

# UAV-RIS 지원 비지상 시스템에서 에너지 효율성을 위한 궤적 최적화 알고리즘

신승석, 김준형, 마진아, 김규남\*, 문상미\*\*, 황인태  
전남대학교, \*한국알프스, \*\*나사렛대학교

ssskit7@naver.com, kimjh1788@naver.com, jama@kari.re.kr, kyunam.kim@kr.alps.com,  
moonsm@kornu.ac.kr, and hit@jnu.ac.kr

## Trajectory Optimization Algorithm for Energy Efficiency in UAV-RIS Enabled Non-Terrestrial Systems

Seungseok Sin, Junhyeong Kim, Jina Ma, Kyunam Kim\*, Sangmi Moon\*\*, and Intae Hwang  
Chonnam National Univ., \*Alps Electric Korea Co., Ltd., \*\*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)과 무선통신 환경에 유리하게 재구성할 수 있는 무인항공기(UAV)와 재구성 가능한 지능형 표면(RIS)을 이용해 비지상 시스템에서 성능을 개선하기 위한 UAV-RIS 궤적 최적화 알고리즘을 소개한다. 제안 알고리즘은 모의실험을 통한 성능 분석 결과 시스템 에너지 효율 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)과 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]. 이에 본 논문에서는 위성 기지국과 지상의 사용 단말, UAV에 부착한 RIS를 활용해 에너지 효율을 개선하는 알고리즘을 소개한다.

### 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 사용자를 지원하는 시스템을 고려한다. 기지국과 지상의 사용자 사이에는 직접적인 LOS 경로도 있지만, LOS 경로가 확보되지 않는 경우를 대비해 UAV에 RIS를 부착함으로써 LOS 경로를 확보할 수 있도록 설계하였다.

위성 기지국은 N개의 균등 선형 안테나 배열을 갖고, 지상 단말은 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 사이의 직접적인 경로에 관한 채널에는 국제 표준화 기구 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].

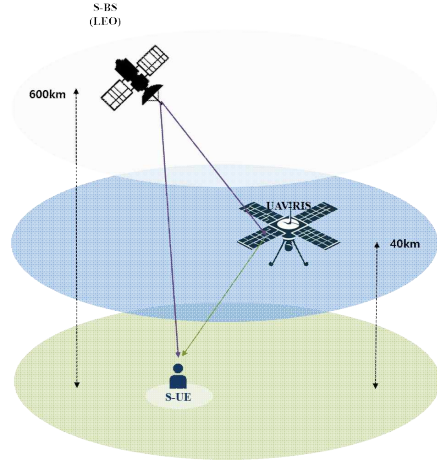


그림 1. 시스템 모델  
Fig. 1. System model.

#### 2. 에너지 효율을 위한 UAV-RIS 궤적 최적화 알고리즘

에너지 효율을 계산하기 위해서는 먼저 사용자에서의 수신 신호를 계산해야 한다.  $s$ 와  $\omega_B$ ,  $\mathbf{Q}_L$ 을 각각 송신 신호, 송신 빔포밍 벡터, UAV-RIS의 진폭과 위상을 나타낸 행렬이라 했을 때, 사용자에서 수신한 신호는 각각 수식 (1)로 나타낼 수 있다. 이때, 사용자에 대한 전송률을 각각  $R_U$ 로 나타낸다면, 수식 (2)로 나타낼 수 있다.

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

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

II-2장의 최종 목표는 UAV-RIS 궤적을 최적화하여 에너지 효율성을 최대화하는 것이다. 따라서 목적함수는 E.E (Energy Efficient)를 수식 수식 (3)의 (P1) 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned}
(P1): \max_{q(t)} EE(q(t)) \\
st. q(0) = q_0 \\
q(T) = q_F \\
|v(t)| \leq V_{\max}, \quad \forall t \\
v(0) = v_0 \\
v(T) = v_F \\
|a(t)| \leq a_{\max}, \quad \forall t
\end{aligned} \tag{3}$$

(P1)을 풀기 위해서는 보다 다루기 쉬운 최적화 문제를 얻기 위해 이산 선형 상태공간 근사를 적용시켜야 되며 이를 수식으로 표현하면 수식 (P2)와 같다.

$$(P2): \max_{\{q[n], v[n], a[n]\}} \frac{B \sum_{n=1}^N \log_2 \left( 1 + \frac{Y_0}{H^2 + |q[n]|^2} \right)}{\sum_{n=1}^N \left( c_1 |v[n]|^3 + \frac{c_2}{|v[n]|} \left( 1 + \frac{|a[n]|^2}{g^2} \right) \right) + \Delta K / \delta_t} \tag{4}$$

그러나 (P2)는 불록하지 않은 분모 위에 오목하지 않은 분자를 갖는 분수 함수이기 때문에 이 문제를 해결하기 위해 순차 불록 최적화 기법을 적용하면 (P2)의 Karush-Kuhn-Tucker(KKT) 조건을 만족하는 효율적인 솔루션을 얻을 수 있다. 이에 다시 한번 식을 변경하게 되면 최종적으로 수식(6)과 같이 정리할 수 있으며 이를 통해 제적 최적화를 진행할 수 있다.

$$\begin{aligned}
(P2.1): \max_{\{q[n], v[n], a[n], \tau_n\}} \frac{R_{lb}(q[n])}{\sum_{n=1}^N \left( c_1 |v[n]|^3 + c_2 \frac{1 + |a[n]|^2}{g^2 \tau_n} \right) + \Delta K / \delta_t} \\
st. q[n+1] = q[n] + v[n] \delta t + \frac{1}{2} a[n] \delta t^2, \quad n = 0, \dots, N \\
v[n+1] = v[n] + a[n] \delta t, \quad n = 0, \dots, N \\
q[0] = q_0, \quad q[N+1] = q_F \\
v[0] = v_0, \quad v[N+1] = v_F \\
|v[n]| \leq V_{\max}, \quad n = 1, \dots, N \\
|a[n]| \leq a_{\max}, \quad n = 0, \dots, N \\
\tau_n \geq 0, \quad \forall n \\
|v[n]|^2 \geq \tau_n^2, \quad \forall n
\end{aligned} \tag{5}$$

### 3. 모의실험 성능 분석

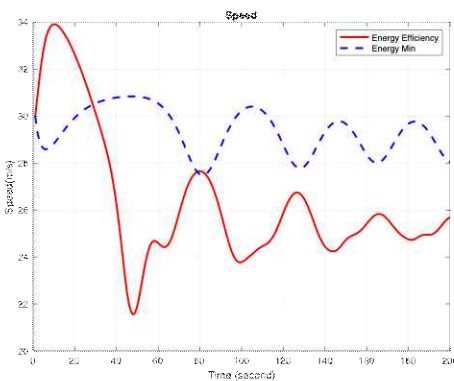


그림 2. UAV-RIS의 최적화 방식에 따른 속도 변화 비교

Fig. 2. Comparison of speed changes according to UAV-RIS optimization method.

그림 2은 에너지 최소화 및 에너지 효율성 (EE) 최대화를 기반으로 한 UAV-RIS의 속도를 나타낸다. 모의실험 결과 그림 2에서 확인할 수 있듯이 에너지 최소화를 기반으로 최적화가 이루어졌을 때, UAV-RIS는 속도의 변화가 적은 쪽으로 움직이는 것을 확인할 수 있다. 반면에, EE최대화를 기반으로 한 UAV-RIS의 경우 통신 채널을 보장하기 위해 그림 2에서

확인할 수 있듯이 초기에 S-UE의 주변으로 빠르게 접근한 후 최소한의 속도를 가지고 비행하는 것을 확인할 수 있다.

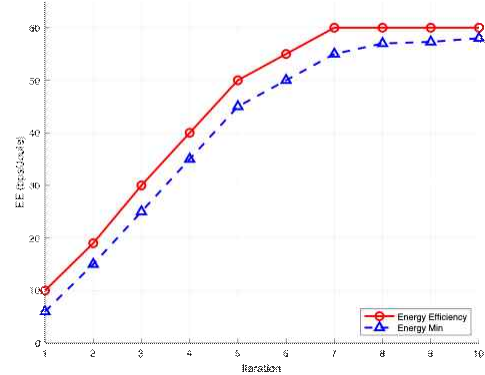


그림 3. 반복 횟수에 따른 에너지 효율 비교

Fig. 3. Comparison of energy efficiency according to the number of iterations.

그림 3는 제안 알고리즘을 적용하였을 때, S-UE 최대 수신 에너지 효율성을 비교한 결과이다. 그림 3에서 확인할 수 있듯이 제안 알고리즘이 기존 알고리즘에 비해 성능이 우수한 것을 확인하였는데, 이는 그림 2의 결과와 마찬가지로 에너지 효율성을 기반으로 최적화를 하였을 때 적은 에너지로도 일정 통신 채널을 보장하기 때문에 성능이 우수하다고 볼 수 있다.

### III. 결론

본 논문에서는 위성 기지국과 지상의 사용 단말로 구성된 시스템에서 UAV에 부착한 RIS를 활용해 시스템 성능을 개선하는 알고리즘을 소개하였다. 제안 방법은 KKT조건과 SCA 알고리즘을 활용함으로써 UAV-RIS 제적을 최적화해 에너지 효율성을 최대화하는 부분으로 구성되어 있다. 모의실험 결과 제안 알고리즘을 적용했을 때 더 높은 에너지 효율을 나타내 비지상 시스템에서 성능을 최대화하는데 적합한 알고리즘임을 확인하였다.

### ACKNOWLEDGMENT

“이 논문은 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원을 받아 수행된 지역지능화혁신인재양성사업임 (IITP-2024-RS-2022-00156287).” “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] 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.