

RIS 기반 통신 시스템에서 OOBE 영향을 고려한 성능 분석

김지형, 김정현*
한국전자통신연구원, *세종대학교

savant21@etri.re.kr

Performance Analysis of RIS-enabled Communication Systems Considering OOBE

Kim Jihyung, Kim Junghyun*
ETRI, *Sejong Univ.

요 약

본 논문은 RIS 기반 통신 시스템에서 OOBE 영향을 고려하여 제어 효율과 스펙트럼 제약이 처리율에 미치는 관계를 분석하였다. 제어 비트 수, 오버헤드 및 스펙트럼 제약 요소를 통합적으로 모델링하여 시스템 운용 조건 변화에 따른 성능 특성을 평가하였다. 수치해석을 통해 RIS 제어 설계의 성능 향상을 위한 효율적인 운용 방향을 제시하였다.

I. 서 론

재구성 지능표면(Reconfigurable Intelligent Surface, RIS)은 저전력·저비용으로 전파 환경을 제어할 수 있는 기술로, 차세대 이동통신의 핵심 구성요소로 주목받고 있다. RIS는 반사 요소의 위상과 진폭을 조절함으로써 채널 특성을 능동적으로 개선할 수 있으며, 이를 통해 링크 품질과 에너지 효율을 향상시킬 수 있다. 이러한 특성으로 인해 최근 RIS를 적용한 다양한 통신 구조와 성능 분석 연구가 활발히 이루어지고 있다.

기존 연구에서는 RIS의 위상 제어 해상도, 즉 제어 비트 수가 시스템 성능에 미치는 영향을 다각적으로 분석하였다. 제한된 피드백 환경에서 RIS 제어 비트 수와 스펙트럼 효율 간의 관계를 분석한 연구에서는 피드백 비트 수가 부족할 경우 성능 저하가 발생함을 확인하였으며[1], RIS의 크기와 위상 제어 정밀도 간의 최적 관계를 탐색한 연구에서는 비트 수가 증가할수록 수신 이득이 향상되지만 일정 수준 이후에는 개선 폭이 감소하는 경향을 보였다[2]. 또한, 위상 양자화 단계의 변화에 따른 빔포밍 성능을 분석한 연구에서는 저해상도 양자화만으로도 충분한 성능을 확보할 수 있음을 보였다[3]. 이와 같이 제어 비트 수와 성능 간의 상호 관계를 규명한 연구는 다양하지만, 대부분의 연구는 대역외 방사(Out-of-Band Emission, OOBE)나 인접채널 누설비(Adjacent Channel Leakage Ratio, ACLR)와 같은 스펙트럼 제약 조건을 고려하지 않은 경우가 많다. 실제 시스템에서는 RIS의 재구성 주기나 스위칭 속도가 빨라질수록 전송 신호의 스펙트럼이 확산되어 OOBE가 증가할 수 있으며, 이는 ACLR 규격을 만족하기 위해 송신 전력의 제한을 유발할 수 있다. 따라서 제어 비트 수가 많아져 정밀도가 높아지더라도, 스펙트럼 마스크 제약으로 인해 실제 처리율이 감소하는 현상이 발생할 수 있다.

본 논문에서는 이러한 현실적인 제약을 함께 고려하여, OOBE 영향을 포함한 RIS 기반 통신 시스템의 성능을

분석한다. 제어 비트 수, 제어 오버헤드, 그리고 스펙트럼 제약을 통합적으로 고려함으로써, OOBE 및 ACLR 제약을 포함한 성능 분석 모델을 제시하고 제어 비트 수 변화에 따른 처리율의 변화를 수치적으로 분석한다. 이를 통해 제어 비트 수, 제어 오버헤드, 그리고 스펙트럼 제약이 시스템 성능에 미치는 영향을 종합적으로 평가하고, RIS 제어 설계 시 고려해야 할 현실적인 운용 지점을 제시한다.

II. 시스템 모델 및 성능 분석

RIS 기반 통신 시스템에서 제어 비트 수와 OOBE 제약이 처리율에 미치는 영향을 분석하기 위한 모델을 유도하기 위해, 제어 비트 수 B , 제어 오버헤드 $\alpha(B)$, 위상 양자화 손실 $\eta(B)$, 그리고 OOBE 제약에 따른 유효 전력 계수 $\beta(B)$ 를 통합하여 실제 처리율을 나타내고 이를 통해 최적의 제어 비트 수 B^* 를 도출한다.

RIS 보조 링크는 기지국-RIS-단말 간의 경로로 구성되며, 각 반사 소자는 B 비트 양자화를 통해 위상을 제어한다. 제어 비트 수가 커질수록 위상 오차는 감소하여 반사 효율이 향상되며, 이는 위상 양자화 손실 계수 $\eta(B) = (\sin(\pi/2^B)/(\pi/2^B))^2$ 로 표현된다. 이는 제어 정밀도에 따른 반사 효율 변화를 나타내며, B 가 증가할수록 효율이 향상되는 특성을 갖는다[3]. RIS의 제어 과정에는 각 반사 소자의 제어 비트를 전송하고 재구성하는 시간이 포함되며, 이는 전체 프레임 내 일정 비율의 제어 오버헤드를 발생시킨다. 반사 소자 수 N , 제어 주기 T_u , 제어 링크 속도 R_{ctrl} 에 따라 제어 오버헤드 $\alpha(B)$ 는 $(N \cdot B / R_{ctrl}) / T_u$, $\alpha(B) \in [0, 1]$ 로 표현된다. 이는 제어 비트 수가 증가할수록 오버헤드가 선형적으로 증가함을 의미하며, RIS 제어 신호 처리 복잡도를 반영한다[1]. 이상의 요소를 고려한 기본 처리율은 다음과 같다.

$$R(B) = (1 - \alpha(B))W \log_2(1 + SNR_0 \eta(B)) \quad (1)$$

여기서 W 는 시스템 대역폭이며, SNR_0 은 제약이 없는 기준 신호대잡음비를 의미한다.

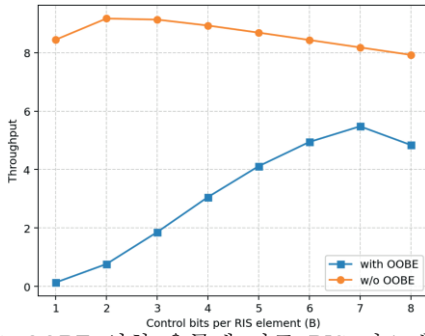


그림 1. OOB 영향 유무에 따른 RIS 시스템에서의 제어 비트 수에 따른 처리율

한편, 실제 시스템에서는 RIS의 재구성 주기가 스위칭 속도에 따라 송신 신호의 스펙트럼 확산이 발생하며, ACLR 제약을 만족하기 위해 송신 전력이 감소할 수 있다. 이를 반영하기 위해 유효 송신 전력 $P_{\text{eff}}(B)$ 은 $P_{\text{max}}\beta(B)$ 로 정의한다. 여기서 P_{max} 는 시스템의 최대 송신 전력이며, $\beta(B)$ 는 OOB 제약에 따른 전력 백오프 계수로 $0 < \beta(B) \leq 1$ 의 범위를 갖는다. 유효 송신 전력을 반영한 실제 SNR은 다음과 같이 정의된다.

$$\text{SNR}(B) = \frac{P_{\text{eff}}(B)G|h|^2}{\sigma^2} \quad (2)$$

여기서 G 는 링크 이득, $|h|^2$ 은 채널 이득의 제곱 크기, σ^2 은 잡음 전력을 의미한다. 이를 이용한 실제 처리율은

$$R_{\text{total}}(B) = (1 - \alpha(B))W \log_2(1 + \text{SNR}(B)) \quad (3)$$

로 표현된다.

이 모델은 제어 비트 수 증가에 따른 세 가지 요인인 반사 효율 향상($\eta(B)$), 제어 오버헤드 증가($\alpha(B)$), OOB 제약으로 인한 전력 감소($\beta(B)$)를 동시에 고려한다. B 가 작을 때는 위상 오차의 영향이 커서 처리율이 낮고, B 가 커질수록 제어 오버헤드 및 스펙트럼 제약으로 인한 손실이 우세해져 처리율은 일정 구간 이후 감소한다. 최적의 제어 비트 수 B^* 는 처리율을 최대화하는 값으로 정의되며, 다음의 정류조건의 균형식을 통해 유도된다.

$$\frac{\alpha'(B)}{1 - \alpha(B)} = \frac{1}{\ln 2 (1 + \text{SNR}(B)) \log_2(1 + \text{SNR}(B))} \left(\frac{\eta'(B)}{\eta(B)} + \frac{\beta'(B)}{\beta(B)} \right) \quad (4)$$

여기서 $(\cdot)'$ 표기는 B 에 대한 도함수를 의미한다. 위 식은 제어 오버헤드의 증가율과 실효 SNR의 상대적 향상률이 균형을 이루는 지점을 나타낸다. 본 논문에서는 B 를 연속변수로 완화하여 위 식의 해를 수치적으로 구한 후, 인접 정수값 중 처리율이 최대인 값을 B^* 로 결정한다.

$$B^* = \arg \max_{B \in \{\bar{B}, \lceil \bar{B} \rceil\}} R_{\text{total}}(B) \quad (5)$$

여기서 \bar{B} 는 연속근사 해, $\lceil \cdot \rceil$ 와 $\lfloor \cdot \rfloor$ 는 각각 바닥 및 천장 함수를 의미한다.

III. 수치해석 결과

본 장에서는 II장에서 유도한 모델을 기반으로 RIS 제어 비트 수, 제어 오버헤드, 그리고 OOB 제약이 처리율에 미치는 영향을 수치적으로 분석한다. 모든 시뮬레이션은 정상화된 대역폭 $W=1$ 기준으로 수행되었다.

그림 1은 제어 비트 수 B 에 따른 처리율 변화를 보여준다. OOB를 고려하지 않은 경우와 고려한 경우 모두 B 증가에 따라 반사 효율 $\eta(B)$ 이 높아지며 처리율이 증가하지만, 일정 구간 이후에는 제어 오버헤드 $\alpha(B)$ 와 전력 백오프 $\beta(B)$ 의 영향으로 감소한다. OOB를 고려하지 않은 경우 최대 처리율이 더 큰 B 에서 나타나며, OOB를 고려한 경우에는 스펙트럼 제약으로 인해 피크가 더 작은 B 에서 발생한다. 그림 2는 제어 비트 수 B 에 따른 제어 오버헤드 $\alpha(B)$ 와 유효 전력 계수

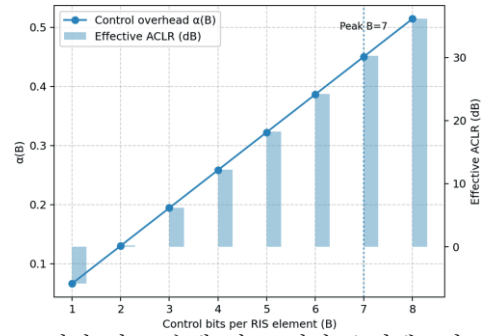


그림 2. 제어 비트 수에 따른 제어 오버헤드와 OOB 유효 전력 계수 변화

$\beta(B)$ 의 변화를 나타낸다. B 가 커질수록 $\alpha(B)$ 는 선형적으로 증가하고, $\beta(B)$ 는 점차 감소한다. 두 곡선이 교차하는 구간 근처에서 전체 처리율이 최대가 되며, 이는 (5)에서 유도한 B^* 와 일치한다. OOB 제약이 완화되거나 제어 주기가 길어질수록 B^* 는 증가하고, 제어 오버헤드가 커지거나 RIS 소자 수 N 이 많아질수록 B^* 는 감소한다. 따라서 제어 자원과 스펙트럼 제약을 함께 고려한 B^* 설정이 필요하다. 결과적으로, 제안된 모델은 제어 정밀도와 스펙트럼 효율 간의 상충 관계를 효과적으로 설명하며, RIS 제어 파라미터 설계 시 실질적인 참고 기준을 제공한다.

IV. 결론

본 논문에서는 RIS 기반 통신 시스템에서 OOB 제약을 고려한 제어 비트 수와 처리율 간의 상호 관계를 분석하였다. 제안된 모델은 제어 오버헤드, 위상 정밀도, 및 스펙트럼 제약을 통합적으로 반영하여 실제 시스템에서의 최적 운용 조건을 도출할 수 있음을 보였다. 수치해석을 통해, OOB 제약이 강화될수록 최적 제어 정밀도가 낮아지고, 제어 오버헤드와 스펙트럼 효율의 균형이 전체 성능을 결정함을 확인하였다. 이러한 결과는 향후 RIS 제어 파라미터 설계 및 스펙트럼 효율 최적화 연구에 활용될 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 2025년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 연구임(No. RS-2022-II220436, 지능형 재구성 표면 중계기 표준기술개발)

참고 문헌

- [1] W. Chen et al., "Channel customization for limited feedback in RIS-assisted wireless communications," IEEE Transactions on Wireless Communications, vol. 21, no. 9, pp. 6260–6275, Sept. 2022.
- [2] D. Shen et al., "Dimension-Reduced Channel Feedback for Reconfigurable Intelligent Surface-Aided Wireless Communications," IEEE Wireless Communications Letters, vol. 10, no. 6, pp. 1265–1269, June 2021.
- [3] A. Haskou and H. Khaleghi, "On the Effect of RIS Phase Quantization on Communications System Performances," in 2023 International Wireless Communications and Mobile Computing (IWCMC), Marrakesh, Morocco, 2023.