

다중 사용자 접속 환경에서의 RIS 설계 기법

김 용 휘*, 채 찬 병^o

Design Method of RIS in Multiple Access

Yonghui Kim*, Chan-Byoung Chae^o

요 약

본 논문에서는 reconfigurable intelligent surface (RIS)를 활용해 다중접속을 지원하는 환경에서, RIS에 장착하는 소자의 개수 및 위상 변화 방법을 수식적으로 분석한다. RIS의 비교군인 중계기 기술, 그중에서도 decode-and-forward (DF)와 다중접속환경에서 성능을 비교하여, 각 환경에서 단일 안테나 기지국이 소비하는 송신전력을 수식적인 정리와 시뮬레이션을 통해 분석하였다. Time sharing, non-orthogonal multiple access (NOMA) 등의 다중접속 기술에 기반하였을 때, RIS가 DF 중계기에 비해 더 좋은 성능을 도출하는 RIS 소자 개수를 구하는 타당한 수식적 정리를 제시할 수 있었다.

Key Words : RIS, Multiple Access, DF Relay

ABSTRACT

In this paper, we propose an analytical design method of reconfigurable intelligent surface (RIS) supporting multiple access. Comparing the performance of the relay, especially decode-and-forward (DF), we analyze transmit power consumed by base station with single antenna through theorems and simulations. Based on multiple access technologies such as time sharing, we can confirm that RIS needs 65 or more elements to

derive better performance than DF relay in a multiple access environment.

I. 서 론

5세대 이동통신 (5G), 6세대 이후 이동통신은 주파수 frequency range 1 (FR1)부터 FR2 까지 GHz 영역의 높은 주파수 영역의 전파를 활용하고, 이는 강한 경로감쇠가 발생하는 단점으로 이어진다^[1].

Reconfigurable intelligent surface (RIS)는 최근 활발히 연구되고 있는 통신 시스템이다^[2]. 기지국이 송신하는 전파를 위상을 변화시켜 반사시키고, 사용자에게 도달하는 채널 이득을 최대화 할 수 있다^[3].

RIS의 활용에 있어, analytic한 분석을 통해 다중접속에 대한 연구가 필요하다. 기존 연구로는, 한명의 사용자가 있는 시나리오 상에서 analytic하게 중계기와의 성능을 비교하거나^[4], RIS에서의 다중접속 기술을 수치해석적으로 비교한 연구가 있다^[5]. 이에 본 연구진은 closed-form으로 RIS 요소 분할 기반 다중접속 기법을 제시하였는데^[2], 본 연구는 해당 연구의 후속 연구로, TS 다중 접속의 analytic 한 분석을 통해 RIS 설계 기법을 제시한다.

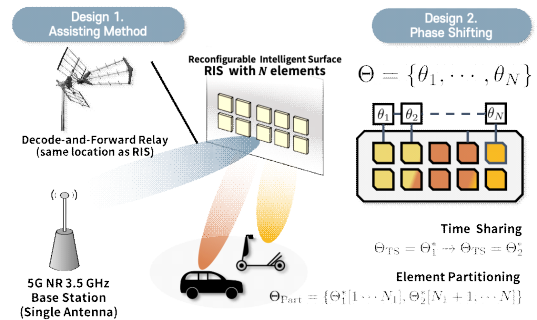


그림 1. RIS 설계 기법 제시를 위한 시나리오
 Fig. 1. Scenario of RIS and DF relay

II. 시스템 모델

2.1 RIS 채널 및 채널이득 모델링

RIS가 N개의 소자를 장착 중이고, 단일 안테나를

* 본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 미래전투체계 네트워크 기술 특화연구센터 일환으로 수행되었습니다 (UD190033ED).

• First Author : (ORCID:0000-0002-6899-5206) Yonsei University School of Integrated Technology, eric_kim@yonsei.ac.kr, 학생(박사과정), 학생회원

o Corresponding Author : (ORCID:0000-0001-9561-3341) Yonsei University School of Integrated Technology, cbchae@yonsei.ac.kr, 정교수, 종신회원

논문번호 : 202209-220-A-LU, Received September 21, 2022; Revised September 21, 2022; Accepted September 21, 2022

장착중인 기지국을 도와 K 명의 사용자를 서비스하는 시나리오를 정의한다. 기지국과 사용자 간의 채널 $\mathbf{h}_{BU} = [h_{BU,1}, h_{BU,2}]^T$ 는 non-line-of-sight (NLOS) 형태로 정의하였다. 기지국과 RIS 간의 채널 $\mathbf{h}_{BR} = [h_{BR,1}, \dots, h_{BR,N}]^T$, RIS와 사용자 간의 채널 $\mathbf{H}_{RU} = [\mathbf{h}_{RU,1}, \mathbf{h}_{RU,2}]^T$ 는 line-of-sight (LOS)로 전파됨을 정의하였다. 이때 각 소자가 θ_n 만큼 위상을 변화시킨다고 할 때, 기지국과 사용자 k 간의 채널 h_k 의 모델링은 다음과 같다:

$$h_k = h_{BU,k} + \mathbf{h}_{RU,k} \Phi(\theta) \mathbf{h}_{BR} \quad (1)$$

$$\Phi(\theta) = \text{diag}[e^{j\theta_1}, \dots, e^{j\theta_n}, \dots, e^{j\theta_N}].$$

이때의 위상변화 Φ 는 h_k 의 절댓값, 채널 이득 $||h_k||$ 를 최대화한다. 이때, $h_{BU,k}$, $\mathbf{h}_{RU,k}$, \mathbf{h}_{BR} 각각의 채널 이득을 $\beta_{BU,k}$, $\beta_{RU,k}$, β_{BR} 로, 각 사용자에게 배정된 소자의 수를 N_k 로 정의한다.

2.2 RIS 위상변화 최적화

다중 접속 환경에서, 기지국의 총 송신전력 Q 를 최소화하는 RIS의 총 위상변화 벡터 $\theta = \{\theta_1, \dots, \theta_N\}$ 는 각 사용자별 위상변화 θ_k^* 를 조합하는 방식으로 설계 가능하다.

2.2.1 각 사용자별 위상변화 최적화

기지국이 단일 안테나를 장착하고, 한명의 사용자 k 가 있을 때, $||h_k||$ 을 최대화 하는 RIS의 총 위상변화를 θ_k^* 라고 할 때, 다음과 같이 구할 수 있다⁴⁾:

$$\theta_k^*[n] = \arg(h_{BU,k}) - \arg(\mathbf{h}_{RU,k}[n] \mathbf{h}_{BR}[n]). \quad (2)$$

이때의 사용자별 개선된 채널이득 λ_k^* 는 다음과 같다:

$$\lambda_k^* = (\sqrt{\beta_{BU,k}} + N_k \sqrt{\beta_{BR} \beta_{RU,k}})^2. \quad (3)$$

2.2.2 Non-orthogonal multiple access(NOMA)

NOMA의 경우, RIS 소자를 사용자별로 분배하고, 다음과 같이 θ_k^* 를 조합하여 θ 를 구할 수 있다:

$$\theta = \{\theta_1^*[1:N_1], \dots, \theta_{K'}^*[N-N_k+1:N]\}. \quad (4)$$

2명의 사용자에게 대해 복조순서를 고려해 analytic하

게 표현 가능한 송신전력은 밀과 같다²⁾:

$$Q_{RIS}^{NOMA} \geq \frac{(\sqrt[3]{2^{\Gamma_2}(2^{\Gamma_1}-1)} + \sqrt[3]{2^{\Gamma_1}-1})^3}{\beta_{BR} N^2} \sigma^2. \quad (5)$$

수치해석적 탐색을 거쳐 θ_1 과 θ_2 를 선형결합하여 위상변화를 구하는 linear approximation (LA) 역시 기존 방식 중의 하나이다⁵⁾.

2.2.3 Time Sharing (TS) 및 문제 정의

TS에서, θ_{TS} 는 각 사용자별 time slot에 따라 $\theta_1^* \rightarrow \dots \theta_k^* \rightarrow \dots \theta_{K'}^*$ 로 가변시키는 방법으로 설계 가능하다. 이때 각 사용자별 time slot 비율 τ_k 에 대해 TS에서의 송신전력 Q_{RIS}^{TS} 는 다음과 같다²⁾:

$$Q_{RIS}^{TS} = \sum P_k^{TS} \geq \sum_{k=1}^2 \tau_k (2^{\Gamma_k/\tau_k} - 1) \frac{\sigma^2}{\lambda_k}. \quad (6)$$

본 논문에서는 위 식의 analytic한 해를 구하여 NOMA 및 DF와 수식적으로 RIS가 성능 이득을 가질수 있도록 설계하고자 한다.

2.3 DF 중계기 환경 송신전력 모델링

DF 중계기를 RIS와 함께 위치시키기 때문에, RIS의 채널이득을 그대로 활용할 수 있고, DF의 단일 사용자 spectral efficiency Γ_k 는 다음과 같다⁴⁾:

$$\Gamma_k \leq \frac{1}{2} \log_2 \left(1 + \frac{2P_k^{DF} \beta_{RU,k} \beta_{BR}}{(\beta_{BR} + \beta_{RU,k} - \beta_{BU,k})} \right). \quad (7)$$

DF 릴레이의 다중접속 방법으로 (6)과 마찬가지로 TS를 적용하였을때의 송신전력은 다음과 같다:

$$Q_{DF}^{TS} = \sum P_k^{DF},$$

$$P_k^{DF} \geq \tau_k (2^{2\Gamma_k/\tau_k} - 1) \frac{\beta_{BR} + \beta_{RU,k} - \beta_{BU,k}}{2\beta_{RU,k} \beta_{BR}}. \quad (8)$$

III. 다중접속 성능분석

정리1. DF에 TS적용한 시스템에 대해, 송신전력을 최소화 하는 τ_k^* , 그리고 그때의 총 송신전력 (Q_{DF}^{TS})^{*}는 다음과 같다:

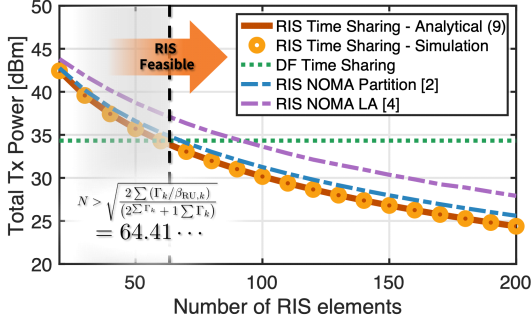


그림 2. 시뮬레이션 결과
Fig. 2. Simulation result

$$\tau_k^* = \frac{\Gamma_k}{\sum \Gamma_k}, \quad (Q_{DF}^{TS})^* = \frac{2^{2\sum \Gamma_k} - 1}{2\beta_{BR}}. \quad (9)$$

증명. $\frac{\partial^2}{\partial \tau_k^2} P^{DF_k} > 0$ 이기 때문에, $Q_{DF}^{TS} = \sum P_k^{DF}$ 는 τ_k 에 대해 convex하다. 이때 여러 채널 이득 중 가장 큰 것은 $\beta_{RU,k}$ 이고, (8)을 근사하면 다음과 같다:

$$\frac{\beta_{BR} + \beta_{RU,k} - \beta_{BU,k}}{2\beta_{RU,k}\beta_{BR}} \approx \frac{\beta_{RU,k}}{2\beta_{RU,k}\beta_{BR}} = \frac{1}{2\beta_{BR}}. \quad (10)$$

위 (10)을 (8)에 대입하고, $\sum \tau_k = 1$ 을 constraint으로, Lagrangian μ 를 두고 최적화 문제를 다음과 같이 해결할 수 있다:

$$L(\mu, \{\tau_k\}) = \sum \frac{\tau_k (2^{2\Gamma_k/\tau_k} - 1)}{2\beta_{BR}} + \mu (\sum \tau_k - 1),$$

$$\frac{\partial L(\mu, \{\tau_k\})}{\partial \tau_k} = \frac{1}{2\beta_{BR}} \left(\frac{\Gamma_k \ln(2) 2^{2\Gamma_k/\tau_k + 1}}{\tau_k} \right) + \mu. \quad (11)$$

이때 Lagrangian의 편미분이 0이 되어야 하므로, 다음과 같이 μ 가 모든 k 에 대해 같아야 한다:

$$\mu = -\frac{1}{2\beta_{BR}} \left(\frac{\Gamma_k \ln(2) 2^{2\Gamma_k/\tau_k + 1}}{\tau_k} \right). \quad (12)$$

이때 $\tau_k = \Gamma_k / \sum \Gamma_k$ 를 대입하면 k 에 상관없이 모두 같은 μ 를 얻어 Lagrangian을 해결할 수 있고, 그 결과를 (6)에 대입하면 $(Q_{DF}^{TS})^*$ 를 얻을 수 있다.

정리 2. TS에서의 성능을 비교하였을 때, RIS가 DF보다 송신전력 측면에서 더 좋은 성능을 낼 수 있는 조건은 RIS 소자의 개수에 대해 다음과 같이 주어질 수 있다:

$$N > \sqrt{\frac{2\sum (\Gamma_k / \beta_{RU,k})}{(2^{\sum \Gamma_k} + 1) \sum \Gamma_k}}. \quad (13)$$

증명. 정리1.의 (10)을 (3)에 대입하면 $(Q_{RIS}^{TS})^*$ 를, (8)에 대입하면 $(Q_{DF}^{TS})^*$ 를 얻을 수 있다. RIS가 더 적은 전력을 송신하는 $(Q_{RIS}^{TS})^* < (Q_{DF}^{TS})^*$ 를 N 에 대해 정리하면 위와 같은 결과를 얻을 수 있다.

IV. 시뮬레이션 결과

RIS 다중접속 성능을 analytic하게 구한 것을 시뮬레이션을 통해 검증하였다. 기지국과 RIS간의 거리는 50m이고, RIS에서부터 사용자 $K=2$ 명까지의 거리는 각각 5m, 10m이다. DF중계기는 RIS와 함께 위치하였다. 중심 주파수는 3.5GHz, 대역폭은 100MHz이다. LOS의 path-loss exponent (PLE)는 2.6, NLOS의 PLE는 5.0으로 설정하였다. 두 사용자는 모두 4bits/s/Hz의 전송용량을 요하고 있다. RIS와 DF 각각에 TS를 적용하고, 기존 RIS-NOMA 기술인 closed-form partition^[2]과 LA^[5] 역시 함께 비교하였다.

시뮬레이션 결과, 정리1.의 analytic한 time slot 분배가 수치해석적 최적의 방법과 성능이 일치하는 것을 확인할 수 있었다. 또한, 정리2.와 같이, 시뮬레이션으로도 65개 이상의 RIS 소자가 있어야 DF보다 성능이 뛰어난 것을 확인할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 5G 이후의 고주파수의 경로감쇠를 보상할 수 있는 기술인 RIS의 성능을 다중 접속 환경에서 수식적으로 분석하였다. 이를 통해 다중 접속 환경에서 RIS의 설계 방법을 제시하였다.

References

[1] Y. Wang, et al., "5G mobile: spectrum broadening to higher-frequency bands to support high data rates," *IEEE Veh. Tech. Mag.*, vol. 9, no. 3, pp. 39-46, Sep. 2014.

- (<https://doi.org/10.1109/MVT.2014.2333694>)
- [2] Y. Kim, et al., "Partition-based RIS-assisted multiple access: NOMA decoding order perspective," *IEEE Trans. Veh. Tech.*, vol. 71, no. 8, pp. 9083-9088, Aug. 2022.
(<https://doi.org/10.1109/TVT.2022.3176017>)
- [3] H.-B. Jeon and C.-B. Chae, "Energy-efficient RIS-assisted aerial backhaul system," *J. KICS*, vol. 46 no. 5, pp. 788-796, May 2021.
(<https://doi.org/10.7840/kics.2021.46.5.788>)
- [4] E. Björnson, et al., "Intelligent reflecting surface versus decode-and-forward: How large surfaces are needed to beat relaying?," *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, vol. 9, no. 2, pp. 244- 248, Feb. 2020.
(<https://doi.org/10.1109/LWC.2019.2950624>)
- [5] B. Zheng, et al., "Intelligent reflecting surface-assisted multiple access with user pairing: NOMA or OMA?," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 24, no. 4, pp. 753-757, Apr. 2020.
(<https://doi.org/10.1109/LCOMM.2020.2969870>)