

비지상 네트워크 기반 보안 성능 최적화 알고리즘

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

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

Non-Terrestrial Network based Security Performance Optimization Algorithm

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

요약

비지상네트워크(Non-Terrestrial Network, NTN)는 넓은 커버리지를 제공할 수 있지만, 개방성의 특징으로 보안에 취약하다. 이에 재구성 가능한 지능형 반사판 (Reconfigurable Intelligent Surfaces, RIS)과 빔포밍 벡터에 대한 최적화 알고리즘을 이용하여 시스템 보안 성능을 개선하는 알고리즘을 소개한다.

I. 서론

비지상네트워크(Non-Terrestrial Network, NTN)는 비행체와 위성을 활용하여 넓은 커버리지를 제공할 수 있어 주목받지만, 개방성의 특징으로 보안 성능에 대한 보완이 필요하다. 이에 재구성 가능한 지능형 반사판 (Reconfigurable Intelligent Surfaces, RIS)과 빔포밍 벡터에 대한 최적화 알고리즘을 이용하여 시스템 보안 성능을 개선하는 알고리즘을 소개한다.

II. 본론

1. 시스템 모델 및 채널 모델

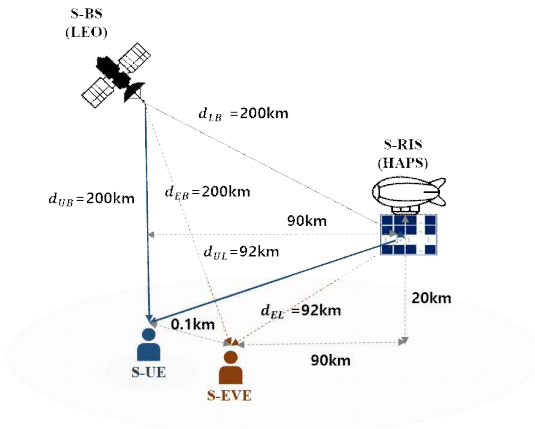


그림 1. 시스템 모델
Fig. 1. System model.

본 논문에서는 그림 1과 같이 1개의 지구 저궤도 위성 형태의 기지국이 고정된 한 명의 지상의 사용자를 지원하는 시스템을 고려한다. 보안 성능을 평가하기 위해 근접한 위치에 지상의 도청자를 두었으며, 기지국과 사용자 사이에는 LOS 경로도 있지만, RIS를 통해 반사되는 경로도 있다고 가정한다. 이때, RIS는 고-고도 플랫폼 시스템에 부착하여 LOS 경로를 확보할 수 있도록 하였다.

기지국과 사용자 사이의 LOS 경로에 사용한 채널 모델로는 3GPP에서 제정한 표준을 적용하였고, 특히 UAV와 NTN 채널에

관한 표준 내용인 TR38.811[1]과 TR38.821[2]를 사용하였다. RIS를 통해 반사하는 경로에는 RIS 소자의 공간적 상관 관계를 고려한 레일리 페이딩 채널 모델을 고려하였다[3-4].

2. 보안을 최대화를 위한 빔포밍 벡터 최적화 알고리즘

보안을 계산하기 위해서는 먼저 사용자와 EVE에서의 수신 신호를 계산해야 한다. s 와 w_B , 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_U 와 R_E 로 나타낸다면, 수식 (2)로 나타낼 수 있고, 보안율은 수식 (3)과 같이 계산한다.

$$y_U = \sqrt{\Lambda_{UB}} \mathbf{h}_{UB}^H w_B + \sqrt{\Lambda_{UB} \Lambda_{LB}} \mathbf{h}_{UB}^H Q_L \mathbf{H}_{LB} w_B + \mathbf{h}_{UL}^H Q_L n_L + n_U \quad (1)$$

$$y_E = \sqrt{\Lambda_{EB}} \mathbf{h}_{EB}^H w_B + \sqrt{\Lambda_{EB} \Lambda_{LB}} \mathbf{h}_{EB}^H Q_L \mathbf{H}_{LB} w_B + \mathbf{h}_{EL}^H Q_L n_L + n_E$$

$$R_U = \ln \left(1 + \frac{|\sqrt{\Lambda_{UB}} \mathbf{h}_{UB}^H + \sqrt{\Lambda_{UL} \Lambda_{LB}} \mathbf{h}_{UL}^H Q_L \mathbf{H}_{LB}|^2 w_B^2}{\sigma_U^2 + |\mathbf{h}_{UL}^H Q_L|^2 \sigma_L^2} \right) \quad (2)$$

$$R_E = \ln \left(1 + \frac{|\sqrt{\Lambda_{EB}} \mathbf{h}_{EB}^H + \sqrt{\Lambda_{EL} \Lambda_{LB}} \mathbf{h}_{EL}^H Q_L \mathbf{H}_{LB}|^2 w_B^2}{\sigma_E^2 + |\mathbf{h}_{EL}^H Q_L|^2 \sigma_L^2} \right)$$

$$R_s = [R_U - R_E]^+ \quad (3)$$

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

II-2장의 최종 목표는 송신 빔포밍과 RIS 빔포밍을 최적화하여 보안율 R_s 를 최대화하는 것이다. 따라서 $P_{B, \max}$, $P_{L, \max}$, $\eta_{L, \max}$ 를 각각 기지국에서의 최대 송신 전력, UAV-RIS에서의 최대 전력, RIS에서의 최대 증폭 지수라고 했을 때 수식 (4)의 (P1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
(P1) \max_{w_B, Q_L} R_s \\
s.t. \quad & |w_B|^2 \leq P_{B,\max} \\
& |Q_L H_{LB} w_B|^2 + |Q_L|^2 \sigma_L^2 \leq P_{L,\max} \\
& |Q_L[m, m]| \leq \eta_{L,\max} \quad (\forall m)
\end{aligned} \quad (4)$$

(P1)을 풀기 위해서는 w_B 와 Q_L 을 최적화해야 하는데, 두 개의 부수적인 문제로 나누는 교대 최적화 알고리즘 (Alternating Optimization, AO)를 활용한다. 먼저 Q_L 을 고정한 후, 송신 빔포밍 벡터 w_B 를 최적화하기 위해 SCA (Successive Convex Approximation) 알고리즘을 적용한다 [5-6]. 이에 랭크 1인 최적의 해를 구하기 위해 페널티 (Penalty) 기반 알고리즘을 함께 적용한 후, 최적화를 수행한다 [7-8]. 반대의 경우에는 w_B 를 고정한 후, Q_L 을 최적화하기 위해 MM (Minorization-Maximization) 알고리즘을 적용하는데, 마찬가지로, 랭크 1인 최적의 해를 구하기 위해 페널티 (Penalty) 알고리즘을 결합해 최적화를 수행한다 [6-8].

3. 모의실험 성능 분석

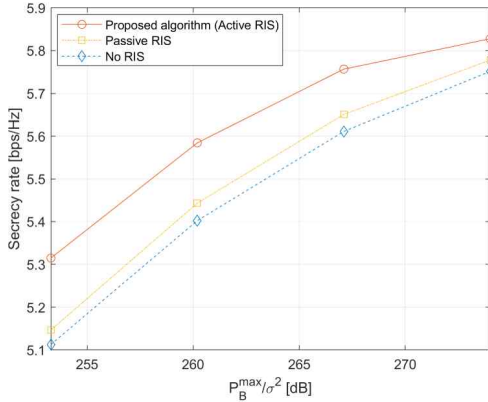


그림 2. RIS 종류에 따른 보안 성능 비교
Fig. 2. Security performance comparison according to RIS types

그림 2는 RIS 종류에 따른 제안 알고리즘의 보안 성능을 비교한 결과이다. 먼저 최대 송신 전력이 증가함에 따라 보안 성능이 개선되는 전체적인 양상을 확인할 수 있었다. 또한, 활성 RIS를 사용하는 경우, 가장 보안 성능이 좋음을 확인하였다.

III. 결론

본 논문에서는 위성 기지국이 지상 단말을 지원하는 비지상 네트워크에서 RIS와 빔포밍 벡터 최적화 알고리즘을 활용해 보안 성능을 개선하였다. RIS 종류에 따른 알고리즘 성능을 분석했을 때, 활성 RIS를 사용하는 경우 가장 성능이 좋음을 확인하였다. 추후, 제안 알고리즘의 우수성을 확인하기 위해 기존의 다른 알고리즘과도 성능을 비교할 계획이며, 제안 알고리즘의 활용도를 높이기 위해 다양한 시스템 모델에서 알고리즘을 적용해 성능을 평가할 예정이다.

ACKNOWLEDGMENT

"이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 지역지능화혁신인재양성사업임 (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] 3GPP TR 38.811: "Study on New Radio (NR) to support non-terrestrial networks (Release 15)," V15.4.0.
- [2] 3GPP TR 38.821: "Solutions for NR to support Non-Terrestrial Networks (NTN) (Release 16)," V16.2.0.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] Y. Xiu, J. Zhao, C. Yuen, Z. Zhang and G. Gui, "Secure Beamforming for Multiple Intelligent Reflecting Surfaces Aided mmWave Systems," in IEEE Communications Letters, vol. 25, no. 2, pp. 417-421, Feb. 2021.
- [6] Y. A. Sim, S. S. Sin, J. A. Ma, J. H. Kim, M. S. Moon and I. T. Hwang, "Beamforming Algorithm for Improving Secrecy Rate in Multiple Flying RISs-supported Systems," in Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers, vol. 60, no. 11, Nov. 2023.
- [7] P. Cao, J. Thompson and H. V. Poor, "A sequential constraint relaxation algorithm for rank-one constrained problems," 2017 25th European Signal Processing Conference (EUSIPCO), Kos, Greece, 2017, pp. 1060-1064.
- [8] L. Dong, H.-M. Wang and J. Bai, "Active Reconfigurable Intelligent Surface Aided Secure Transmission," in IEEE Transactions on Vehicular Technology, vol. 71, no. 2, pp. 2181-2186, Feb. 2022.