달성할 수 있는 궁극적 통신 성능의 손실을 유발한다. 따라서, 본 논문에서는 STAR-RIS-NOMA 시스템을 3GPP LTE 표준에서 연구된 다중 사용자 중첩 전송(multi-user superposition transmission: MUST [4]) Category 2로 고려하여 DL STAR-RIS-NOMA 시스템에서 각 단말의 유효 채널을 재정의한다. 또한, 본 논문에서는 재정의된 유효 채널에 대해 기존 STAR-RIS-NOMA 기법에서 적용된 순차적 간섭 제거(successive interference cancellation: SIC) 검파가 아닌 최적 결합 최대 우도(joint maximum likelihood: JML) 검파 [5]를 이용한 STAR-RIS-NOMA 기법을 제안하며, 모의실험을 통해 제안한 MUST 기반의 JML 검파를 이용한 STAR-RIS-NOMA 시스템의 성능을 기존 기법과 비트당 오류율(bit-error-rate: BER) 측면에서 비교하고 검증한다.

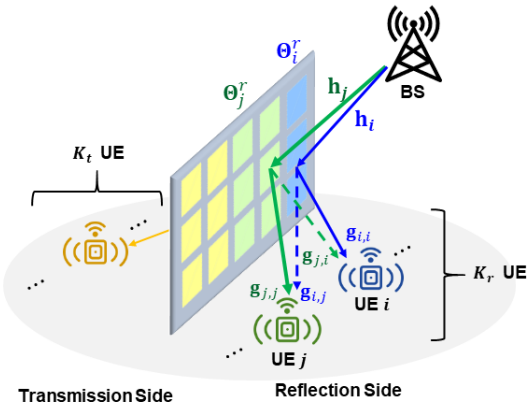

그림 1. 제안하는 JML 검파 기반 DL STAR-RIS-NOMA 시스템 모델

Ⅱ. 제안하는 JML 검파 기반 DL STAR-RIS-NOMA 기법의 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 각각 단일 안테나를 갖는 K개 단말, 단일 안테나를 갖는 기지국, 그리고 N개의 안테나를 갖는 STAR-RIS가 존재하는 하향링크 STAR-RIS-NOMA 시스템을 고려한다. 이때, 반사 영역과 전송 영역에 위치하는 단말은 각각 K_r개와 K_t개가 존재하며 STAR-RIS는 각 영역에 대한 단말과 기지국 간 통신을 지원할 수 있도록 N개의 안테나 중 N^r개와 N^t개의 안테나가 각각 반사 및 전송을 위해 사용된다고 가정한다. 또한, 기지국과 각 단말 간의 직접 통신 경로는 없다고 가정하였으며, 따라서 오직 STAR-RIS를 이용해서 각 단말과 기지국 간 전송/반사 통신 경로를 제공한다고 가정한다. 그러므로, STAR-RIS는 $\Lambda \in \{r,t\}$ 영역의 $i \in \{1,\cdots,K_\Lambda\}$째 단말을 지원하기 위해 N_i^Λ개의 부평면을 나누어 동작한다. 본 논문에서는 일반성을 잃지 않고 설명의 용이함을 위해 반사 영역에 대한 신호에 대해 서술한다.

본 논문에서는 기지국과 STAR-RIS의 i째 반사 부평면 간 무선 채널을 $\mathbf{h}_i \in \mathbb{C}^{N_i^r}$로, STAR-RIS의 i째 부평면과 $j \in \{1,\cdots,K_r\}$째 단말 간 무선 채널을 $\mathbf{g}_{i,j} \in \mathbb{C}^{N_i^r}$로 정의하며 두 벡터의 각 원소는 모두 통계적으로 독립이고 동일

한 레일리 페이딩(Rayleigh fading) 채널 모델을 따른다고 가정하며 기지국과 단말은 모든 채널 정보를 알고 있다고 가정한다. 이때, $\mathbf{h}_i$와 $\mathbf{g}_{i,j}$의 $n\in\{1,\cdots N_i^r\}$ 째 원소 $h_i^{(n)}$, $g_{i,j}^{(n)}$의 위상(phase)은 $[0,2\pi)$에 대해서 다음과 같이 표현된다.

$$\angle h_i^{(n)}=\phi_i^{(n)}\in[0,2\pi),\ \angle g_{i,j}^{(n)}=\varphi_{i,j}^{(n)}\in[0,2\pi). \tag{1}$$

따라서, STAR-RIS의 i째 부평면은 대각행렬 $\boldsymbol{\Theta}_i^r\in\mathbb{C}^{N_i^r\times N_i^r}$로 표현되며 n째 대각 원소는 다음과 같이 수신 SNR을 극대화하도록 무선 채널의 위상을 정렬하도록 정의된다.

$$[\boldsymbol{\Theta}_i^r]_{n,n}=e^{j\theta_i^{(n)}}=e^{-j\left(\phi_i^{(n)}+\varphi_{i,i}^{(n)}\right)}, \tag{2}$$

여기서 STAR-RIS의 i째 부평면은 i째 단말을 지원하므로 $\mathbf{g}_{i,i}$의 위상을 정렬하도록 동작한다. 최종적으로, DL STAR-RIS-NOMA 시스템에서 i째 단말의 수신 신호는 다음과 같이 정의된다.

$$y_i=\sqrt{d_{\mathrm{BS}}^{-\alpha}}\sqrt{d_i^{-\alpha}}\mathbf{g}_{i,i}^T\boldsymbol{\Theta}_i^r\mathbf{h}_i x+\sum_{j\neq i}\sqrt{d_{\mathrm{BS}}^{-\alpha}}\sqrt{d_i^{-\alpha}}\mathbf{g}_{j,i}^T\boldsymbol{\Theta}_i^r\mathbf{h}_i x+n_i, \tag{3}$$

여기서 d_{BS}는 기지국과 STAR-RIS 간 거리를 의미하며 d_i는 i째 단말과 STAR-RIS 간 거리를 의미하고 α는 경로 감쇄 지수(path-loss exponent)를 의미한다. n_i는 i째 단말에서 발생하는 부가 잡음을 나타내며 평균이 0이고 분산이 σ_n^2인 $\mathcal{CN}(0,\sigma_n^2)$분포를 따른다고 가정하였다. 또한, $x\in\mathbb{C}$는 기지국에서 전송하는 신호를 나타낸다. 구체적으로, 각 변조 신호는 단말의 채널 이득이 낮은 순서의 역순으로 전력을 더 할당하며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$x=\sum_{k=1}^{K}\sqrt{a_kP}\,x_k, \tag{4}$$

여기서 P는 기지국의 송신 전력을 의미하며 $a_k\in[0,1]$는 $k\in\{1,\cdots,K\}$째 단말로 전송할 신호에 할당한 전력 비율을 나타내고 x_k는 k째 단말로 전송할 변조 신호를 나타낸다. 즉, DL 기지국 신호 x는 반사 및 전송 영역에 있는 모든 단말에 전송할 변조 신호의 가중합으로 표현된다.

그러나, 기존 제시된 STAR-RIS-NOMA 시스템은 수신 신호 (3)에서 i째 단말로 위상을 정렬한 $\sqrt{d_i^{-\alpha}}\mathbf{g}_{i,i}^T\boldsymbol{\Theta}_i^r\mathbf{h}_i$만을 유효 채널로 정의하였으며 모든 $j\neq i$째 부평면으로부터 입사되는 신호를 간섭 취급하였다. 이는 무선 채널에 대한 이득을 전부 이용하지 못하여 각 단말이 달성할 수 있는 궁극적 통신 성능의 손실을 유발할 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 적응형으로 전력을 할당하는 STAR-RIS-NOMA 시스템을 LTE 표준에서 연구된 MUST Category 2로 모델링하여 유효 채널을 재정의한다 [4].

$$\begin{aligned}y_i&=z_{\mathrm{eff}}x+n_i\\&=\left(\sqrt{d_{\mathrm{BS}}^{-\alpha}}\sqrt{d_i^{-\alpha}}\mathbf{g}_{i,i}^T\boldsymbol{\Theta}_i^r\mathbf{h}_i+\sum_{j\neq i}\sqrt{d_{\mathrm{BS}}^{-\alpha}}\sqrt{d_i^{-\alpha}}\mathbf{g}_{j,i}^T\boldsymbol{\Theta}_i^r\mathbf{h}_i\right)x+n_i\end{aligned}. \tag{5}$$

즉, (5)는 간단하게 스칼라 채널에 대한 전력 영역 NOMA로 해석할 수 있으며 이러한 전력 영역 NOMA 시스템에서 최적 성능을 달성할 수 있는 JML 검파기를 통해 다음과 같이 신호 $\hat{\mathbf{x}}=[x_1,\cdots,x_K]$를 검파한다.

$$\hat{\mathbf{x}}=\underset{x_1,\cdots,x_K\in\boldsymbol{\chi}}{\arg\min}\left\{\left|y_i-z_{\mathrm{eff}}\sum_{k=1}^{K}\sqrt{a_kP}\,x_k\right|^2\right\}, \tag{6}$$

여기서 $\boldsymbol{\chi}$는 정규화된 변조 심볼의 후보 집합을 의미한다.

Ⅲ. 모의실험 결과

그림 2는 본 논문에서 제안하는 MUST 기반 JML 검파기를 이용한 DL STAR-RIS-NOMA 시스템의 기지국 송신 SNR($=P/\sigma_n^2$)에 대한 BER 성능을 나타낸다. 본 논문에서는 반사 영역에 두 개의 단말과 전송 영역에 하나의 단말을 고려하였으며 STAR-RIS는 전체 $N=150$개의 안테나를 가지며 각 단말을 위한 부평면은 각각 50개의 안테나로 구성된다. 또한, 기지국으로부터 STAR-RIS까지의 거리 d_{BS}는 40m, STAR-RIS와 각 단말 간 거리

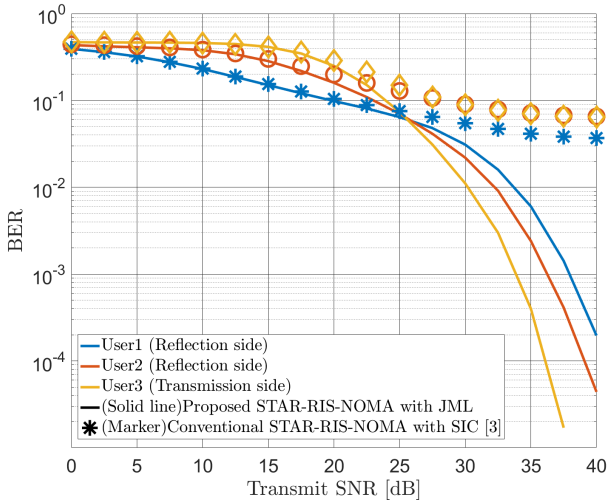

그림 2. 제안하는 JML 기반 STAR-RIS-NOMA 시스템의 BER 성능

는 $(d_1,d_2,d_3)=(3,2.5,2)$m로 설정하였으며, 그에 따라 기지국으로부터 각 단말로 전송하기 위한 변조 신호에 대한 전력 할당은 $(a_1,a_2,a_3)=(0.7,0.25,0.05)$로 설정하였다. 본 논문에서는 직교 위상 편이(quadrature phase shift keying: QPSK) 변조를 고려하였다. 모의실험을 통해, 본 논문에서 제안한 MUST 기반 JML을 이용한 STAR-RIS-NOMA 기법이 [3]에서 제시된 SIC 검파를 이용한 기존 기법보다 모든 송신 SNR에서 모든 단말에 대해 더 우수한 BER 성능을 보이는 것을 확인하였다. 특히, 기존 기법에서는 무선 채널의 이득을 완전히 활용하지 못하여 BER 성능이 포화되는 반면, 제안하는 기법은 이러한 문제를 해결하여 견고한 BER 성능을 보장할 수 있음을 검증하였다.

Ⅳ. 결론

본 논문에서는 6G 무선통신시스템을 위한 DL STAR-RIS-NOMA 시스템에서 종래의 수신 신호 모델에 대해 MUST를 도입하여 무선 채널의 이득을 완전히 활용하도록 유효 채널을 재정의하였으며 최적 JML 검파기를 이용하여 BER 측면에서 STAR-RIS-NOMA 시스템의 성능 향상을 확인하였다. 본 논문에서 제안한 기법은 향후 STAR-RIS를 이용한 통신 시스템 연구에 대한 기초적인 토대를 마련할 수 있으며, 추후 수학적 성능 분석을 통해 STAR-RIS-NOMA 시스템의 성능에 영향을 미치는 주요인을 명시적으로 특성화할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

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

참 고 문 헌

[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] Y. Liu *et al.*, "STAR: Simultaneous transmission and reflection for 360° coverage by intelligent surfaces," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 28, no. 6, pp. 102-109, Dec. 2021.

[3] 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.

[4] 3GPP, *Study on Downlink Multiuser Superposition Transmission (MUST) for LTE* (Release 13); Available online: http://www.tech-invite.com/3m36/tinv-3gpp-36-859.html

[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 Tran. Veh. Technol., vol. 68, no. 10, pp. 10295-10300, Oct. 2019.