

RIS 기반 공생 무선 통신 시스템에서 기생 장치의 성능 평가

민경식, 김태형*, 정민채**

수원대학교 정보통신학부, *국민대학교 전자공학부, **세종대학교 전자정보통신공학과

kyungsik@suwon.ac.kr, *th.kim@kookmin.ac.kr, **mcjung@sejong.ac.kr

Performance Evaluation of Parasite Device in RIS-based Symbiotic Radio

Kyungsik Min, Taehyoung Kim*, Minchae Jung**

Dept. of Information and Telecommunication Engineering, The University of Suwon

*School of Electrical Engineering, Kookmin University

**Department of Electronics and Information Engineering, Sejong University

요약

본 논문은 지능형 반사 표면 (Reflecting Intelligent Surface: RIS) 기반 공생 무선 통신 시스템에서 기생 장치의 수신 성능을 평가한다. 신호 수신을 위해선 송신 심볼의 변조 정보가 필요하지만, RIS 에서 위상 회전된 신호를 수신하는 기생 장치는 제어 정보를 수신할 수 없다. 이 경우 자동 변조 분류 기법을 통해 RIS 에서 위상 회전하는 신호의 변조 차수를 알아낼 수 있다. 실험을 통해 전송 블록 당 심볼 수와 RIS 어레이 수가 증가할수록 기생 장치의 수신 성능이 개선됨을 확인할 수 있다.

I. 서론

최근 이동통신 시스템의 무선 자원 효율을 개선하기 위해 지능형 반사 표면(Reflecting Intelligent Surface: RIS) 기반의 공생 무선 (Symbiotic Radio) 통신 기술들에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다 [1]. 그 중에서도, 기지국에서 전송되는 신호에 RIS 에서 위상 회전만을 적용하여 정보를 전송할 경우 추가적인 무선 자원 할당 없이 기존에 기지국에 연결되어 있는 장치(device) 대비 새로운 장치를 추가적으로 지원할 수 있다 [2]. 이렇게 기지국이 아닌 RIS 에서 정보를 수신 받는 장치를 기생(Parasite) 장치라고 정의한다. 하지만, RIS 에서 위상 회전된 데이터를 받는 장치는 제어 정보를 수신할 수 없기 때문에 변조(Modulation) 정보 없이 신호를 복조(Demodulation)해야 한다. 이렇게 제어 정보 없이 수신 데이터를 복조하는 경우에는 자동 변조 분류 (Automatic Modulation Classification: AMC) 기법을 활용하여 신호 복조가 가능하다 [3].

본 논문에서는 RIS 기반의 공생 무선 통신 시스템에서 제어 정보를 수신하지 못하는 기생 단말이 AMC 를 활용하여 신호를 수신하는 경우의 수신 성능을 평가한다. 모의 실험을 통해, 분류 정확도 및 변조 차수를 안다는 가정하에 얻어지는 비트 오류 비율(Bit Error Rate: BER)과 고려하는 기생 장치의 BER 성능을 비교 분석한다.

II. 시스템 모델

본 논문에서 고려하는 시스템은 기지국(Base Station), RIS, RIS 제어부(controller), 레거시 장치(Legacy device), 기생 장치로 구성되어 있다. 레거시 장치는 기지국으로부터 직접 제어 정보와 데이터를 수신 받는 장치, 기생 장치는 RIS 를 통해 데이터를 수신 받는 장치이다. 기지국과 레거시, 기생 장치는 모두 하나의 안테나로 신호를 송수신한다. 또한, RIS 는 N 개의 어레이(array)로 구성되어 있다. 기지국 과 기생 장치 간

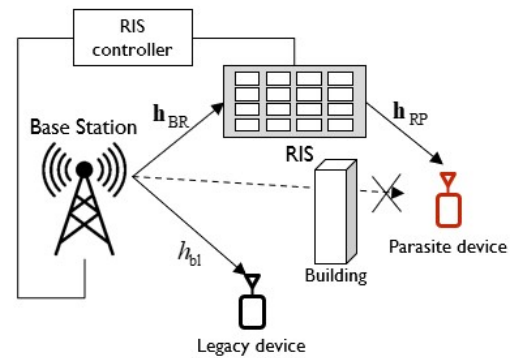


그림 1. 시스템 모델

에 위치한 건물로 인하여, 기생 장치는 기지국으로부터 직접 신호를 수신할 수 없다고 가정한다 [2]. 또한, 기생 장치와 RIS 는 채널 정보를 완벽히 알고 있다고 가정한다 [2].

기생 장치의 데이터 신호는 RIS 에서 레거시 장치의 신호에 $N \times N$ 위상 회전 행렬 Φ 를 적용한 후에 기생 장치로 전송된다. 기생 장치가 수신하는 신호를 y 라 하면, y 는 다음과 같이 표현된다.

$$y = \sqrt{p} \mathbf{h}_{BR}^H \Phi \mathbf{h}_{RP} x + n \quad (1)$$

식 (1)에서, p 는 송신 신호 전력 대비 잡음 비율 (Signal to Noise Ratio: SNR), \mathbf{h}_{BR} 는 $N \times 1$ 벡터로 표현되는 기지국과 RIS 간 채널, \mathbf{h}_{RP} 는 $N \times 1$ 벡터로 표현되는 RIS 와 기생 장치 간의 채널, x 는 기지국이 레거시 장치로 보내는 데이터 신호, n 은 평균이 0 이고 분산이 1 인 additive white Gaussian noise 를 의미한다.

III. RIS 를 사용한 기생 신호의 송수신 동작

식 (1)에서, RIS 에서 수신하는 신호에 적용하는 위상 회전 행렬 Φ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\Phi = e^{j\theta} \text{diag}\{e^{j\theta_1}, \dots, e^{j\theta_N}\}, w_i \in \mathbf{M} \quad (2)$$

식 (2)에서, RIS 에서 채널 정보를 모두 알고 있을 경우 수신 SNR 을 최대화하기 위한 위상 θ_k 는 다음과 같이 표현된다.

$$\theta_k = -\arg(h_{\text{BR},k}) - \arg(h_{\text{RP},k}) \quad (3)$$

식 (3)에서 $h_{\text{BR},k}$ 과 $h_{\text{RP},k}$ 는 각각 \mathbf{h}_{BR} 과 \mathbf{h}_{RP} 의 k 번째 성분을 의미한다. 또한, 식 (2)에서 \mathbf{M} 은 레거시 장치와 기생 장치의 변조 차수, 그리고 레거시 장치의 송신 심볼에 따라 결정되는 위상이다. 레거시 장치의 변조 차수를 M_1 , 기생 장치의 변조 차수를 M_2 라 하면 w_i 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$w_i = \frac{2\pi(i-1)}{M_1 M_2}, i=1, \dots, M_2 \quad (4)$$

기생 장치의 신호 수신 과정을 설명하면 다음과 같다. 수신된 신호에 채널 등화를 수행하고, 채널 등화된 신호를 사용하여 AMC 를 통해 레거시 장치 심볼의 변조 차수를 획득한다. 획득한 변조 차수를 사용하여 기생 장치는 정보 획득을 위한 복조를 수행한다.

IV. 실험 결과

제어 정보를 수신 받지 못하는 기생 장치가 AMC 를 활용하여 복조를 수행할 시 BER 성능을 실험을 통해 분석한다. 실험을 위해 \mathbf{h}_{BR} 과 \mathbf{h}_{RP} 는 Rician 채널로 가정하고, Rician factor 는 모든 채널에 대해 1 로 설정한다. 기생 장치에서의 AMC 기법은 Log-Likelihood Ratio 기반의 변조 분류 기법을 사용한다 [3]. 실험에서, 기지국과 RIS 는 M-ary 위상 회전 변조 (Phase Shift Keying) 기법을 사용한다. 기지국이 레거시 장치 신호에 적용할 수 있는 변조 차수는 $M_1=\{2,4,8\}$ 이며 실제 전송하는 신호의 변조 차수는 $M_1=4$ 이다. 기생 장치 신호의 변조 차수는 $M_2=2$ 를 사용하고, 기생 장치는 M_2 정보를 알고 있다고 가정한다. 비교를 위해, 모든 실험에서 완벽한 AMC 를 수행하는 경우의 BER 성능을 도출하였다.

그림 2 는 다양한 전송 데이터 블록 당 심볼 수(n_{sym})에 대한 송신 SNR 에 따른 BER 성능이다. n_{sym} 은 매 AMC 수행 시에 사용되는 심볼 수이다. 실험에서 RIS 어레이 수는 4 로 설정하였다. 실험 결과를 통해, n_{sym} 이 증가할수록 BER 성능이 개선되며 동시에 완벽한 AMC 를 수행하는 경우의 BER 성능에 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 이러한 BER 성능 변화는 n_{sym} 이 증가할수록 기생 장치에서의 AMC 정확도가 개선되기 때문이다. 또한, $n_{\text{sym}}=50$ 일 경우 제어 정보 없이도 완벽한 AMC 대비 0.5 dB 이내의 수신 성능 열화만을 겪는 것을 확인할 수 있다.

그림 3 은 RIS 의 어레이 수를 증가시킬 경우 송신 SNR 에 따른 기생 장치의 BER 성능을 보여준다. 실험에서 $n_{\text{sym}}=50$ 으로 설정하였다. 그림 3 을 통해, RIS 의 어레이 수가 증가할수록 BER 성능이 개선되며 완벽한 AMC 인 경우와의 성능 차이도 줄어들음을 확인할 수 있다. 이는 RIS 어레이 수 증가에 따라 개선되는 수신 SNR 을 통해 AMC 의 분류 정확도와 복조 성능이 동시에 개선되기 때문이다.

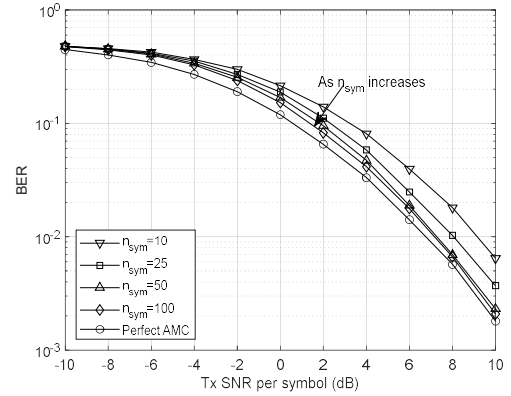


그림 2. 다양한 전송 블록 별 심볼 수에 따른 BER 성능.

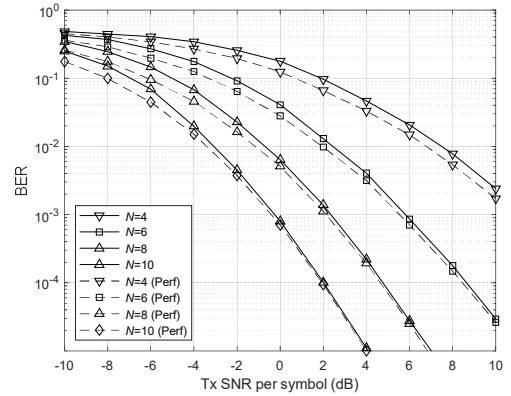


그림 3. 다양한 N에 따른 BER 성능.

V. 결론

본 논문에서는 공생 무선 통신 시스템에서 제어 정보 없이 신호를 수신하는 기생 장치의 BER 성능을 분석하였다. 기생 장치는 신호 복조를 위해 AMC 를 활용하였다. 실험을 통해 AMC 에 사용되는 심볼 수와 기생 장치 신호를 전송하는 RIS 의 어레이 개수가 증가할수록 기생 장치의 BER 성능이 개선됨을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(NRF-2021R1C1C1012950, NRF-2022R1F1A1064106).

참고 문헌

- [1] W. Liu et al., "Backscatter multiplicative multiple-access systems: fundamental limits and practical design," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 17, no. 9, pp. 5713-5728, Sep. 2018.
- [2] M. Jung et al., "On the optimality of reconfigurable intelligent surfaces (RISs): passive beamforming, modulation, and resource allocation," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 20, no. 7, pp. 4347-4363, Jul. 2021.
- [3] J. L. Xu et al., "Likelihood-ratio approaches to automatic modulation classification," IEEE Trans. Syst., Man, Cybern. C, Appl. Rev., vol. 41, no. 4, pp. 455-469, Jul. 2011.