

UAV-RIS 지원 시스템에서 보안 성능향상을 위한 궤적 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

Trajectory Optimization Algorithm for Improving Security Performance in UAV-RIS Support 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 UAVs (Unmanned Aerial Vehicles) 와 RIS (Reconfigurable Intelligent Surface)는 높은 유동성 및 낮은 하드웨어 비용으로 5G, 6G 무선 통신에서 큰 관심을 받고 있다. 하지만 무선 통신 환경의 개방성으로 인해 도청에 취약하다는 문제점이 여전히 남아있다. 이에 본 논문에서는 UAV와 RIS를 활용하는 무선통신 시스템에서 물리계층 보안 성능을 높이기 위해, UAV-RIS 궤적을 최적화하기 위한 최적화 알고리즘을 소개한다.

I. 서론

최근 Unmanned Aerial Vehicles (UAVs)는 5G, 6G 무선 통신에서 큰 관심을 받고 있다. UAV는 높은 유동성 및 낮은 하드웨어 비용을 이용하여 통신 품질을 개선한다 [1],[2]. 그러나 비행 지형, 구조물 또는 고밀도 지역에서의 사용자가 UAV와 신호를 차단할 수 있고, 이로 인해 통신 링크의 성능이 떨어지며 장거리의 통신을 구현하기 힘들어 질 수 있다 [3].

또한, UAV-RIS 시스템의 경우 환경의 개방성으로 인해 무선통신 신호가 도청에 취약하다는 단점이 있다. 이에 위의 관련 연구를 바탕으로 UAV-RIS 지원 다중 사용자와 도청자 (evesdropper, EVE)로 구성된 시스템에서 사용자의 보안율을 높이는 방법을 제안한다. 제안 방법은 UAV-RIS의 궤적을 최적화함으로써 시스템 보안율을 최대화하는 알고리즘으로 구성되어있다.

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].

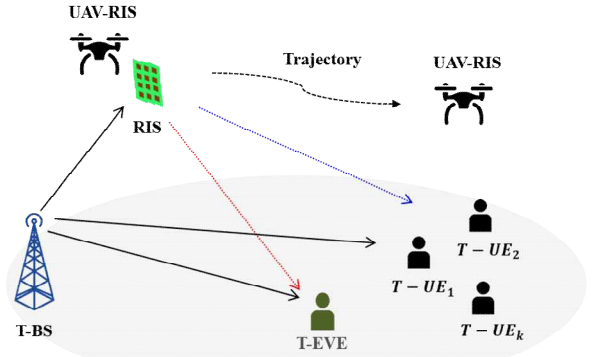


그림 1. 시스템 모델
 Fig. 1. System model.

2. 보안을 최대화를 위한 UAV-RIS 궤적 최적화 알고리즘

보안율을 계산하기 위해서는 먼저 사용자와 EVE에서의 수신 신호를 계산해야 한다. s 와 ω_B , \mathbf{Q}_L 을 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 (2)와 (3)으로 나타낼 수 있고, 보안율은 수식 (4)과 같이 계산한다.

$$h_{rt} = PL_{rt} \left(\sqrt{\frac{\beta}{1+\beta}} h_{rt}^{LOS} + \sqrt{\frac{1}{1+\beta}} h_{rt}^{NLOS} \right) \quad (1)$$

$$PL_{rt} = \sqrt{\beta_0} \left(\frac{d_0}{d_{rt}} \right)^{\alpha_{rt}}, r \in I, k, e, t \in B, I$$

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

$$R_e[n] = \log_2 \left(1 + \frac{|(x_e[n](\mathbf{h}_{eB}^H[n] + \mathbf{h}_{eI}^H[n]\mathbf{Q}[n]\mathbf{H}_{IB}[n])w_e[n])|^2}{\sigma_e^2[n] + |x_e[n]\mathbf{h}_{eI}^H[n]\mathbf{Q}[n]|^2\sigma_I^2[n]} \right) \quad (3)$$

$$R_s = [R_U - R_E]^+ \quad (4)$$

where $[x]^+ = \max(0, x)$

II-2장의 최종 목표는 UAV-RIS의 궤적을 최적화하여 보안율 R_s 를 최대화하는 것이다. 따라서 이를 수식으로 표현하면 수식 (5)의 (P1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$(P1) \max_{\mathbf{T}} R_{s,avg}[n]$$

$$s.t. \quad \mathbf{T}[0] = T_0, \mathbf{T}[N] = T_N$$

$$\|v_n\| \leq v_{max}, \quad n = 1, \dots, N$$

$$\|v_n\| \geq v_{min}, \quad n = 1, \dots, N$$

$$\|a_n\| \geq v_{min}, \quad n = 1, \dots, N$$

$$\mathbf{T}[n] = \mathbf{T}[n-1] + v[n]\delta_t + \frac{1}{2}a[n]\delta_t^2,$$

$$n = 1, \dots, N$$

(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

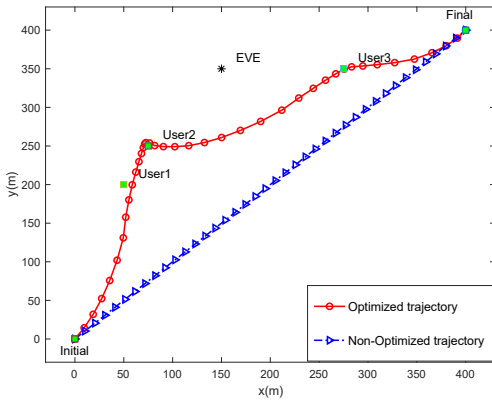


그림 2. 비행 시간 N에 대한 UAV-RIS의 2차원 궤적
Fig. 2. 2-dimensional trajectory of UAV-RIS for flight time N.

먼저, 그림 2는 제안된 통합 최적화 기법을 적용하였때 2차원 평면상의 UAV-RIS의 최적화 된 궤적과 최적화가 되지 않았을 때의 궤적을 보여준다. 다음 그림 3은 앞선 모의실험 결과를 활용하여 기존 RIS빔포밍만 최적화 하였을 때와 RIS빔포밍과 제안하는 기법을 통한 UAV-RIS궤적을 통합 최적화 하였을 때의 성능을 비교하기 위한 모의실험 결과이다. 그림 3에 확인할 수 있듯이 UAV-RIS 궤적과 통합 최적화 하였을 때 평균 보안율이 약 0.4 (bps/hz)정도 향상됨을 확인할 수 있다.

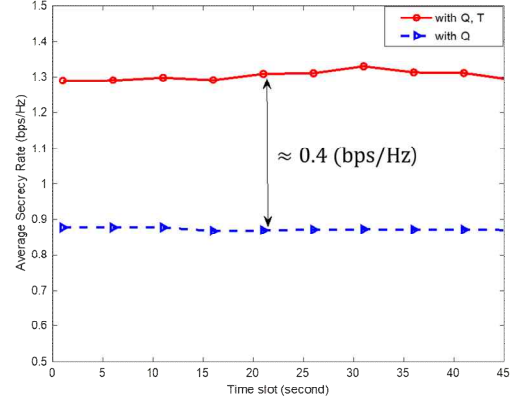


그림 3. 궤적 통합 최적화 방식과 단일 RIS 빔포밍 최적화 방식 성능 비교

Fig. 3. Performance comparison of trajectory integration optimization method and single RIS beamforming optimization method.

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 성과는 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (2021R1A2C1005058)." "본 논문(저서)은 교육부 및 한국연구재단의 4단계 BK21 사업 (혁신인재 양성사업)으로 지원된 연구임 (관리번호 51999 91714138)." "본 연구는 과학기술정보통신부 및 정보통신기획 평가원의 지역지능화혁신인재양성사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2024-RS-2022-00156287)." "본 연구는 과학기술정보 통신부 및 정보통신기획평가원의 ICT혁신인재4.0 사업의 연구결과로 수행되었음 (IITP-2024-RS-2022-00156385)." "이 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2023-00220985, RS-2023-00246381)."

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.