

6G 통신 시스템을 위한 결합 최대 우도 검파-기반 하향링크 RIS-NOMA 기법의 성능 분석

백주영, 이영석, 정방철
충남대학교

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

Performance Analysis of Downlink Joint Maximum Likelihood Detector-Based RIS-NOMA Technique for 6G Communication Systems

Ju Yeong Baek, Young-Seok Lee, Bang Chul Jung
Chungnam National University

요약

본 논문에서는 하향링크에서 결합 최대 우도(joint maximum likelihood: JML) 검파를 이용한 하향링크 재구성가능한 지능형 표면(reconfigurable intelligent surfaces: RIS) 기반 비직교 다중 접속(non-orthogonal multiple access: NOMA) 기법의 비트 당 오류율(bit-error-rate: BER) 성능을 수학적으로 분석한다. 또한, 모의실험을 통해, 본 논문에서 이론적으로 분석한 JML 검파 기반 RIS-NOMA 기법의 BER 성능 분석 결과를 검증한다. 본 논문에서 활용된 JML 검파 기반 RIS-NOMA 기법의 성능 분석 프레임워크는 추후 RIS를 활용하는 차세대 통신 시스템에서 성능에 영향을 미치는 주요인을 파악하고 RIS-NOMA 시스템을 최적화하기 위한 연구의 기초적인 토대로 활용될 것으로 사료된다.

I. 서론

차세대 무선 통신 시스템은 주파수 부족 문제를 해결하기 위해 밀리미터파(millimeter wave: mmWave)나 테라헤르츠(terahertz: THz) 이상의 초고주파 대역에서의 통신을 고려하여 광대역/초고속 통신 서비스 지원을 목표로 하고 있다. 그러나, 이와 같은 초고주파 대역은 전파의 높은 직진성으로 인해 건물이나 지형지물에 의해 전파가 차단되기 쉽고, 통신 거리에 따른 경로 손실(path-loss)이 매우 커 장거리 통신에 부적절하다는 문제점이 있다. 이를 위해, 최근 재구성가능한 지능형 표면(reconfigurable intelligent surfaces: RIS)을 이용한 무선 송수신 시스템이 초고주파 대역에서의 전파 전파(wave propagation) 문제를 해결할 수 있는 주요 기술로 주목받고 있다 [1]. RIS는 신호를 효율적으로 송수신할 수 있는 메타물질(meta-material) 기반 대형 안테나 표면으로 RIS는 전파 방출 요소 주변에 입사되는 전파를 반사하여 송수신기 사이 가상적인 경로를 생성하여 주변 지형 및 전파 방출 요소를 우회할 수 있다. 이러한 특성을 이용하여, 대규모 연결성과 주파수 효율을 극대화할 수 있는 비직교 다중 접속(non-orthogonal multiple access: NOMA)과 RIS를 접목한 RIS-NOMA 시스템에 대한 다양한 연구가 활발히 진행중에 있다 [2].

그러나, 기존에 제시된 RIS-NOMA 시스템의 비트 당 오류율(bit-error-rate: BER) 성능의 수학적 분석은 준 최적 성능을 갖는 순차적 간섭 제거(successive interference cancellation: SIC) 검파 수신기의 성능 분석만 수행되었다 [2]. [3]에서는 최적 성능을 달성할 수 있는 결합 최대 우도(joint maximum likelihood: JML) 검파 기반 RIS-NOMA 시스템이 제안되었으나 아직 이론적인 성능 분석은 다루어지지 않았다. 따라서, 본 논문에서는 [3]에서 제안된 JML 검파 기반 RIS-NOMA 시스템의 BER 성능을 수학적으로 분석하고 모의실험을 통해 분석한 성능을 검증한 후 JML 검파 기반 RIS-NOMA 시스템의 성능에 영향을 미치는 주요인들을 특성화한다.

II. 결합 최대 우도 검파 기반 RIS-NOMA 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 단일 안테나를 갖는 M 개의 단말과 기지국 사이에 N 개의 안테나를 갖는 RIS가 존재하는 하향링크 RIS-NOMA 시스템을 고려한다. 이때, 주변 지형에 의해 기지국과 각 사용자 간 직접 통신 경로는 없다고 가정하였다. RIS는 M 개의 단말을 효과적으로 지원하기 위해 N 개의 안테나를 M 개의 부평면으로 군집화하여 동작한다고 가정하였다. 따라서, RIS의 $i \in \{1, 2, \dots, M\}$ 제 부평면은 i 제 단말을 지원하기 위해 통신에 참여하며, 해당 부평면은 N_i 개의 RIS 안테나를 포함한다고 가정하였다. 그리고, 각 RIS 안테나는 서로 다른 부평면 간 상호 배타적으로 할당되어 있다고 가정하였다.

본 논문에서는 기지국과 RIS의 i 제 부평면 간 무선 채널을 $\mathbf{h}_i \in \mathbb{C}^{N_i}$ 로

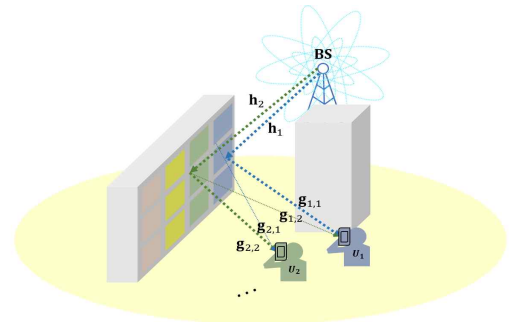


그림 1. 하향링크 JML 검파 기반 RIS-NOMA 시스템 모델

로 정의하였고, RIS의 i 제 부평면과 $m \in \{1, 2, \dots, M\}$ 제 단말 간 무선 채널을 $\mathbf{g}_{m,i} \in \mathbb{C}^{1 \times N_i}$ 로 정의하였다. 본 논문에서 모든 무선 채널은 서로 통계적으로 독립이고 동일한 분포를 따른다고 가정하였으며 두 채널 벡터의 $n \in \{1, \dots, N_i\}$ 제 원소인 h_i^n 과 $g_{m,i}^n$ 은 각각 $\mathcal{CN}(0, d_{BR}^\alpha)$ 과 $\mathcal{CN}(0, d_m^\alpha)$ 분포를 따르는 레일리 페이딩(Rayleigh fading) 채널을 가정하였다. 여기서, α 는 경로 감쇄 지수를 의미하고 d_{BR} 은 기지국과 RIS 간의 거리를 의미하며 d_m 은 RIS와 m 제 사용자 간의 거리를 의미한다. 또한, h_i^n 과 $g_{m,i}^n$ 의 위상(phase)은 다음과 같이 정의하였다:

$$\angle h_i^n = \varphi_i^n \in [0, 2\pi), \quad \angle g_{m,i}^n = \vartheta_{m,i}^n \in [0, 2\pi).$$

RIS-NOMA 시스템을 위한 i 제 부평면의 위상 천이는 대각행렬 $\boldsymbol{\Theta}_i \in \mathbb{C}^{N_i \times N_i}$ 로 표현되며, 본 논문에서 $\boldsymbol{\Theta}_i$ 의 n 제 대각 원소는 단말의 수신 SNR을 극대화하기 위해 $[\boldsymbol{\Theta}_i]_{n,n} = e^{j\theta_i^n} = e^{-j(\varphi_i^n + \vartheta_{m,i}^n)}$ 로 정의하였다. 따라서, 하향링크 RIS-NOMA 시스템에서 m 제 사용자가 수신하는 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다:

$$y_m = \left(\mathbf{g}_{m,m} \boldsymbol{\Theta}_m \mathbf{h}_m + \sum_{j \neq m} \mathbf{g}_{m,j} \boldsymbol{\Theta}_j \mathbf{h}_j \right) x + w_m,$$

여기서 w_m 은 m 제 사용자가 지닌 단말기에서 발생하는 부가 열잡음이며 $\mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ 분포를 따른다고 가정한다. 또한, $x \in \mathbb{R}$ 는 기지국에서 전파한 신호를 나타내며, 본 논문에서는 이진 위상 편이(binary phase shift keying: BPSK) 변조를 가정하였다. 그러므로, x 는 NOMA를 적용하여 기지국으로부터 각 단말로 송신되기 위한 BPSK 신호들의 가중합을 나타내며 다음과 같이 정의된다:

$$x = \sum_{m=1}^M \sqrt{\tilde{a}_m P} s_m,$$

여기서 $\tilde{a}_m$ 은 m 제 사용자로 전송될 신호에 할당된 전력 비율을 나타내

며 각 신호 간 전력 비율은 사용자의 채널 이득의 역순으로 할당하였다. s_m 은 m 째 단말로 전송될 정규화된 BPSK 변조 심볼을 나타낸다. 따라서, m 째 단말은 JML 검파기를 통해 모든 무선 채널의 이득을 완전히 활용하도록 다음과 같이 심볼 $\hat{\mathbf{s}} = [\hat{s}_1, \dots, \hat{s}_M]$ 검파한다 [3]:

$$\hat{\mathbf{s}} = \underset{s_1, \dots, s_M \in \mathcal{S}}{\operatorname{argmin}} \left\{ \left| y_m - \left(\mathbf{g}_{m,m} \boldsymbol{\theta}_m \mathbf{h}_m + \sum_{j \neq m} \mathbf{g}_{m,j} \boldsymbol{\theta}_j \mathbf{h}_j \right) \sum_{m=1}^M \sqrt{a_m} P s_m \right|^2 \right\},$$

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

III. JML 검파 기반 RIS-NOMA 기법의 BER 성능 분석

본 논문에서는 RIS-NOMA 시스템에서 BPSK 변조를 고려하고 기지국이 두 단말을 지원할 때의 BER 성능을 수학적으로 분석한다. $i \in \{1, 2\}$ 째 단말의 유효 채널 $\psi_i = \mathbf{g}_{i,i} \boldsymbol{\theta}_i \mathbf{h}_i + \mathbf{g}_{i,j} \boldsymbol{\theta}_j \mathbf{h}_j$, $j \neq i$ 는 대규모 안테나를 갖는 RIS 채널 특성을 활용하여 중심 극한 정리(central limit theorem: CLT)에 의해 다음과 같이 복소 가우시안 분포(complex Gaussian distribution)로 나타낼 수 있다 [2]:

$$\psi_i \sim \mathcal{CN} \left(N_i \sqrt{d_{\text{BR}}^\alpha} \frac{\pi}{4}, N_i d_{\text{BR}}^\alpha d_i^\alpha \left(1 - \frac{\pi}{16} \right) + d_{\text{BR}}^\alpha d_i^\alpha (N - N_i) \right).$$

먼저, 첫 번째 단말에서의 BER을 유도하기 위해 유효 채널 ψ_1 이 주어질 때 조건부 오류 확률은 다음과 같다:

$$\mathbb{P}(e_1 | \psi_1) = \sum_{u=1}^2 \mathbb{P}(S_u) Q(S_u | \psi_1 | \sqrt{2\gamma}),$$

여기서 $S_u \in \{\sqrt{a_1} \pm \sqrt{a_2}\}$ 는 $u \in \{1, 2\}$ 째 전력 할당 계수의 조합을 나타내고 $\gamma = P/\sigma^2$ 는 송신 SNR을 의미한다. 또한, $Q(\cdot)$ 은 표준 정규 분포의 확률 밀도 함수를 적분한 함수값을 의미하는 Q-함수를 나타낸다. 따라서, 첫 번째 단말의 BER은 전체 확률의 원리(total probability theorem)에 의해 다음과 같이 나타낼 수 있다:

$$\mathbb{P}(e_1) = \int_0^\infty \sum_{u=1}^2 \mathbb{P}(S_u) Q(S_u x \sqrt{2\gamma}) f_{|\psi_1|}(x) dx.$$

본 논문에서 RIS는 수신 SNR을 최대화하기 위해 기지국-RIS 및 RIS-단말 간 무선 채널의 위상을 정렬하도록 설계하였다. 따라서, 유효 채널 ψ_1 의 경우 RIS에 의해 정렬된 무선 채널을 포함하는 실수부가 허수부에 비해 매우 클 것임을 예상할 수 있다. 따라서, 본 논문에서는 유효 채널 ψ_1 의 실수부를 유효 채널의 진폭으로 근사하여 BER 성능의 상한(upper bound)을 유도하고자 한다. 그러므로, 첫 번째 단말에서의 BER 상한은 다음과 같이 표현할 수 있다:

$$\mathbb{P}(e_1) \leq \int_0^\infty \sum_{u=1}^2 \mathbb{P}(S_u) Q(S_u x \sqrt{2\gamma}) f_{\Re\{\psi_1\}}(x) dx,$$

여기서 $\Re\{\cdot\}$ 은 해당 변수의 실수부를 나타내며, $\Re\{\psi_i\}$ 은 $\mathcal{N}(\mu_i, \zeta_i)$ 분포를 따르고 평균 μ_i 와 분산 ζ_i 는 다음과 같이 각각 정의된다:

$$\mu_i = N_i \sqrt{d_{\text{BR}}^\alpha} \frac{\pi}{4}, \zeta_i = N_i d_{\text{BR}}^\alpha d_i^\alpha \left(1 - \frac{\pi}{16} \right) + \frac{d_{\text{BR}}^\alpha d_i^\alpha (N - N_i)}{2}.$$

따라서 첫 번째 단말의 BER 상한은 다음과 같이 유도된다:

$$\mathbb{P}(e_1) \leq \frac{e^{-\frac{2\zeta_1 + \mu_1^2}{2\zeta_1}}}{2\sqrt{2\zeta_1}} \sum_{u=1}^2 e^{\frac{(b\zeta_1 S_u \sqrt{2\gamma} - \mu_1)^2}{8a\zeta_1^2 S_u^2 \gamma + 2\zeta_1}} \times \sqrt{\frac{\zeta_1}{8a\zeta_1^2 S_u^2 \gamma + 2\zeta_1}} \left[1 + \operatorname{erf} \left\{ \sqrt{\frac{(b\zeta_1 S_u \sqrt{2\gamma} - \mu_1)^2}{8a\zeta_1^2 S_u^2 \gamma + 2\zeta_1}} \right\} \right],$$

여기서 $\operatorname{erf}(\cdot)$ 는 에러 함수를 의미하고, a, b, c 는 Q-함수 근사를 위한 파라미터를 나타낸다 [4].

적은 전력을 할당받는 두 번째 단말의 조건부 오류 확률은 다음과 같다:

$$\mathbb{P}(e_2 | \psi_2) = \frac{1}{2} \left\{ 2Q(E_1 | \psi_2 | \sqrt{2\gamma}) + Q(E_2 | \psi_2 | \sqrt{2\gamma}) - Q(E_3 | \psi_2 | \sqrt{2\gamma}) \right. \\ \left. + Q(E_4 | \psi_2 | \sqrt{2\gamma}) - Q(E_5 | \psi_2 | \sqrt{2\gamma}) \right\}$$

$$E_k \in \{\sqrt{a_2}, \sqrt{a_1} - \sqrt{a_2}, 2\sqrt{a_1} - \sqrt{a_2}, 2\sqrt{a_1} + \sqrt{a_2}, \sqrt{a_1} + \sqrt{a_2}\},$$

여기서 E_k 는 두 번째 단말의 $k \in \{1, \dots, 5\}$ 째 전력 할당 계수의 선형결합

을 나타낸다. 두 번째 단말의 BER 상한은 첫 번째 단말의 BER 상한과 동일한 방식으로 유효 채널 ψ_2 를 이용하여 다음과 같이 유도할 수 있다:

$$\mathbb{P}(e_2) \leq \left(\frac{e^{-\frac{2\zeta_2 + \mu_2^2}{2\zeta_2}}}{2\sqrt{2\zeta_2}} \right) \left(2P(E_1) + \sum_{k=2}^5 (-1)^k P(E_k) \right), \\ P(E_k) = e^{\frac{(b\zeta_2 E_k \sqrt{2\gamma} - \mu_2)^2}{8a\zeta_2^2 E_k^2 \gamma + 2\zeta_2}} \sqrt{\frac{\zeta_2}{8a\zeta_2^2 E_k^2 \gamma + 2\zeta_2}} \left\{ 1 + \operatorname{erf} \left(\sqrt{\frac{(b\zeta_2 E_k \sqrt{2\gamma} - \mu_2)^2}{8a\zeta_2^2 E_k^2 \gamma + 2\zeta_2}} \right) \right\}.$$

IV. 모의실험 결과 및 결론

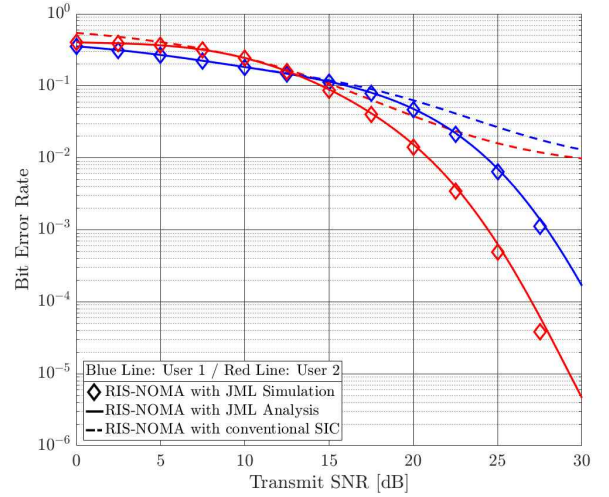


그림 2. JML 검파 기반 RIS-NOMA 시스템의 BER 성능 분석.

그림 2는 하향링크 JML 검파 기반 RIS-NOMA 시스템의 BER 성능 분석 결과를 기지국 송신 SNR에 대해 도시한 결과이다. 두 단말이 존재하는 환경을 고려하였으며 각 단말에 할당된 RIS 부평면 내 안테나 수는 50개로 설정하였다. 또한, 전력 할당 계수는 각 단말에 대해 $\tilde{a}_1 = 0.7, \tilde{a}_2 = 0.3$ 으로 설정하였고 $d_{\text{BR}} = 20$ m, $d_1 = 6$ m, $d_2 = 4$ m로 설정하였다. JML 검파 기반 RIS-NOMA의 경우 기존 SIC 검파 기반 RIS-NOMA [2]와 비교하여 무선 채널의 이득을 완전히 활용함으로써 BER이 포화하지 않는 것을 확인할 수 있으며, 본 논문에서 분석한 BER 상한이 JML 검파 기반 RIS-NOMA 시스템의 BER 성능을 잘 표현하는 것을 검증하였다. 추후, JML 검파 기반 RIS-NOMA 시스템의 BER 성능을 일반화된 변조 및 단말 수에 대해 이론적으로 분석할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NRF-2022R111A3073740)

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] M. Aldababasa, 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.
- [3] 김수연, 이영석, 정방철, "6G 무선통신시스템을 위한 결합 최대 우도 검파기 기반 하향링크 STAR-RIS-NOMA 기법," *한국통신학회 추계종합학술발표회*, Nov. 2022.
- [4] 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.