

RIS 기반 Symbiotic Radio 을 위한 SIC 기반 채널 추정 및 변조 기법

강슬기[†], 민정식[‡]

[†]수원대학교 정보통신학과, [‡]가천대학교 전자공학과

[†]kangsk0302@suwon.ac.kr, [‡]ksmin@gachon.ac.kr

SIC-based Channel Estimation and Modulation for RIS-aided Symbiotic Radio

Seulgi Kang[†], Kyungsik Min[‡]

[†]Dept. of Information and Telecommunication Engineering, The University of Suwon

[‡]Department of Electronic Engineering, Gachon University

요 약

본 논문에서는 지능형 반사 표면(Reflecting intelligent surface: RIS) 기반 symbiotic radio 에서 RIS 에서 전달되는 신호의 검출을 위한 채널 추정 기법 및 RIS 변조 기법을 연구한다. 제안하는 채널 추정 기법은 순차적 간섭 제거(successive interference cancellation: SIC) 및 기지국의 전송 신호를 채널로 해석하는 방식이다. 또한 제안하는 채널 추정 기법에 적합한 RIS 변조 기법을 제시한다. 모의실험 결과 제안 기법을 사용한 경우의 RIS 전송 신호 검출 성능이 간단한 SIC와 기존 변조 기법 대비 bit error rate 10^{-2} 기준으로 10 dB의 signal-to-noise ratio가 개선되었다.

I. 서 론

Symbiotic radio (공생 무선) 시스템은 legacy 신호를 backscattering 함으로써 무선 자원 할당 없이 추가적인 정보를 전송할 수 있다 [1]. 특히 RIS 기반의 symbiotic radio 의 경우 backscattering 기반 symbiotic radio 대비 정보 전송량을 증가시킬 수 있다 [2].

RIS 기반 symbiotic radio 시스템에서 legacy 신호와 RIS로부터 전달되는 신호 수신과 관련된 기존 연구의 경우 maximum likelihood (ML) 기반의 수신 기법만 연구되었다 [3]. 하지만 ML 기반 수신 기법은 상당히 높은 연산량을 요구한다. 반대로 낮은 복잡도의 수신을 위해선 legacy 신호와 RIS로부터 전달되는 신호가 겪는 채널 추정 기반 신호 수신에 요구되지만, RIS가 있는 환경에서는 채널 정보를 추정하기 어렵다. 따라서 본 논문에서는 RIS 기반 symbiotic radio에서의 채널 추정 기반 선행 수신 기법에 대해 연구한다.

II. 본론

본 논문에서는 그림 1과 같이 기지국과 단말 사이에 RIS가 존재하는 symbiotic radio 시스템을 고려한다. RIS는 N 개의 반사 소자로 구성되어 있다. 기지국과 단말 간 채널을 h_{BU} , 기지국과 RIS 사이 채널을 h_{BR} , RIS와 단말 간 채널을 h_{RU} 로 정의하며 h_{BU} 는 복소수, h_{BR} 과 h_{RU} 는 각각 $N \times 1$ 과 $1 \times N$ 인 복소수 벡터이다. RIS에서의 위상 회전은 RIS controller에 의해 수행된다. 또한, RIS는 채널 정보를 완벽히 알고 있으며, 수신 단말은 기지국과 RIS로부터 전송되는 신호의 변조 차수를 알고 있다고 가정한다 [2].

기지국에서 송신하는 신호를 x_{BU} , RIS에서 위상 회전을 통해 전달되는 신호를 x_{RU} 라 할 때 단말이 수신하는 신호는 다음과 같다.

$$y_{RU} = h_{BU}x_{BU} + \mathbf{h}_{RU}\Phi\mathbf{h}_{BR}x_{BU}x_{RU} + n \quad (1)$$

식 (1)에서 n 은 additive white Gaussian noise를 의미한다. 또한 Φ 는 RIS의 위상 회전 행렬이다.

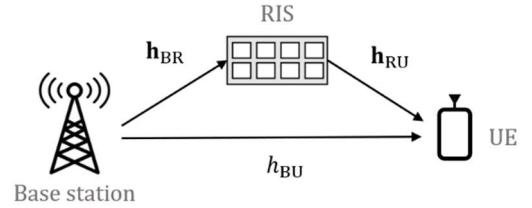


그림 1. 시스템 모델.

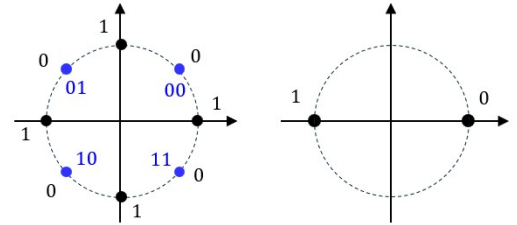


그림 2. 기존 RIS에서의 신호 변조 방식(왼쪽)과 BPSK 변조 방식(오른쪽).

III. RIS 전달 신호의 수신 방식

x_{BU} 와 x_{RU} 를 검출하기 위해서는 채널 h_{BU} 와 $\mathbf{h}_{RU}\Phi\mathbf{h}_{BR}$ 를 알고 있어야 한다. 본 장에서는 송신 신호 x_{BU} 와 x_{RU} 를 검출하기 위한 단말의 채널 추정 방식 및 신호 검출을 위한 RIS의 변조 방식을 소개한다. 본 연구에서 기지국은 2 bit 정보를 quadrature phase shift keying (QPSK) 방식으로, RIS에서는 1 bit 정보를 전송하는 것을 가정한다. 또한 x_{BU} 는 오류 없이 검출된다고 가정한다. x_{RU} 의 성상도는 그림 2의 왼쪽에 표현되어 있다. 그림과 같이 x_{RU} 는 기지국의 QPSK 심볼에 0 또는 $\frac{\pi}{4}$ 의 위상 회전을 적용시켜 발생 가능한 모든 심볼이 중첩되지 않도록 설계되었다.

1. SIC 기반 채널 추정 방식

먼저 successive interference cancellation (SIC)을 활용하여 h_{BU} 와 $\mathbf{h}_{RU}\Phi\mathbf{h}_{BR}$ 를 각각 추정하는 방식을 소개한다. 먼저 h_{BU} 는 기지국과 단말 간 채널이므로 h_{BU} 를 추정하기 위해선 RIS를 비활성화하면 된다. h_{BU} 를

추정하기 위해서 RIS 를 비활성화하고 파일럿 신호 $x_{BU,p} = 1$ 를 전송하는 경우의 수신 신호는 다음과 같다.

$$y_{BU,p} = h_{BU}x_{BU,p} + n \quad (2)$$

$x_{BU,p} = 1$ 을 식 (2)에 대입하면 추정된 채널 \hat{h}_{BU} 은 다음과 같다.

$$\hat{h}_{BU} = h_{BU} + n \quad (3)$$

식 (3)에서 얻어진 \hat{h}_{BU} 을 이용해 식 (1)에서 기지국 신호 성분을 제거할 수 있다. $h_{eff} = \mathbf{h}_{RU}\Phi\mathbf{h}_{BR}$ 라 정의하고 기지국과 RIS 에서 파일럿 신호 $x_{BU,p} = 1$ 과 $x_{RU,p} = 1$ 을 각각 보낸다면 수신 신호는 다음과 같다.

$$y_{RU,p} = h_{BU}x_{BU,p} + h_{eff}x_{BU,p}x_{RU,p} + n \quad (4)$$

식 (4)에 $x_{BU,p} = 1$ 과 $x_{RU,p} = 1$ 을 대입하고 $\hat{h}_{BU}x_{BU,p}$ 를 제거할 경우 h_{eff} 은 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$\hat{h}_{eff} = y_{RU,p} - \hat{h}_{BU} = h_{eff} + (h_{BU} - \hat{h}_{BU}) + n \quad (5)$$

식 (3)과 (5)에서 추정된 채널을 활용하여 x_{RU} 를 검출할 수 있다. 단말은 추정된 채널 \hat{h}_{BU} 를 활용하여 수신 신호 (1)에서 기지국과 단말 간 직접(direct) 채널로 수신되는 신호 성분을 SIC 를 통해 제거할 수 있다. SIC 를 적용한 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$\tilde{y}_{SIC} = y_{RU} - x_{BU}\hat{h}_{BU} \approx h_{eff}x_{BU}x_{RU} + n \quad (6)$$

식 (6)에서의 근사는 기지국으로부터 직접 수신된 신호 성분이 완벽히 제거된다는 가정이다. 식 (6)과 \hat{h}_{eff} , x_{BU} 를 활용하여 단말은 x_{RU} 를 검출할 수 있다.

2. x_{BU} 를 채널로 해석하는 경우의 수신 방식

x_{BU} 를 송신 심볼이 아닌 채널로 해석할 경우 RIS 에서 전달된 신호가 multipath 에 의한 이득을 얻을 수 있는 원리를 활용하면 수신 성능을 개선할 수 있다. 단말은 식 (6)과 같이 기지국과 단말 간 직접 연결된 채널인 h_{BU} 을 먼저 추정하여 제거한 후 x_{BU} 를 x_{RU} 가 겪는 채널 성분으로 모델링하여 x_{RU} 를 검출한다. x_{BU} 를 채널로 고려할 경우 x_{RU} 가 겪는 유효 채널은 $h_{eff,2} = \mathbf{h}_{RU}\Phi\mathbf{h}_{BR}x_{BU}$ 이다. III-1 장에서 추정한 \hat{h}_{BU} 를 사용하여 SIC 를 수행한 이후의 수신 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$\tilde{y}_{SIC+eff} = y_{RU} - \hat{h}_{BU}x_{BU} \approx h_{eff,2}x_{RU} + n \quad (7)$$

식 (7)에서 $h_{eff,2}$ 는 \hat{h}_{eff} 와 x_{BU} 를 사용하여 구할 수 있다. 이 경우 x_{RU} 가 $h_{eff,2}$ 를 사용하여 검출될 경우 h_{eff} 와 x_{BU} 에 의한 multipath 효과를 동시에 얻을 수 있다.

3. RIS 의 BPSK 기반 신호 전달 및 수신 방식

이전 장에서 소개된 신호 검출 방식에 따르면 x_{RU} 의 신호 검출은 x_{BU} 검출과 독립적인 신호 처리로 고려할 수 있다. 따라서 x_{RU} 의 변조 방식 설계 시 x_{BU} 과 독립적으로 설계될 경우 x_{RU} 의 심볼 간 Euclidean 거리를 기존 대비 크게 함으로써 수신 성능을 향상시킬 수 있다. 상기 분석에 의하여 본 연구에서는 SIC 기반 채널 추정 기반의 독립적인 x_{RU} 변조 방식 사용을 제안한다. 널리 사용되는 기존의 binary phase shift keying(BPSK, 그림 2 오른쪽)을 적용할 경우 Euclidean 거리에 의해 수신 신호의 BER 성능을 개선시킬 수 있다.

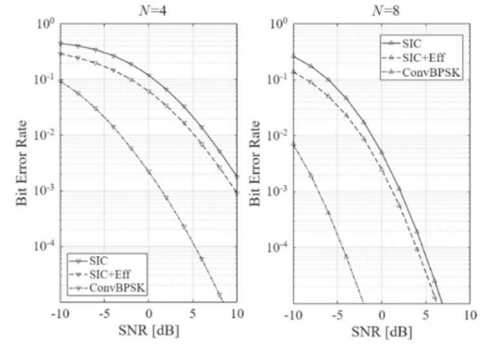


그림 3. 채널 추정 방식 및 RIS 변조 방식에 따른 수신 신호의 BER 성능.

IV. 모의실험 및 분석

실험을 통해 채널 추정 및 변조 방식에 따른 수신 x_{RU} 의 BER 성능을 비교 분석한다. RIS 에 의해 생성되는 채널은 Rician fading 채널로 모델링하였으며, 모든 채널의 Rician factor 는 1 로 가정하였다. 또한 기지국과 단말 간 채널은 Rayleigh fading 채널을 가정한다. RIS 에서는 완벽한 채널 정보 기반의 위상 회전 행렬을 적용한다 [2]. 그림 3 은 $N = 4, 8$ 인 경우 채널 추정 방식 및 RIS 의 변조 방식에 따른 x_{RU} 의 BER 성능을 나타낸다. 실험을 통해 x_{BU} 를 채널로 해석하는 경우 기존 방식 대비 10^{-2} 의 BER 에서 약 2dB 의 SNR 이득을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다. 이는 RIS 신호가 겪는 채널에 multipath 효과가 반영되었기 때문이다. 또한, RIS 에서 그림 2 의 오른쪽과 같은 기존 BPSK 변조 방식을 사용하는 경우 약 8dB 의 SNR 이득을 얻음을 확인할 수 있다. 이는 심볼 간 Euclidean 거리가 커짐으로 인해 검출 성능이 개선되기 때문이다.

V. 결론

본 논문에서 RIS 기반 symbiotic radio 서 RIS 신호 검출을 위한 SIC 기반 채널 추정 및 RIS 변조 방식을 연구하였다. 모의실험 결과 기지국 신호 성분을 채널로 간주하여 검출하는 경우 multipath 효과에 의해 간단한 SIC 기반 채널 추정 대비 BER 성능이 개선됨을 확인하였다. 또한 제안된 채널 추정 기법을 사용할 경우 RIS 에서 심볼 간 Euclidean 거리가 최대로 하는 변조 방식이 수신 성능을 개선시킬 수 있음을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 성과는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2025-24534162).

참 고 문 헌

- [1] W. Liu et al., "Backscatter multiplicative multiple-access systems: Fundamental limits and practical design," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 17, no. 9, Sep. 2018.
- [2] K. Min, T. Kim, M. Jung, "Performance analysis of parasitic communication in reconfigurable intelligent surface based symbiotic radio," IEEE Wireless Communication Letters, vol. 40, no. 10, Oct. 2025.
- [3] H. Zhou et al., "Modulation design and optimization for RIS-assisted symbiotic radios," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 23, no. 10, Oct. 2024.