

RIS를 활용한 무선 통신 시스템에서 능동 반사 소자를 활성화하는 기법에 관한 연구

A study on scheme for activating active elements in RIS aided wireless communication system

배진수¹, 유승근², 송형규^{2*}

Jinsoo Bae, Seung-Geun Yoo^{*}, Hyoung-Kyu Song^{*★}

Abstract

In this paper, the scheme to activate the active elements of reconfigurable intelligent surface(RIS) is proposed. Recently, RIS has been studied as a technology that improves communication coverage and spectral efficiency in wireless communication system. RIS can adjust the phase and amplitude of the received signal, and can ensure better communication performance in areas with many obstacles, such as urban areas. However, due to RIS, the signal undergoes fading twice and performance decrease in communication. Recently, RIS using active reflection elements has been studied to solve these problems. However, if the entire RIS is used as an active reflection element, energy consumption increases. Accordingly, in this paper, we propose a system that utilizes some of the RIS reflective elements as active reflective elements and a scheme for selecting active reflective elements to be activated.

요약

본 논문에서는 reconfigurable intelligent surface(RIS)의 능동소자를 활성화하는 기법을 제안한다. 최근 RIS는 무선 통신 시스템에서 통신 커버리지와 주파수 효율을 향상시키는 기술로 주목받고 있다. RIS는 수신받는 신호의 위상과 진폭을 조절할 수 있는 기술로 도심과 같이 장애물이 많은 지역에 활용하면 더 좋은 통신 성능을 보장할 수 있다. 하지만 RIS에 의해 신호는 두 번의 페이딩을 겪게 되고 이에 따라 통신 성능의 저하가 발생한다. 최근 이러한 문제를 해결하기 위해 능동 반사 소자를 활용한 RIS가 연구되고 있다. 하지만 RIS 전체를 능동 반사 소자로 활용하게 되면 에너지 소비량이 증가하게 된다. 이에 본 논문에서는 RIS 반사 소자 중 일부만 능동 반사 소자로 활용하는 시스템을 제안하고 활성화되는 능동 반사 소자를 선택하는 기법에 대해 제안한다.

Key words : 5G, RIS, active RIS, energy efficiency, SVD

1 Department of Electrical Engineering, Sejong University, 209 Neungdong-ro, Seoul, 05006, Korea

2 Department of Information and Communication Engineering & Convergence Engineering for Intelligent Drone, Sejong University, 209 Neungdong-ro, Seoul, 05006, Korea

★ Corresponding author

E-mail : baej@sejong.ac.kr, dbtmdrms96@naver.com, songhk@sejong.ac.kr, Tel : +82-2-3408-3735,3736

※ Acknowledgment

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea(NRF) funded by the Ministry of Education(2020R1A6A1A03038540), the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (No. NRF-2021R1A2C2005777) and Institute of Information & communications Technology Planning & Evaluation (IITP) under the metaverse support program to nurture the best talents (IITP-2023-RS-2023-00254529) grant funded by the Korea government(MSIT)

Manuscript received Oct. 23, 2023; revised Oct. 27, 2023; accepted Nov. 1, 2023

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

I. 서론

Reconfigurable intelligent surface(RIS)는 무선 통신 시스템에서 통신 커버리지와 주파수 효율을 향상시키는 기술로서 통신 커버리지가 작아지는 5G에서 주목받고 있는 기술이다[1], [2]. 기존의 RIS는 신호의 위상과 진폭을 조절할 수 있는 수동 반사 소자들이 포함된 하나의 평면으로 구성되어있다. RIS를 활용한 무선 통신 시스템은 도심 지역과 같이 장애물이 많은 지역에서 새로운 통신 채널을 형성함으로써 통신 성능이 향상되게 시킬 수 있다. 하지만 RIS를 활용한 무선 통신 시스템은 새로 형성된 채널로 인해 두 번의 페이딩을 겪게 되기에 따라 통신 성능의 저하가 발생한다.

본 논문에서는 이러한 성능 저하를 극복하기 위해 RIS에 능동 반사 소자를 활용하는 무선 통신 시스템을 제안한다. 그림 1은 수동 반사 소자와 능동 반사 소자를 비교하고 있다. 수동 반사 소자는 신호의 위상만 변화시키므로 위상 변화기만 있으면 되지만 능동 반사 소자는 위상 뿐만 아니라 진폭의 변화도 필요하므로 증폭기 또한 필요하다[3]. RIS의 능동 반사 소자의 에너지 소비량은 6~20mW[4]로 수동 반사 소자의 에너지 소비량인 5mW[5]에 비해 높으므로 RIS의 소자 전체를 능동 반사 소자로 활용하는 것은 에너지 효율 측면에서 손실이 발생한다. 따라서 RIS의 소자 중 일부만 능동 반사 소자로 활용하는 것이 중요하다. 위와 같은 이유에서 본 논문에서는 일부의 능동 반사 소자가 활성화된 RIS가 활용되는 무선 통신 시스템을 제안한다.

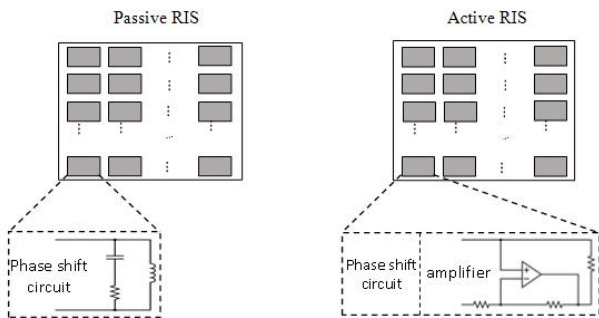


Fig. 1. Comparison of passive and active reflective element.
그림 1. 수동 반사 소자와 능동 반사 소자 비교

본 논문은 2장에서 일부의 능동 반사 소자가 활성화된 RIS가 활용되는 무선 통신 시스템을 설명하고, 3장에서 RIS의 능동 반사 소자를 활성화하는 방법에 관해 소개한다. 4장에서는 논문에서 제안한 시스템을 시뮬레이션한

결과를 분석하고 5장에서 결론을 맺는다.

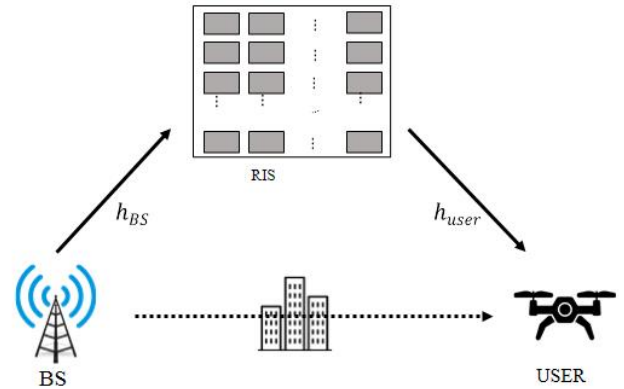


Fig. 2. MISO communication system aided by RIS.
그림 2. RIS의 도움을 받는 다중 입력 단일 출력 통신 시스템

II. 시스템 모델

본 장에서는 시스템 모델을 설명한다. 그림 2는 기지국과 사용자의 링크는 건물과 같은 장애물에 의해 방해받는 상황에서 RIS의 도움을 받는 무선 통신 시스템을 나타낸다. 기지국의 안테나 개수, 사용자의 수는 M 과 U 이고, RIS의 반사 소자 수는 N 으로 가정하였다. $h_{BS} \in \mathbb{C}^{N \times M}$ 와 $h_{user} \in \mathbb{C}^{U \times N}$ 는 기지국과 RIS 사이의 채널과 RIS와 사용자 사이의 채널을 의미한다. RIS의 반사 소자의 계수는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta = [\theta_1, \dots, \theta_N] = [\beta_1 e^{j\phi_1}, \dots, \beta_N e^{j\phi_N}] \in \mathbb{C}^{N \times 1} \quad (1)$$

$\beta_n \in [0, 1], \phi_n = [0, 2\pi)$ 는 각각 RIS 수동 반사 소자의 신호 크기와 위상을 나타낸다.

사용자가 수신한 신호는 식 (2)와 같다.

$$y = h_{user} \Theta h_{BS} x + n \in \mathbb{C}^{U \times M} \quad (2)$$

$\Theta = \text{diag}(\theta) \in \mathbb{C}^{N \times N}, n \in \mathbb{C}^{U \times M}$ 은 각각 RIS 반사 소자의 대각 행렬, AWGN을 의미하고 x 는 zero-forcing 프리코딩된 송신 신호이다. 식 (2)에서 θ 는 대각 행렬이기 때문에 식 (3)과 같이 전체 채널을 나타낼 수 있다.

$$h_{user} \Theta h_{BS} = \theta \text{diag}(h_{user}) h_{BS} \quad (3)$$

$\text{diag}(h_{user}) h_{BS}$ 을 특이값 분해하여 얻은 우측 특이 벡터를 활용하여 RIS 반사 소자의 위상을 식 (4)와 같이 구할 수 있다.

$$\theta = \exp(j \angle V) \quad (4)$$

해당 시스템의 유저별 신호대 간섭, 잡음 비(SINR)는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma_u = \frac{\|h_{eff,u}w_u\|^2}{\sum_{i=1, i \neq u}^U \|h_{eff,u}w_i\|^2 + \|h_{user,u}\Theta\|^2\sigma_a^2 + \sigma^2} \quad (5)$$

$h_{eff,u}$ 와 w_u 는 $h_{user,u}\Theta h_{BS}$ 와 $h_{eff,u}(h_{eff,u}h_{eff,u}^H)^{-1}$ 을 의미한다. w_u 는 zero-forcing(ZF) 빔포밍 행렬이고 빔포밍 행렬은 w_{factor} 로 정규화되어야 한다.

III. 제안하는 기법

본 논문에서는 RIS 반사 소자 중 능동 반사 소자를 활성화하는 방법에 대해 제안한다. 식 (3)을 통해 얻은 채널을 H_{eff} 로 사용하여 공분산의 합 행렬을 구하고 이를 특이값 분해를 하면 식 (6)과 같다.

$$T = svd\left(\sum_{n=1}^N H_{eff}(H_{eff})^H\right) = U\Sigma V^H \quad (6)$$

여기서 구한 특이값 Σ 는 채널의 상태를 나타내기 때문에 이것을 활용하여 활성화되는 능동 반사 소자를 선택할 수 있다.

만약 특이값 Σ 이 임계값 보다 작다면 반사 소자에 해당하는 채널 상황이 좋지 않다는 것을 의미하기 때문에 능동 반사 소자가 활성화한다. 반면, 특이값 Σ 이 임계값 보다 크거나 같다면 채널 상황이 좋다는 것을 의미하기 때문에 능동 반사 소자가 활성화되지 않고 그대로 수동 반사 소자가 사용된다. 이것은 알고리즘 1과 같고 이를 통해 능동 반사 소자 활성화 행렬 m 을 구할 수 있다.

Algorithm 1. Scheme to activate active elements.

알고리즘 1. 능동 반사 소자를 활성화하는 기법

for $n = 1 : N$
if $\Sigma < threshold$
$m_n = \eta$
elif $\Sigma \geq threshold$
$m_n = 1$
end if
end for

능동 반사 소자 활성화 행렬을 활용하여 RIS 반사 소자의 행렬 Θ 를 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Theta = diag(m \exp(j\angle V)) \quad (7)$$

IV. 시뮬레이션 결과

본 논문은 Multiuser-Multi input single output (MU-MISO)통신 시스템을 고려한다. 시스템과 관련된 각종 파라미터는 표 1과 같다.

Table 1. System parameters.

표 1. 시스템 파라미터

Parameters	Value
number of antennas(M)	64
number of user(U)	6
number of RIS elements($\sqrt{N} \times \sqrt{N}$)	8×8
transmit power	0 : 5 : 30dBm

모든 채널은 소규모 페이딩과 대규모 페이딩을 겪는다. 대규모 페이딩은 $PL(d_x) = c(d_x/d_0)^{-n}$ 와 같이 거리에 따른 경로 손실 모델을 따르고 c, d_x 와 n 은 기준 거리 d_0 에 따른 경로 손실 지수, 각 노드의 거리와 경로 손실 지수를 나타낸다. 모든 채널은 line-of-sight(LoS) 경로를 지니기 때문에 소규모 페이딩은 식 (8)과 같은 라이시안 페이딩을 따른다.

$$H = \sqrt{PL(d_x)} \left(\sqrt{\frac{K}{1+K}} H_{LoS} + \sqrt{\frac{K}{1+K}} H_{NLoS} \right) \quad (8)$$

여기서 K, H_{LoS} 와 H_{NLoS} 는 라이시안 팩터, LoS 채널과 비 LoS 채널을 의미한다. H_{NLoS} 는 평균이 0이고 분산이 1인 Rayleigh 분포를 따른다. 채널과 관련된 파라미터는 표 2와 같다.

Table 2. Channel parameters.

표 2. 채널 파라미터

Parameters	Value
c	-30dBm
path-loss exponent for H_{user}, H_{BS}	2.2
noise power(σ^2)	-80dBm
noise power of amplifier(σ_a^2)	-76dBm
amplifier exponent(η)	2
Rician factor(K)	10
threshold	2

그림 3은 기존 RIS 시스템과 본 논문에서 제안한 RIS 시스템을 sumrate 성능 관점에서 비교하였다. sumrate R 은 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R = \sum_{u=1}^U \log_2(1 + \gamma_u) \quad (9)$$

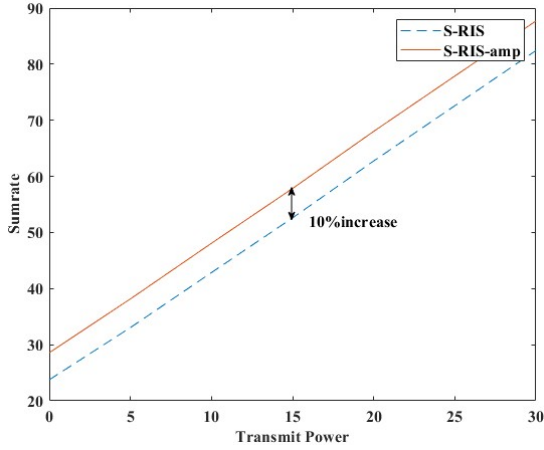


Fig. 3. Comparison of sumrate between conventional RIS system and proposed RIS system.
 그림 3. 기존의 RIS 시스템과 제안된 RIS 시스템의 sumrate 성능 비교

S-RIS는 기존의 RIS 시스템을 나타내고 S-RIS-amp는 본 논문에서 제안한 RIS 시스템을 나타낸다. 본 논문에서 제안하는 기법의 sumrate 성능이 기존의 RIS 시스템의 sumrate 성능에 비해 전송 전력 15dBm 기준으로 대략 10% 상승한 것을 확인할 수 있었다.

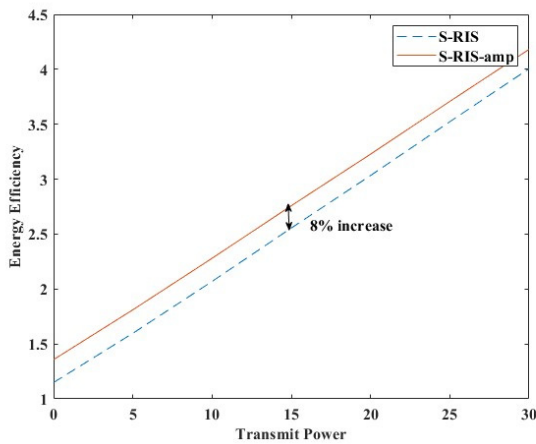


Fig. 4. Comparison of energy efficiency between conventional RIS system and proposed RIS system.
 그림 4. 기존의 RIS 시스템과 제안된 RIS 시스템의 에너지 효율 비교

그림 4는 기존 RIS 시스템과 본 논문에서 제안한 RIS 시스템을 에너지 효율 관점에서 비교하였다. 에너지 소비량은 빔포머의 에너지 소비량, 기지국 안테나의 에너지 소비량, RIS 반사 소자의 에너지 소비량과 능동 반사

소자의 에너지 소비량의 합으로 나타내고 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{total} = \frac{1}{\tau} \sum_{u=1}^U \|w_u\|^2 + MP_{BS} + NP_{ele} + \frac{1}{\tau} P_A \quad (10)$$

각 소비량에 해당하는 전력은 표 3과 같다. τ 는 증폭기 효율[6]이고 P_A 는 능동 반사 소자의 전력[7]으로 아래 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_A = \sum_{u=1}^U \|\Theta H_{BS} w_u\|^2 + \sigma_a^2 \|\Theta\|^2 \quad (11)$$

Table 3. Power parameters.

표 3. 전력 파라미터

Parameters	Value
τ	0.45
P_{BS}	200mW
P_{ele}	2mW

따라서 에너지 효율은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$E = \frac{R}{P_{total}} \quad (12)$$

그림 4를 보면 전송 전력 15dBm 기준에서 본 논문이 제안한 기법의 에너지 효율이 기존 기법 대비 대략 8% 상승하는 것을 확인할 수 있다. 그림 3과 그림 4를 종합적으로 보면, 제안된 기법이 기존의 기법에 비해 sumrate 성능 측면에서도 높은 성능을 가지고 있고 에너지 효율 측면에서도 높으므로 에너지 효율이 중요해지는 미래에 갈수록 더욱 중요한 기법이 될 것으로 보인다.

V. 결론

본 논문에서는 능동 반사 소자가 포함된 RIS를 활용한 무선 통신 시스템에서 RIS의 능동 반사 소자를 활성화하는 기법을 제안하였다. 제안된 기법은 특이값을 활용해 RIS 반사 요소에 해당하는 채널의 상황을 파악하고 이를 통해 능동 반사 소자를 활성화하는 기법이다. 시뮬레이션 결과, 능동 반사 소자가 활용된 RIS 기반의 시스템이 활용하지 않은 시스템에 비해 더 좋은 sumrate 성능을 가지고 에너지 효율 측면에서도 더 좋은 성능을 가지고 있다. 따라서 제안된 기법이 에너지 효율이 중요해지는 앞으로 더욱 주목받을 것으로 여겨진다.

References

- [1] L. Yang, Y. Yang, M. O. Hasna and M. -S. Alouini, "Coverage, Probability of SNR Gain, and DOR Analysis of RIS-Aided Communication Systems," in *IEEE Wireless Communications Letters*, vol.9, no.8, pp.1268-1272, Aug. 2020. DOI: 10.1109/LWC.2020.2987798.
- [2] M. Di Renzo et al., "Smart Radio Environments Empowered by Reconfigurable Intelligent Surfaces: How It Works, State of Research, and The Road Ahead," in *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol.38, no.11, pp.2450-2525, 2020. DOI: 10.1109/JSAC.2020.3007211.
- [3] Z. Zhang et al., "Active RIS vs. Passive RIS: Which Will Prevail in 6G?," in *IEEE Transactions on Communications*, vol.71, no.3, pp.1707-1725, 2023. DOI: 10.1109/TCOMM.2022.3231893.
- [4] N. Landsberg and E. Socher, "A Low-Power 28-nm CMOS FD-SOI Reflection Amplifier for an Active F-Band Reflectarray," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol.65, no.10, pp.3910-3921, Oct 2017. DOI: 10.1109/TMTT.2017.2695181.
- [5] E. Björnson, Ö. Özdogan and E. G. Larsson, "Intelligent Reflecting Surface Versus Decode-and-Forward: How Large Surfaces are Needed to Beat Relaying?," in *IEEE Wireless Communications Letters*, vol.9, no.2, pp.244-248, Feb. 2020. DOI: 10.1109/LWC.2019.2950624.
- [6] A. Sarkar and B. A. Floyd, "A 28-GHz Harmonic-Tuned Power Amplifier in 130-nm SiGe BiCMOS," in *IEEE Transactions on Microwave Theory and Techniques*, vol.65, no.2, pp.522-535, 2017. DOI: 10.1109/TMTT.2016.2636842.
- [7] D. Xu, X. Yu, D. W. Kwan Ng and R. Schober, "Resource Allocation for Active IRS-Assisted Multiuser Communication Systems," *2021 55th Asilomar Conference on Signals, Systems, and Computers, Pacific Grove, USA, 2021*, pp.113-119. DOI: 10.1109/IEEECONF53345.2021.9723093.

BIOGRAPHY

Jinsoo Bae (Member)



1993 : BS degree in Electrical Engineering, KAIST.
1995 : MS degree in Electrical Engineering, KAIST.
1998 : PhD degree in Electrical Engineering, KAIST.

1997 : Visiting Researcher, The University of Tokyo
1998 : Consultant, Accenture
1998~1999 : Researcher, Motorola Japan
1999~2000 : Manager, LGU+
2000~Present : Professor in Electrical Engineering, Sejong University.

Seung-Geun Yoo (Member)



2022 : B.S. degree in Electronic, Information and Communication Engineering Sejong University.
2022~Present : MS degree in the Department of Information and Communication Engineering, and Convergence Engineering for Intelligent Drone.

Hyoung-Kyu Song (Member)



1990 : BS degree in electronic engineering, Yonsei University.
1992 : MS degree in electronic engineering, Yonsei University.
1996 : Ph.D. degree in electronic engineering, Yonsei University.

1996~2000 : Managerial Engineer, Korea Electronics Technology Institute (KETI).
2000~Present : Professor in the Department of Information and Communication Engineering, and Convergence Engineering for Intelligent Drone, Sejong University.