

UAV-RIS 지원 시스템의 보안 성능을 위한 통합 최적화 알고리즘

신승석, 심윤아, 마진아, 김규남*, 문상미**, 황인태
 전남대학교, *한국알프스, **나사렛대학교

ssskit7@naver.com, sya8325@naver.com, jama@kari.re.kr, kyunam.kim@kr.alps.com,
 moonsm@kornu.ac.kr, and hit@jnu.ac.kr

Integrated Optimization Algorithm for Security Performance in UAV-RIS-supported System

Seungseok Sin, Yuna Sim, Jina Ma, Kyunam Kim*, Sangmi Moon**, and Intae Hwang
 Chonnam National Univ., *Alps Electric Korea Co., Ltd., **Korea Nazarene Univ.

요약

최근 무선기기의 급증하는 수요와 데이터 트래픽의 영향으로 데이터 수요가 증가함에 따라 이를 지원하기 위한 다양한 기술이 개발되고 있다. 이 중 스펙트럼이 풍부하고 데이터 전송률이 높은 밀리미터파(mmWave) 주파수의 경우 경로 손실이 큰 문제가 있다. 이에 따라 무선통신 환경에 유리하게 재구성할 수 있는 무인항공기(UAV)와 재구성 가능한 지능형 표면(RIS)에 대한 관심이 높아지고 있다. 따라서 본 논문에서는 무인기를 이용한 무선통신 시스템의 물리계층 보안 성능 향상을 목표로 송신 빔포밍 벡터, RIS 빔포밍 벡터, UAV-RIS 궤적을 최적화하는 페널티 기반 연속 볼록 근사화 알고리즘을 소개한다. 그리고 RIS. 시뮬레이션을 통한 성능 분석 결과, 시스템 보안 성능 측면에서 제안한 알고리즘의 성능의 우수성을 확인하였다.

I. 서론

최근 데이터 수요가 증가함에 따라 이를 지원하기 위한 다양한 기술이 개발되고 있다. 그 중 스펙트럼이 풍부하고 데이터 전송률이 높은 밀리미터파(mmWave) 주파수가 주목받고 있으나, 경로 손실이 커서 장애물에 의해 신호가 쉽게 차단되는 문제가 있다[1-2]. 이를 보완하기 위해 무선통신 환경을 유리하게 재구성할 수 있는 기술로 UAV와 RIS에 대한 관심이 높아지고 있다[3-4]. 대부분의 RIS 연구는 단일 고정 RIS로 구성된 소규모 시스템을 중심으로 연구되고 있지만, 이는 낮은 활용도로 인해 데이터 수요가 증가하는 최근 대규모 시스템에는 적합하지 않습니다. 따라서 제안 방법은 기지국의 빔포밍 벡터, UAV-RIS의 빔포밍 벡터 및 UAV-RIS의 궤적을 최적화하여 시스템 비밀률을 최대화하는 알고리즘으로 구성된다.

II. 본론

1. 시스템 모델 및 채널 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 1개의 고정된 기지국이 UAV-RIS를 활용하여 여러 명의 고정된 지상의 사용자와 EVE를 지원하는 시스템을 고려한다. 이때, UAV-RIS는 전체시간 동안 사용자 마다 동일한 시간 만큼 연결되어 있다고 가정한다. 또한, 무선통신 경로는 RIS의 경우 고도가 높아질수록, LOS 확률이 높아지기 때문에 모든 개체 사이의 경로는 LOS가 성립한다고 가정한다.

UAV-RIS는 높은 고도에 위치하므로 대부분 LOS 경로를 갖고, 본 논문에서는 라이시안 페이딩 (Rician fading) 채널 모델을 고려한다. 기지국과 UAV-RIS 사이의 채널 (\mathbf{H}_{IB}), UAV-RIS와 k 번째 사용자 사이의 채널 (\mathbf{h}_{kI}), UAV-RIS와 EVE 사이의 채널 (\mathbf{h}_{eI})은 각각 수식 (1)과 같다. 또한, RIS를 거친 반사 채널 모델링의 경우에는 RIS의 공간적 상관관계를 고려한 레일리 페이딩 모델을 고려하였다[4],[5].

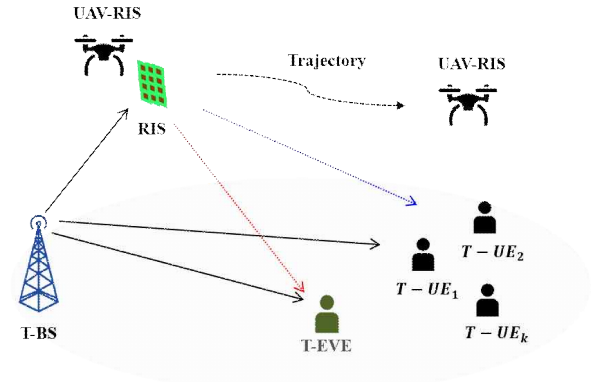


그림 1. 시스템 모델
 Fig. 1. System model.

2. 보안을 최대화를 위한 UAV-RIS 궤적 최적화 알고리즘

보안을 계산하기 위해서는 먼저 사용자와 EVE에서의 수신 신호를 계산해야 한다. s 와 ω_B , \mathbf{Q}_L 를 각각 송신 신호, 송신 빔포밍 벡터, UAV-RIS의 진폭과 위상을 나타낸 행렬이라 했을 때, 사용자와 EVE에서 수신한 신호는 각각 수식 (1)로 나타낼 수 있다. 이때, 사용자와 EVE에 대한 전송률을 각각 R_k 와 R_e 로 나타낸다면, 수식 (1)와 (2)으로 나타낼 수 있고, 보안율은 수식 (3)과 같이 계산한다.

$$R_k[n] = \log_2 \left(1 + \frac{|(x_k[n](\mathbf{h}_{kB}^H[n] + \mathbf{h}_{kI}^H[n]\mathbf{Q}[n]\mathbf{H}_{IB}[n])w_k[n])|^2}{\sigma_k^2[n] + |x_k[n]\mathbf{h}_{kI}^H[n]\mathbf{Q}[n]|^2\sigma_I^2[n]} \right) \quad (1)$$

$$R_e[n] = \log_2 \left(1 + \frac{|(x_e[n](\mathbf{h}_{eB}^H[n] + \mathbf{h}_{eI}^H[n]\mathbf{Q}[n]\mathbf{H}_{IB}[n])w_e[n])|^2}{\sigma_e^2[n] + |x_e[n]\mathbf{h}_{eI}^H[n]\mathbf{Q}[n]|^2\sigma_I^2[n]} \right) \quad (2)$$

$$R_s = [R_U - R_E]^+ \quad \text{where } [x]^+ = \max(0, x) \quad (3)$$

II-2장의 최종 목표는 UAV-RIS의 궤적을 최적화하여 보안을 R_s 를 최대화하는 것이다. 따라서 이를 수식으로 표현하면 수식 (4)의 (P1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
 (P1) \max_{\mathbf{T}} R_{s,avg}[n] \\
 \text{s.t. } T[0] = T_0, T[N] = T_N \\
 \|v_n\| \leq v_{\max}, n = 1, \dots, N \\
 \|v_n\| \geq v_{\min}, n = 1, \dots, N \\
 \|a_n\| \geq v_{\min}, n = 1, \dots, N \\
 T[n] = T[n-1] + v[n]\delta_t + \frac{1}{2}a[n]\delta_t^2, \\
 n = 1, \dots, N
 \end{aligned} \quad (4)$$

(P1)은 목적함수와 제약조건이 모두 비볼록 함수를 포함하기 때문에 CVX를 이용한 최적화를 구할수 없다. 따라서 목적함수의 비볼록 형태를 볼록 형태로 변환하기 위해 여유변수를 도입하고 여유변수에 대한 경계값을 이용해 볼록형태의 함수로 SCA(Successive Convex Approximation) 근사화 알고리즘이 필요하다. 마찬가지로, 비볼록 형태의 제약 조건을 볼록 형태로 변환하기 위해 SCA 알고리즘을 이용하여 제약조건을 볼록 형태로 변환할 수 있으며 이는 최종적으로 기본적인 CVX tool을 이용하여 최적해를 구할 수 있다.

3. 모의실험 성능 분석

그림 2. 비행 시간 N에 대한 UAV-RIS의 2차원 궤적
Fig. 2. 2-dimensional trajectory of UAV-RIS for flight time N.

먼저, 그림 2는 제안된 통합 최적화 기법을 적용하였때 2차원 평면상의 UAV-RIS의 최적화 된 궤적과 최적화가 되지 않았을 때의 궤적을 보여준다. 그림 3는 제안하는 송신 빔포밍, UAV-RIS 빔포밍, UAV-RIS 궤적 통합 최적화 방식과 기존의 방식에 대한 평균 보안률에 대한 성능 평가이다. 그림 3에서 Non-Optimization은 송신 빔포밍, UAV-RIS 빔포밍, UAV-RIS 궤적 최적화가 이루어지지 않은 것을 의미 하며 성능은 가장 낮은 0.6(bps/Hz)가 나오는 것을 확인할 수 있다. 또한 송신 빔포밍과 RIS 빔포밍 최적화를 적용했을 시 평균 보안률이 약 0.73(bps/Hz)정도 향상된 1.35(bps/Hz)가 나오며 최종적으로 UAV-RIS 궤적 최적화를 기존 방식에 통합 최적화를 적용했을시 약 0.28(bps/Hz)정도 평균 보안률이 향상됨을 확인할 수 있다. 이는 송신 빔포밍, RIS빔포밍과 UAV-RIS의 궤적 통합 최적화시 평균 보안률이 보다 큰 폭으로 향상될 수 있음을 확인할 수 있다.

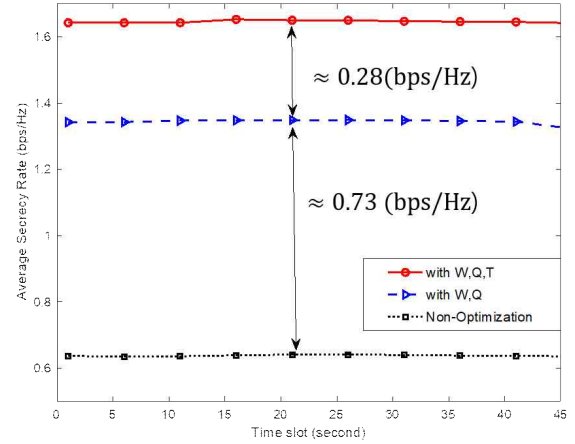


그림 3. 통합 최적화 알고리즘 적용에 따른 평균 보안률 비교
Fig. 3. Comparison of average security rates according to application of integrated optimization algorithm

III. 결론

본 논문에서는 UAV-RIS를 이용한 시스템에서 보안 전송률을 최대화하기 위한 기법을 제안하였다. 제안 방법은 여유변수 도입과 SCA 알고리즘을 활용함으로써 UAV-RIS 빔포밍 벡터를 최적화해 시스템 보안율을 최대화하는 부분으로 구성되어 있다. 모의실험 결과 제안 알고리즘을 적용했을 때 더 높은 보안율을 나타내 UAV-RIS 지원 시스템에서 보안 성능을 최대화하는데 적합한 알고리즘임을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

"이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 지역지능화혁신인재양성사업인 (IITP-2024-00156287)." "본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획평가원의 학석사연계ICT핵심인재양성사업의 연구결과로 수행되었음 (RS-2022-00156385)." "이 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2023-00220985), (RS-2023-00246381) 및 (RS-2024-00333826)."

참고 문헌

- [1] Y. Zeng and R. Zhang, "Energy-Efficient UAV Communication With Trajectory Optimization," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 16, no. 6. Institute of Electrical and Electronics Engineers (IEEE), pp. 3747–3760, Jun-2017.
- [2] C. Yan, L. Fu, J. Zhang, and J. Wang, "A comprehensive survey on UAV communication channel modeling," *IEEE Access*, Vol. 7, pp. 107769-107792, Aug. 2019.
- [3] T. Alladi, G. Bansal, V. Chamola, and M. Guizani, "SecAuthUAV: A novel authentication scheme for UAV-ground station and UAV-UAV communication," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, Vol. 69, No.12, pp. 15068-15077, Oct. 2020.
- [4] T. M. Hoang, C. Xu, A. Vahid, H. D. Tuan, T. Q. Duong and L. Hanzo, "Secrecy-Rate Optimization of Double RIS-Aided Space-Ground Networks," in *IEEE Internet of Things Journal*, vol. 10, no. 15, pp. 13221-13234, 1 Aug.1, 2023.
- [5] E. Björnson and L. Sanguinetti, "Rayleigh Fading Modeling and Channel Hardening for Reconfigurable Intelligent Surfaces," in *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 10, no. 4, pp. 830-834, April 2021.