

물리 계층 보안 향상을 위한 RIS 기반 반사행렬 선택 기법

윤 장 혁*, 손 오* , 정 방 철^o

RIS-Based Reflection Matrix Selection Technique for Improving Physical Layer Security

Janghyuk Youn*, Woong Son*,
 Bang Chul Jung^o

요 약

Reconfigurable Intelligent Surface (RIS)는 통신 채널을 유연하게 조절할 수 있는 특징을 갖는 잠재력 있는 기술로 차세대 통신 시스템을 위한 유망기술로 고려되고 있다. 본 논문에서는 다중 도청 단말이 존재할 때, 다수의 의사-무작위 반사 행렬 중 기밀 전송률이 가장 높은 반사 행렬을 선택하여 전송하는 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 RIS가 없거나 무작위적인 반사 행렬을 사용하는 기본 기법과 비교하여 더 높은 기밀 전송률 성능을 달성한다.

Key Words : Reconfigurable intelligent surface, Physical layer security, Secrecy rate, Reflection matrix selection

ABSTRACT

Since reconfigurable intelligent surface (RIS) has the great potential that can design the communication channel as intended, it has been considered as a promising technique for future communication systems. In this paper, we propose a reflection matrix selection technique which selects the best

reflection matrix, which achieves the highest secrecy rate in the downlink cellular network with multiple eavesdroppers. The proposed technique achieves better performance than the conventional techniques where no RIS exists or the RIS utilizes a random reflection matrix.

1. 서 론

Reconfigurable intelligent surface (RIS) 또는 Intelligent reflecting surface (IRS)는 수신되는 신호의 크기를 원하는 대로 줄이거나, 신호의 위상을 원하는 만큼 조절하여 반사함으로써, 통신 채널을 디자인할 수 있다는 잠재력 덕분에 차세대 통신 시스템을 구성할 주요 후보 기술 중 하나이다^[1].

한편, 6세대 이동통신 (6G) 시스템에서는 5세대 이동통신 (5G)보다도 높은 주파수 대역인 테라헤르츠 (THz) 대역이 고려되고 있다. 이러한 초고주파 대역은 다중 경로 (Multi-path)의 수가 현저히 줄어들어 가시선 (Line-of-sight: LOS)가 보장되는 환경에서만 통신이 가능할 것으로 여겨지고 있다. 특히나 이러한 초고주파 통신에 의한 LOS 채널 환경에서 RIS는 기지국과 단말 사이의 통신에 추가적인 다중 경로를 임의로 형성하여, 자유도 (Degrees of freedom, DOF)를 높임으로써 초고주파 대역의 한계를 극복할 수 있을 것으로도 기대되고 있다^[2].

또한, 최근 RIS가 물리 계층 보안 측면에서도 성능 향상을 가져올 수 있다는 결과를 보여주는 연구 결과들 또한 발표되었는데^[3,4], 이들은 대부분 최적화를 기반으로 도청 단말에 미치는 신호 대 간섭 및 잡음비 (Signal-to-interference-plus-noise ratio: SINR)를 최소화하면서 사용자 단말에 미치는 SINR을 최대화하는 기지국 빔포밍과 RIS 반사행렬 해를 찾는 알고리즘을 사용했는데, 실제 시스템에서 이를 적용하기 위해서는 기지국과 RIS 간 지속적으로 정보를 주고받아야 하며, 이는 네트워크에 부담으로 작용할 수 있다.

따라서 본 논문에서는 물리 계층 보안을 위해서 네

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

• First Author : (ORCID:0000-0002-7486-8270) Department of Electronics Engineering, Chungnam National University, jhyoon@o.cnu.ac.kr, 학생(석사과정), 학생회원

o Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-4485-9592) Department of Electronics Engineering, Chungnam National University, bcjung@cnu.ac.kr, 교수, 중신회원

* (ORCID:0000-0001-9332-2102) Department of Electronics Engineering, Chungnam National University, woongson@cnu.ac.kr, 학생(박사과정), 학생회원

논문번호 : 202101-020-A-LU, Received January 22, 2021; Revised February 2, 2021; Accepted February 8, 2021

트위크의 부담이 적은 반사행렬 선택 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 미리 의사-무작위적으로 생성한 RIS의 반사행렬 중 가장 우수한 기밀 전송률을 달성하는 반사행렬을 선택하여, 선택된 반사행렬의 인덱스만을 RIS에게 알려줌으로써 기지국과 RIS 간에 많은 정보 교환 없이 우수한 기밀 전송률 성능을 달성할 수 있다.

II. 시스템 및 채널 모델

그림 1은 본 논문에서 고려하는 시스템 모델을 설명한다. 전체 네트워크는 하나의 기지국과 N 개의 사용자 단말, E 개의 도청 단말, 그리고 K 개의 RIS로 구성되어 있다. 기지국은 M 개의 송신 안테나를 가지고 있고, RIS는 L 개의 수동 반사 소자를, 모든 사용자 단말과 도청 단말은 하나의 수신 안테나를 가지고 있다. 이때, RIS의 각 수동 반사 소자는 회로의 임피던스를 조절하여 수신된 신호를 반사시킴으로써, 반사된 신호를 원하는 크기로 줄이고 원하는 위상만큼 지연시키는 기능을 수행한다.

또한, 모든 사용자 단말과 도청 단말은 기지국과의 직접 통신 채널과 RIS를 통한 반사 채널을 통해 기지국으로부터 신호를 수신한다. 기지국과 n 번째 사용자 단말, 기지국과 e 번째 도청 단말, 기지국과 k 번째 RIS, k 번째 RIS와 n 번째 사용자 단말, 마지막으로 k 번째 RIS와 e 번째 도청 단말 사이의 채널은 순서대로 각각 $\mathbf{h}_{BU}^{[n]}$, $\mathbf{h}_{BE}^{[e]}$, $\mathbf{H}_{BI}^{[k]}$, $\mathbf{h}_{IU}^{[k,n]}$, 그리고 $\mathbf{h}_{IE}^{[k,e]}$ 로 정의된다. 여기서 모든 채널은 차세대 통신 시스템의 높은 주파수, 예를 들어 mmWave 및 terahertz 대역을

사용하여 통신하기 때문에 LOS 성분만 존재한다고 가정한다.

III. 반사행렬 선택 기법

제안하는 반사행렬 선택 기법에서는 모든 RIS가 각각 T 개의 반사 행렬을 사전에 정의된 생성 방식에 의해 의사-무작위적으로 생성한다. 이때, k 번째 RIS의 t 번째 반사행렬은 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{G}_k^{[t]} = \begin{bmatrix} e^{j\theta_{k,1}^{[t]}} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & e^{j\theta_{k,2}^{[t]}} & \dots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & e^{j\theta_{k,L}^{[t]}} \end{bmatrix}, \quad (1)$$

여기서 $\theta_{k,l}^{[t]}$ 는 k 번째 RIS의 t 번째 반사행렬 중 l 번째 반사소자가 수신된 신호를 반사시킬 때 지연되는 위상값을 의미한다. 2장에서 언급했듯, RIS의 반사 소자는 반사된 신호의 크기도 줄일 수 있으나 무작위로 반사행렬을 만드는 제안하는 기법의 특성상, 크기를 줄이는 것이 성능에 악영향을 미칠 수 있어 위상만을 조절하도록 설정하였다.

최종적으로 반사행렬을 선택하기에 앞서, 먼저 각 t 번째 반사행렬마다 다음 선택 기준에 따라 신호를 전송할 사용자 단말을 선택한다.

$$n_t = \underset{n}{\operatorname{arg\,max}} \frac{\left\| \mathbf{h}_{BU}^{[n]} + \sum_{k=1}^K \mathbf{h}_{IU}^{[k,n]} \mathbf{G}_k^{[t]} \mathbf{H}_{BI}^{[k]} \right\|^2}{\max_e \left\| \mathbf{h}_{BE}^{[e]} + \sum_{k=1}^K \mathbf{h}_{IE}^{[k,e]} \mathbf{G}_k^{[t]} \mathbf{H}_{BI}^{[k]} \right\|^2}, \quad (2)$$

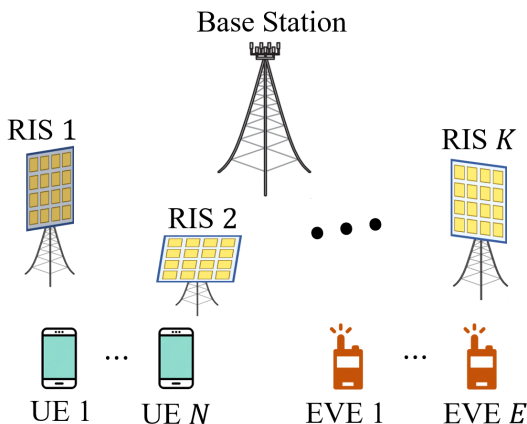


그림 1. 다중 RIS와 도청 단말이 존재하는 통신 시스템 모델
Fig. 1. Communication system model with multiple RISs and eavesdroppers

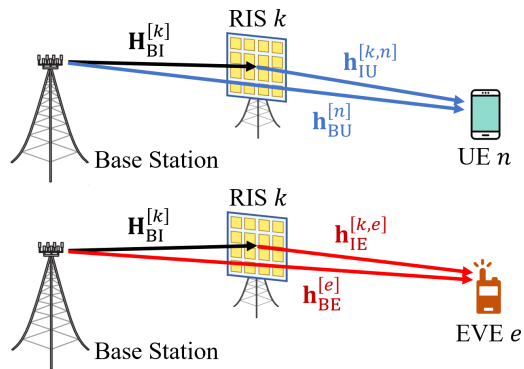


그림 2. 공인 통신 채널과 유출 통신 채널 모델
Fig. 2. Legitimate communication and eavesdropping channel model

이 선택 기준은 가장 유출이 많이 일어나는 도청 단말과의 채널 대비 채널 이득이 가장 큰 사용자 단말을 선택함으로써 기밀 전송률이 높은 사용자를 각 t 번째 반사 행렬에 대해 선택한다.

또한, 제안하는 기법에서 기지국은 각 t 번째 반사 행렬에서 선택된 사용자 단말과의 채널에 대해 기밀 전송률을 최대화할 수 있는 빔포밍을 다음과 같이 수행한다⁴⁾.

$$\mathbf{v}_t = \text{Eig}\left[\left(\mathbf{I}_M + \rho \mathbf{H}_E^{[t]H} \mathbf{H}_E^{[t]}\right)^{-1} \left(\mathbf{I}_M + \rho \mathbf{h}_U^{[n_d]H} \mathbf{h}_U^{[n_d]}\right)\right], \quad (3)$$

이렇게 설계된 송신 빔포밍 벡터는 유출율을 최소화하면서 전송률을 최대화할 수 있는 빔포밍 벡터로, 여기서 $\mathbf{H}_E^{[t]}$ 는 t 번째 반사행렬에 대해 모든 도청 단말과의 유효 채널을 나타내고 다음과 같이 정의된다,

$$\mathbf{H}_E^{[t]} = [\mathbf{h}_E^{[1,t]T} \mathbf{h}_E^{[2,t]T} \dots \mathbf{h}_E^{[E,t]T}]^T. \quad \text{그리고}$$

$$\mathbf{h}_E^{[e,t]} = \mathbf{h}_{BE}^{[e]} + \sum_{k=1}^K \mathbf{h}_{IE}^{[k,e]} \mathbf{G}_k^{[t]} \mathbf{H}_{BI}^{[k]}$$

이다. 또한, $\mathbf{h}_U^{[n_d]}$ 는 t 번째 반사행렬에 대해 선택된 n_d 번째 사용자 단말과의 유효 채널이며, $\mathbf{h}_U^{[n_d]} = \mathbf{h}_{BU}^{[n_d]} + \sum_{k=1}^K \mathbf{h}_{IU}^{[k,n_d]} \mathbf{G}_k^{[t]} \mathbf{H}_{BI}^{[k]}$ 로 정의된다. 여기서 유효채널이란 기지국과 단말 사이의 LOS 채널과 RIS에 의해 반사되어 단말까지 도달하는 모든 채널의 합을 말한다. \mathbf{I}_M 은 $M \times M$ 크기의 단위 행렬을 나타내고, ρ 는 송신 전력 대비 잡음비를 나타낸다. 마지막으로 $\text{Eig}[\cdot]$ 는 입력 행렬의 가장 큰 고유값에 대응하는 고유 벡터를 출력하는 함수로써 정의한다.

마지막으로 반사 행렬을 최종적으로 선택하기 위해 기지국은 각 v 번째 반사행렬에 대해 최종 기밀 전송률을 계산해본 뒤, 가장 우수한 기밀 전송률을 달성하는 반사행렬과 해당 반사행렬을 사용했을 때 선택된 사용자 단말에 대해 신호를 전송한다. 이때, 달성되는 기밀 전송률은 다음과 같이 계산된다.

$$R = \max_t \left[\log_2 \left(1 + \rho \left| \mathbf{h}_U^{[n_d]} \mathbf{v}_t \right|^2 \right) - \max_e \log_2 \left(1 + \rho \left| \mathbf{h}_E^{[e,t]} \mathbf{v}_t \right|^2 \right) \right] \quad (4)$$

IV. 시뮬레이션 결과

본 장에서는 제안하는 반사행렬 선택 기법과 RIS의 반사행렬을 무작위로 선택했을 때, 그리고 RIS 없이 LOS 환경에서만 통신했을 때의 기밀 전송률 성능을 비교한다.

그림 3은 $N=10, E=4, M=4, L=16, T=16$ 일 때, 송신 SNR 대비 기밀 전송률 성능을 나타낸 것이다. 제안하는 반사행렬 선택 기법을 포함하여 모든 기법들이 SNR이 증가함에 따라 특정 값으로 수렴하나, 제안하는 기법이 다른 두 기법보다 훨씬 우수한 성능을 달성하는 것을 확인하였다.

또한, 그림 4는 $N=10, E=4, M=4, L=16, K=8$ 일 때, T 에 따른 기밀 전송률 성능을 그린 것인데, 비교 대상인 두가지 기법들은 모두 반사행렬 후보의 수에 전혀 성능이 영향받지 않지만, 제안하는 기법은 반사행렬의 수에 따라 큰 폭으로 성능 개선이 있는 것을 확인할 수 있다.

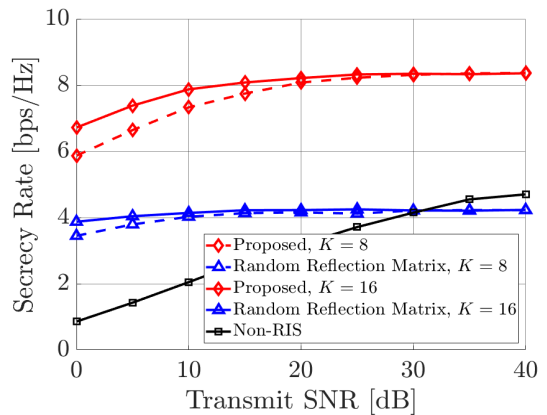


그림 3. 송신 전력 대 잡음비 대비 기밀 전송률 성능
Fig. 3. Secrecy rate performance according to transmit SNR

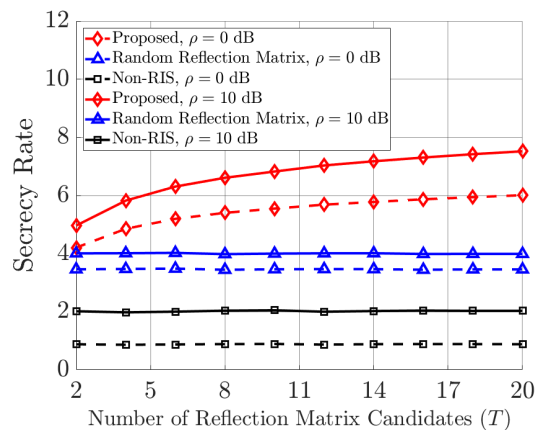


그림 4. 반사행렬 후보 수 대비 기밀 전송률 성능
Fig. 4. Secrecy rate performance according to the number of reflection matrix candidates

V. 결 론

본 논문에서는 차세대 이동통신에서의 물리 계층 보안을 위해서 LOS 채널 환경에서 RIS 기반 반사행렬 선택 기법을 제안했다. 제안하는 기법에서는 다중 RIS들이 각각 여러 개의 반사행렬 후보를 만들고, 각 반사행렬에 대해 가장 기밀 전송률이 높은 사용자 단말을 선택한다. 이후, 최종적인 기밀 전송률이 가장 높은 반사행렬을 선택함으로써 전체 시스템의 기밀 전송률을 높인다. 시뮬레이션 결과를 통해 제안하는 반사행렬 선택 기법이 RIS가 없을 때와 RIS가 무작위적인 반사행렬을 사용할 때보다 높은 기밀 전송률 성능을 달성하는 것을 확인하였다.

References

- [1] C. Huang, et al., “Holographic MIMO surfaces for 6G wireless networks: Opportunities, challenges, and trends,” *IEEE Wireless Commun.*, vol. 27, no. 5, pp. 118-125, Oct. 2020.
- [2] O. Ozdogan, E. Bjornson, and E. G. Larsson, “Using intelligent reflecting surfaces for rank improvement in MIMO communications,” *ICASSP 2020*, pp. 9160-9164, Barcelona, Spain, 2020,
- [3] X. Lu, W. Yang, X. Guan, Q. Wu, and Y. Cai, “Robust and secure beamforming for intelligent reflecting surface aided mmWave MISO systems,” *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 9, no. 12, pp. 2068-2072, Dec. 2020.
- [4] A. Khisti and G. W. Wornell, “Secure transmission with multiple antennas -part II: The MISOME wiretap channel,” *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 56, no. 11, pp. 5515-5532, Nov. 2010.