

RIS기반 물리계층 보안기술 연구 동향

이동훈

공주대학교 정보통신공학과

mmdang@kongju.ac.kr

Research Trends of RIS-based Physical Layer Security

Lee Dong Hun

Div. of Inform. & Commun. Engineering Kongju National University

요 약

물리계층 보안기술은 무선 채널의 임의성을 활용하여 통신 시스템의 보안 성능을 향상시키는 방법으로, 기존의 암호 기반 보안 기술에 대한 대안으로 주목받고 있다. 본 논문은 RIS(Reconfigurable Intelligent Surface)를 이용하여 통신 시스템의 보안 성능을 개선하는 RIS 기반 물리계층 보안 기술의 최신 연구 동향을 분석한다.

I. 서 론

RIS(Reconfigurable Intelligent Surface)는 다수의 수동 반사 소자로 구성된 평면 구조로, 각 소자의 반사 특성을 전자적으로 제어함으로써 무선 신호의 방향, 위상, 진폭 등을 조절할 수 있다. 이러한 특성을 활용한 RIS 기반 물리계층 보안 기술은 무선 통신 환경에서 보안 성능을 향상시키기 위한 효과적인 수단으로 주목받고 있으며, 다양한 통신 기술에 적용되어 활발히 연구되고 있다. 본 논문에서는 RIS를 활용한 대표적인 물리계층 보안 기술로서, 다중 안테나를 통해 신호 에너지를 특정 방향으로 집중시키는 RIS 기반 빔포밍(BeamForming, BF) 기술, 통신과 센싱을 통합하는 RIS 기반 ISAC(Integrated Sensing and Communication) 기술, 여러 사용자가 동일한 시간, 주파수, 공간 자원을 공유하는 비직교 다중접속 방식의 RIS-NOMA(Non-Orthogonal Multiple Access) 기술, 그리고 6G 핵심 기술로 주목받고 있는 인공위성을 중계기로 활용하는 RIS-SC 기술(RIS-Satellite Communication)에 대해 논의한다.

II. 본론

최신 RIS 기반 물리계층 보안 기술로는 RIS-BF 기술 [1] - [3], RIS-ISAC 기술 [4] - [8], RIS-NOMA 기술 [9] - [12], 그리고 RIS-SC 기술 [13][14] 등이 연구되고 있다.

[1] - [3]에서는 직접파가 존재하지 않거나 양방향 릴레이 시스템이 사용되는 등 다양한 시나리오에서 RIS와 빔포밍(BF)을 결합하여 보안 성능 향상을 도모하였다. [1]에서는 RIS를 활용한 빔포밍을 위해 수동 빔포밍 매트릭스와 RIS의 위치를 최적화하는 기법을 제안하였으며, 이를 통해 보안 용량(secretcy rate)을 향상시켰다. 성능 분석 결과, 제안한 전송 기법은 기존 방식 대비 RIS 요소(element) 수와 송신 전력에 비례하여 보안 용량이 개선됨을 확인하였다. [2]에서는 송신기와 수신기 사이에 장애물로 인해 직접파가 존재하지 않는 환경을 가정하고, 송신기의 다중 안테나 기반 송신 빔포밍 매트릭스와 RIS의 양자화된 위상 신호를 최적화하여 보안 용량을 향상시켰다. 성능 분석 결과, 제안 기법은

송신 전력 및 송신 안테나 수에 비례하여 기존 기법보다 우수한 보안 용량을 달성하였다. [3]에서는 두 단말 간의 양방향 릴레이 통신 환경을 고려하여, RIS의 위상 신호와 기지국(base station)의 송신 BF 매트릭스를 최적화하는 방식을 제안하였고, 이를 통해 보안 합용량(secretcy sum rate)을 향상시켰다. 제안 기법은 송신 전력 및 RIS 요소 수가 증가함에 따라 기존 기법 대비 보안 합용량이 유의미하게 개선됨을 입증하였다.

[4] - [8]에서는 송신기는 다중 안테나, 수신기는 단일 안테나를 사용하는 MISO (multiple-input single-output) 기반 ISAC 시스템에서, RIS를 결합하여 보안 성능을 향상시키는 다양한 연구가 수행되었다. [4]는 능동 RIS(active RIS)를 활용하여 레이더의 수신 빔포밍 매트릭스, RIS의 진폭 및 위상 신호, 송신기의 송신 빔포밍 매트릭스를 최적화함으로써 보안 용량(secretcy rate)을 향상시키는 방안을 제안하였다. 성능 분석 결과, 송신 전력 및 RIS 요소 수에 비례하여 보안 용량이 향상됨을 확인하였다. [5]에서는 비직교 다중접속(NOMA) 기반 ISAC 시스템의 보안 용량을 개선하기 위해 송신 빔포밍 매트릭스와 RIS 위상 신호의 최적화 기법을 제안하였으며, 송신 안테나 수 및 RIS 요소 수 증가에 따라 보안 용량이 개선됨을 성능 분석을 통해 입증하였다. [6]에서는 직접파가 존재하지 않는 환경에서 ISAC과 RIS를 결합한 RIS-ISAC 시스템을 고려하여, 송신 빔포밍 매트릭스와 RIS 위상 신호를 최적화함으로써 최소 빔포밍 이득을 극대화하는 방법을 제안하였다. 성능 분석 결과, 연산 반복 횟수 및 RIS 요소 수에 비례하여 최소 빔포밍 이득이 개선됨을 보였다. [7]은 직접파와 RIS를 활용한 간접파가 공존하는 RIS-ISAC 시스템을 기반으로, 송신 빔포밍 매트릭스와 RIS 위상 신호의 최적화를 통해 보안 용량을 향상시키는 방안을 제시하였다. 성능 분석 결과, RIS 요소 수 및 송신 전력 증가에 따라 보안 용량이 개선됨을 확인하였다. [8]에서는 센싱 채널이 직접파 없이 오직 RIS를 통한 간접파만 존재하는 환경을 가정하고, 송신 빔포밍 매트릭스와 RIS의 진폭 및 위상 신호를 최적화하여 RIS-ISAC 시스템의 보안 용량을 개선하는 기법을 제안하였다. 성능 분석 결과, 송신 전력 및 RIS 요소 수에 비례하여 보안 용량이 향상됨을 확인하였다.

[9] - [12]에서는 시간, 주파수, 공간 자원을 여러 사용자 간에 공유하는

비직교 다중접속(NOMA) 방식과 RIS를 결합하여 보안 성능을 향상시키는 다양한 연구가 수행되었다. [9]은 능동 도청기가 존재하는 환경을 가정하여, 송신 빔포밍 매트릭스와 RIS 위상 신호를 최적화함으로써 보안 합용량(secret sum rate)을 개선하는 기법을 제안하였다. 성능 분석 결과, RIS 요소 수 및 송신 안테나 수 증가에 따라 보안 합용량이 향상됨을 확인하였다. [10]에서는 RIS-NOMA 기반 은닉 통신(covert communication) 환경에서 사용자 간 RS(rate splitting) 기법을 적용하여 보안 성능 지표인 보안 중지 확률(secret outage probability)을 분석하였다. 성능 분석 결과, 송신 전력 증가에 따라 보안 중지 확률이 감소하며, RIS 요소 수가 증가할수록 오히려 보안 중지 확률이 열화되는 경향을 보였다. [11]는 하드웨어 불안정성으로 인해 사용자 간 간섭 신호가 완전히 제거되지 않는 환경과 능동 도청기가 존재하는 상황을 고려하여, 송신 빔포밍 매트릭스 및 RIS 위상 신호의 최적화를 통해 보안합용량을 향상시키는 기법을 제안하였다. [12]에서는 NOMA 기반 차량 간 통신(V2V)을 위한 시나리오에서 송신기 및 수신기 주변에 RIS를 도입하여 보안 성능을 개선하는 방안을 제시하였다. 성능 분석 결과, 송신 전력 및 RIS 요소 수 증가에 따라 보안 용량 및 보안 중지 확률이 모두 개선됨을 보였다.

[13][14]에서는 위성 통신에 RIS를 결합하여 보안 용량을 향상시키는 RIS-SC 연구가 수행되었다. [13]은 위성 및 지상국에 각각 RIS를 도입한 환경에서, 송신 빔포밍 매트릭스와 RIS 위상 신호를 최적화함으로써 업링크 보안 용량을 개선하는 기법을 제안하였다. 성능 분석 결과, 송신 전력 및 송신 안테나 수의 증가에 따라 보안 용량이 향상됨을 확인하였다. [14]에서는 지상에 hybrid RIS를 도입하고, 딥러닝 기반 최적화 기법을 적용하여 송신 빔포밍 매트릭스 및 RIS 위상 신호를 효율적으로 조정함으로써 다운링크 보안 용량을 향상시키는 방안을 제안하였다. 성능 분석 결과, 송신 전력 및 RIS 요소 수에 비례하여 보안 합용량이 개선됨을 보였다.

III. 결론

본 논문에서는 RIS 기반 물리계층 보안 기술의 연구 동향을 분석하였다. 분석 결과, BF, ISAC, NOMA, SC 등 다양한 통신 시나리오에서 RIS를 활용하여 보안 용량, 보안 합용량, 보안 중지 확률 등 물리계층 관점의 주요 보안 성능을 향상시키기 위한 연구가 활발히 진행되고 있음을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] Guo, H., Yang Z., Zou Y., Lyu B., Jiang Y., and Hanzo L., "Joint reconfigurable intelligent surface location and passive beamforming optimization for maximizing the secrecy rate," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 72, no. 2, pp. 2098-2110, Feb. 2023.
- [2] Tuan H., Nasir A., Chen Y., Dukiewicz E., and Poor H., "Quantized RIS-aided multi-user secure beamforming against multiple eavesdroppers," *IEEE Trans. Inf. Forensics Security*, vol. 18, pp. 4695-4706, 2023.
- [3] Zhang Y., Zhao S., Shen Y., Jiang X., and Shiratori N., "Enhancing the physical layer security of two-way relay systems with RIS and beamforming," *IEEE Trans. Inf. Forensics Security*, vol. 19, pp. 5696-5711, 2024.
- [4] Salem A., Ismail M., and Ibrahim A., "Active reconfigurable intelligent surface-assisted MISO integrated sensing and communication systems for secure Operation," *IEEE Trans. Veh. Tech.*, vol. 72, no. 4, pp. 4919-4931, Apr. 2023.
- [5] Jiang C., Zhang C., Huang C., Ge J., Debbah M., and Yuen C., "Exploiting RIS in secure beamforming design for NOMA-assisted integrated sensing and communication," *IEEE Internet of Things J.*, vol. 11, no. 17 pp. 28123-28136, Sep. 2024.
- [6] Ye J., Dai J., Pan C., Wang K., and Li J., "Joint active and passive beamforming design for secure RIS-aided ISAC system," *IEEE Wireless Comm. Lett.*, vol. 14, no. 3, pp. 916-920, Mar. 2025.
- [7] Zheng T., Chen X., Lan L., Ju Y., Hu X., Liu R., Ng D. and Cui T., "Reconfigurable intelligent surface-aided secure integrated radar and communication systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 24, no. 3, pp. 1934-1948, Mar. 2025.
- [8] Zhang Y., Ren H., Pan C., Wang B., Yu Z., Weng R. and Wu T., "Secure wireless communication in active RIS-assisted DFRC systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 74, no. 1 pp. 626-640, Jan. 2025.
- [9] Chai L., Bai L., Bai T., Shi J., and Nallanathan A., "Secure RIS-aided MISO-NOMA system design in the presence of active eavesdropping," *IEEE Internet of Things J.*, vol. 10, no. 22 pp. 19479-19494, Nov. 2023.
- [10] Yang L., Zhang W., Bithas P., Liu H., Hasna M., Tsiftsis A., and Ng D., "Covert transmission and secrecy analysis of RS-RIS-NOMA-aided 6G wireless communication systems," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 72, no. 8 pp. 10659-10670, Aug. 2023.
- [11] Zhang Q., Liu J., Gao Z., Li Z., Peng Z., Dong Z., and Xu H., "Robust beamforming design for RIS-aided NOMA secure networks with transceiver hardware impairments," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 71, no. 6 pp. 3637-3649, June 2023.
- [12] Ghadi F., Kaveh M., Wong K. and Martin D., "Physical layer security performance of cooperative dual-RIS-aided V2V NOMA communications," *IEEE Systems J.*, vol. 18, no. 4, pp. 2074-2084, Dec. 2024.
- [13] Hoang T., Xu C., Vahid A., Tuan H., Duong T., and Hanzo L., "Secrecy-rate optimization of double RIS-aided space ground networks," *IEEE Internet of Things J.*, vol. 10, no. 15 pp. 13221-13234, Aug. 2023.
- [14] Kamal M., Abideen S., Shan S., Sehito N., Khan S., Virdee B., Alibakhshikenari M. and Livreri P., "Secure satellite downlink with hybrid RIS and AI-based optimization," *IEEE Access*, vol. 13, pp. 3726-3737, Jan. 2025.