

RIS 기반 비지상 시스템에서 빔포밍 벡터 최적화 알고리즘

심윤아, 신승석, 김준형, 윤상민, 문상미*, 황인태
 전남대학교, *나사렛대학교

nya8325@naver.com, ssskit7@naver.com, kimjh1788@naver.com, ysm9914@naver.com,
 moonsm@kornu.ac.kr, and hit@jnu.ac.kr

Beamforming Vector Optimization Algorithm in RIS-based Non-Terrestrial Systems

Yuna Sim, Seungseok Sin, Jina Ma, Junhyeong Kim, Sangmin Yun, Sangmi Moon*,
 and Intae Hwang
 Chonnam National Univ., *Korea Nazarene Univ.

요약

THz 대역의 높은 주파수는 넓은 대역폭과 높은 전송률 때문에 6G 시스템의 핵심 요소로 주목받고 있지만 큰 경로 손실로 인해 이를 보완하기 위한 기술이 필요하다. 이에 비지상 네트워크 (Non-Terrestrial Network, NTN)와 재구성 가능한 지능형 반사판 (Reconfigurable Intelligent Surfaces, RIS)를 이용해 비지상 시스템에서 보안 성능을 개선하기 위한 알고리즘을 소개한다. 제안 알고리즘은 크게 두 부분으로 구성된다. SCA (Successive Convex Approximation) 알고리즘을 이용해 기지국 빔포밍 벡터를 최적화하는 부분과 MM (Minorization-Maximization) 알고리즘을 이용해 RIS 빔포밍 벡터를 최적화하는 부분으로 나뉜다. 모의실험을 통한 성능 분석 결과 시스템 보안 성능 측면에서 제안 알고리즘의 우수성을 확인하였다.

I. 서론

6G 시스템에서 초광대역을 지원하기 위한 THz 대역의 높은 주파수는 넓은 대역폭과 높은 전송률 때문에 핵심 요소로 주목받고 있다[1]. 하지만 THz는 큰 경로 손실로 인해 신호가 장애물에 쉽게 가로막힌다는 단점이 있다[2]. 이에 높은 고도와 이동성의 특징을 갖는 비행체로 구성된 비지상 네트워크 (Non-Terrestrial Network, NTN)와 기지국과 단말 사이 LOS (Line-Of-Sight) 환경을 쉽게 확보할 수 있는 재구성 가능한 지능형 반사판 (Reconfigurable Intelligent Surfaces, RIS)를 이용해 이러한 단점을 보완할 수 있다[3],[4].

또한, NTN 시스템의 경우 환경의 개방성으로 인해 무선통신 신호가 도청에 취약하다는 단점이 있다. 이에 본 논문에서는 위성 기지국과 지상의 사용자 단말, 도청 단말로 구성된 시스템에서 위성에 부착한 RIS를 활용하여 보안 성능을 개선하는 알고리즘을 소개한다. 제안 방법은 기지국의 빔포밍 벡터와 RIS의 빔포밍 벡터를 최적화함으로써 시스템 보안율을 최대화하는 알고리즘으로 구성되어 있다.

II. 본론

1. 시스템 모델 및 채널 모델

본 논문에서는 그림 1과 같이 1개의 지구 저궤도(Low Earth Orbit, LEO) 형태의 기지국이 한 명의 고정된 지상의 사용자와 EVE를 지원하는 시스템을 고려한다. 기지국과 지상의 사용자, EVE 사이에는 직접적인 LOS 경로도 있지만, LOS 경로가 확보되지 않는 경우를 대비해 HAPS(High-Altitude Platform Systems)에 RIS를 부착함으로써 LOS 경로를 확보할 수 있도록 설계하였다.

위성 기지국은 N개의 균등 선형 안테나 배열을 갖고, 지상 단말과 EVE는 단일 안테나를 갖는다고 가정한다. 각각의 RIS는 총 M개의 지능형 반사 요소로 구성되어 있고 균등 평면 안테나 배열을 갖는다고 가정한다. 또한, 본 논문에서는 위상과 진폭을 모두 조정하는 Active RIS를 사용하였다. 기지국과 지상 단말, EVE 사이의 직접적인 경로에 관한 채널에는 국제 표준화기구 3GPP(3rd Generation Partnership Project)에서 제정한 표준을 적용하였다. 특히, UAV와 NTN 채널에 관한 표준 내용인 TR38.811[5]과 TR38.821[6]을 참고하였다. 또한, RIS를 거친 반사

채널 모델링의 경우에는 RIS의 공간적 상관관계를 고려한 레일리 페이딩 모델을 고려하였다[7],[8].

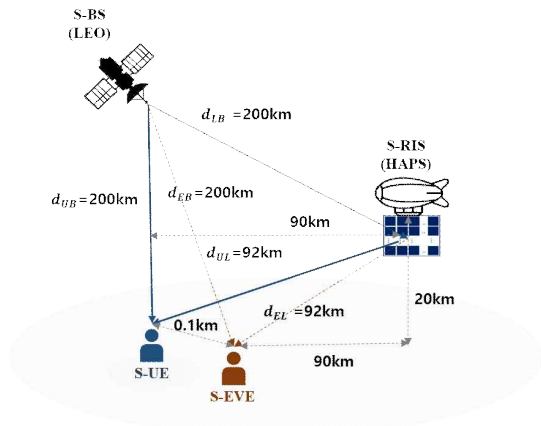


그림 1. 시스템 모델
 Fig. 1. System model.

2. 보안율 최대화를 위한 빔포밍 벡터 최적화 알고리즘

보안율을 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.

$$\begin{aligned}
 y_U &= \sqrt{\Lambda_{UB}} \mathbf{h}_{UB}^H w_B + \sqrt{\Lambda_{UB} \Lambda_{LB}} \mathbf{h}_{UB}^H Q_L \mathbf{H}_{LB} w_B^S \\
 &\quad + \mathbf{h}_{UL}^H Q_L^n + n_U \\
 y_E &= \sqrt{\Lambda_{EB}} \mathbf{h}_{EB}^H w_B + \sqrt{\Lambda_{EB} \Lambda_{LB}} \mathbf{h}_{EB}^H Q_L \mathbf{H}_{LB} w_B^S \\
 &\quad + \mathbf{h}_{EL}^H Q_L^n + n_E
 \end{aligned} \tag{1}$$

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

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

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

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.

$$(P1) \max_{w_B, \mathbf{Q}_L} R_s \quad (4)$$

s.t. $|w_B|^2 \leq P_{B, \max}$
 $|\mathbf{Q}_L \mathbf{H}_{LB} w_B|^2 + |\mathbf{Q}_L|^2 \sigma_L^2 \leq P_{L, \max}$
 $|\mathbf{Q}_L[m, m]| \leq \eta_{L, \max} \quad (\forall m)$

(P1)을 풀기 위해서는 w_B 와 \mathbf{Q}_L 을 최적화해야 하는데, 두 개의 부수적인 문제로 나누는 교대 최적화 알고리즘 (Alternating Optimization, AO)를 활용한다. 먼저 \mathbf{Q}_L 을 고정 한 후, 송신 빔포밍 벡터 w_B 를 최적화하기 위해 SCA (Successive Convex Approximation) 알고리즘을 적용한다 [9],[10]. 이에 랭크 1인 최적의 해를 구하기 위해 페널티 (Penalty) 기반 알고리즘을 함께 적용한 후, 최적화를 수행한다 [11]. 반대의 경우에는 w_B 를 고정 한 후, \mathbf{Q}_L 을 최적화하기 위해 MM (Minorization-Maximization) 알고리즘을 적용하는데, 마찬가지로, 랭크 1인 최적의 해를 구하기 위해 페널티 (Penalty) 알고리즘을 결합해 최적화를 수행한다 [10-12].

3. 모의실험 성능 분석

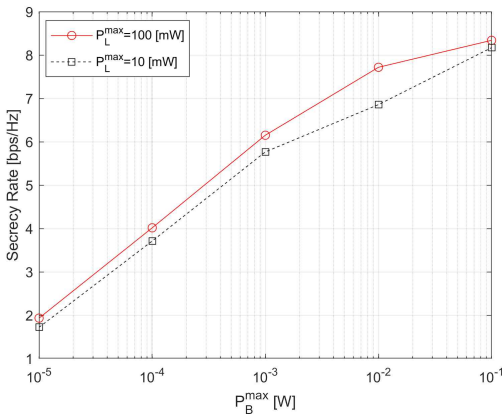


그림 2. RIS 최대 전력에 따른 보안 성능 비교
 Fig. 2. Security performance comparison according to maximum RIS power.

그림 2는 RIS 최대 전력에 따른 제안 알고리즘의 보안 성능을 비교한 결과이다. 기지국 최대 전력이 증가함에 따라서 보안 성능이 증가하는 것을 확인할 수 있으며, RIS 최대 전력이 100 [mW]인 경우, 10 [mW]보다 보안 성능이 높은 것을 통해 제안 알고리즘을 적용하였을 때, RIS 최대 전력이 클수록 보안 성능이 높아짐을 알 수 있다.

III. 결론

본 논문에서는 위성 기지국과 지상의 사용 단말, 도청 단말로 구성된 시

스템에서 위성에 부착한 RIS를 활용해 보안 성능을 개선하는 알고리즘을 소개하였다. 제안 방법은 SCA 알고리즘과 MM 알고리즘을 활용함으로써 기지국의 빔포밍 벡터와 RIS 빔포밍 벡터를 최적화해 시스템 보안율을 최대화하는 부분으로 구성되어 있다. 모의실험 결과 제안 알고리즘을 적용했을 때 더 높은 보안율을 나타내 비지상 시스템에서 보안 성능을 최대화하는데 적합한 알고리즘임을 확인하였다.

ACKNOWLEDGMENT

"이 성과는 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (2021R1A2C1005058)." "이 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (RS-2023-00220985, RS-2023-00246381)."

참고 문헌

- [1] C. D. Alwis, P. Kumar, Q. V. Pham, K. Dev, A. Kalla, M. Liyanage, and W. J. Hwang, "Towards 6G: Key technological directions," in *ICT Express*, vol. 9, no. 4, pp. 525-533, Aug. 2023, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ict.2022.10.005>.
- [2] L. T. Wedage, B. Butler, S. Balasubramaniam, M. C. Vuran and Y. Koucheryavy, "Path Loss Analysis of Terahertz Communication in Mars' Atmospheric Conditions," 2022 IEEE International Conference on Communications Workshops (ICC Workshops), Seoul, Korea, Republic of, 2022, pp. 1225-1230.
- [3] F. Rinaldi et al., "Non-Terrestrial Networks in 5G & Beyond: A Survey," in *IEEE Access*, vol. 8, pp. 165178-165200, 2020.
- [4] S. Moon and I. Hwang, "Multi-task Learning-deep Neural Network-based Secrecy Rate Maximization for Multiple Intelligent Reflecting Surface System," in *Journal of the Institute of Electronics and Information Engineers*, vol. 59, no. 10, pp. 19-24, Oct. 2022.
- [5] 3GPP TR 38.811: "Study on New Radio (NR) to support non-terrestrial networks (Release 15)," V15.4.0.
- [6] 3GPP TR 38.821: "Solutions for NR to support Non-Terrestrial Networks (NTN) (Release 16)," V16.2.0.
- [7] 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.
- [8] 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.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.