

# 테라헤르츠 대역 무인비행체 에너지 수확 릴레이 네트워크 성능분석

## Performance Analysis of a UAV Energy Harvesting Relay Network in the Terahertz Band

조 연 기\*, Saifur Rahman Sabuj\*, 조 한 신\*\*

Yeongi Cho\*, Saifur Rahman Sabuj\*, Han-Shin Jo\*\*

### Abstract

Unmanned aerial vehicle (UAV)-assisted relay has the advantages of ease of deployment, good communication channels, and mobility over traditional terrestrial relay, which greatly improves wireless connectivity. In this paper, we design a UAV-enabled relay network that can utilize radio frequency bands to harvest energy from sources and utilize terahertz (THz) bands to transmit information between secondary transmitters and receivers. Next, we solve the optimal position of the UAV that maximizes the relay channel capacity, and propose an algorithm to design two trajectories of UAV (a straight and an elliptical trajectory) using the derived solution. Numerical results show that the straight trajectory is better in terms of harvested energy and channel capacity.

### 요 약

무인 항공기(UAV) 지원 중계는 분포가 쉽고 통신 채널이 양호하며, 이동성이 뛰어나 기존 지상 중계에 비해 높은 무선 연결성을 가질 수 있다. 본 논문에서는 무선 주파수(RF) 대역을 활용하여 소스에서 에너지를 수확하고 테라헤르츠(THz) 대역을 활용하여 2차 송신기와 해당 수신기 간에 정보를 전송할 수 있는 UAV 지원 중계 네트워크를 설계한다. 그 후, 릴레이 채널 용량을 최대화하는 UAV의 최적 위치를 결정하기 위한 최적화 문제의 해를 유도하고, 유도된 해를 활용하여 두 가지 UAV 궤적(직선 궤적과 타원 궤적)을 설계하는 알고리즘을 제안한다. 시뮬레이션 결과, 제안된 알고리즘은 UAV 직선 궤도가 수확된 에너지 및 채널 용량 측면에서 더 나은 시스템 성능을 제공할 수 있음을 보여준다.

*Key words* : Unmanned aerial vehicle, Terahertz communication, Energy Harvesting, Trajectory, Finite block-length

### 1. 서론

테라헤르츠(THz) 대역으로 알려진 275-10,000 GHz 대역은 날로 증가하는 데이터 트래픽을 지원하기 위한

신규 주파수 대역 확보의 어려움을 완화하기 위한 실현 가능한 옵션으로 주목받고 있다[1]. Beyond fifth-generation(B5G) 무선 네트워크의 더 높은 처리량, 매우 안정적인 통신, 연결 장치의 고밀도 등 몇 가지 주요

\* Dept. of Electronic Engineering, Hanbat National University

★ Corresponding author

Email : [hsjo@hanbat.ac.kr](mailto:hsjo@hanbat.ac.kr), Tel : +82-42-821-1132

※ Acknowledgment

This research was supported by the research fund of Hanbat National University in 2022.

Manuscript received Oct. 12, 2023; revised Oct. 16, 2023; accepted Oct. 19, 2023.

This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.

목표를 지원하려면 통신을 위한 더 넓은 대역을 확보해야 하는데, 이는 THz 대역 이하의 주파수로는 실현하기 어렵다. 또한, 이 대역은 파장이 짧아 안테나의 소형화가 가능하다는 장점을 가진다. 이로 인해 다용도 및 소형화가 필요한 무인 항공기(UAV), 차량 네트워크와 같은 시스템의 고속 무선 통신에 사용될 수 있으며, 주파수 재사용 기술을 통해 스펙트럼 부족 문제를 완화하고 인지 무선(CR) 네트워크 형태로 구현할 수 있다[2].

[3]의 저자들은 매크로 셀의 가시/비가시(LOS/NLOS) 확률과 피코 셀의 LOS/NLOS 확률을 UAV의 커버리지 확률 및 영역 스펙트럼 효율과 함께 사용하여 LOS 및 NLOS 기반 채널 구성 요소 모델을 개발, UAV 기반 THz 네트워크를 제시하였다. [4]에서는 THz 대역에서 작동하는 UAV 통신 네트워크에서 적응형 빔 제어 문제를 다루고, THz 대역에서 작동하는 무선 연결의 중단 위험을 줄이기 위해 LeTera라는 빔 제어 접근 방식을 제안했다.

선행 연구[4, 5, 6]에서는 블록 길이, 복호화 확률이 존재하지 않는 확률, 기하학 정리, 또는 전통적인 무한한 블록 길이(infinite block-length, IBL) 정리를 사용하여 THz 링크를 통해 UAV 지원 통신을 구축하고 시스템 성능을 향상시켰는데, 이는 매우 짧은 길이의 데이터 블록을 전송해야 하는 초저지연 통신 시스템에는 적용이 어렵다. 따라서 본 논문에서는 이러한 접근 방식과 달리 초저지연 통신을 평가하기 위해 유한 블록 길이(finite block-length, FBL) 정리를 고려하였다. FBL 정리를 사용하여 UAV가 decode and forward(DF) 릴레이로 동작하는 릴레이 통신 채널 용량의 식을 도출한다. 마지막으로, 최대 채널 용량을 지원하기 위한 UAV 위치 최적화 기법을 제안한다. 해당 최적화 문제는 일반적으로 풀기 어려운 non-convex 문제이며, 본 논문에서는 라그랑주 승수와 카루시-쿤-터커(KKT)조건, 그리고 크래머 공식을 적용하여 이를 해결한다. 또한 이를 바탕으로 직선 궤적과 타원 궤적, 두 가지 궤도설계 알고리즘을 제안하고, 각 궤적에 따른 통신 성능을 분석한다.

## II. 시스템 모델

### 1. 네트워크 구성 및 주요가정

본 논문에서는 무인비행체 중계 네트워크가 기본 네트워크와 허가된 스펙트럼을 공유한다고 가정하며, 네트워크 모델은 협력적 스펙트럼 공유 접근 방식에 기반한다 [7]. 그림 1의 네트워크는 1차, 2차 네트워크로 구성되며

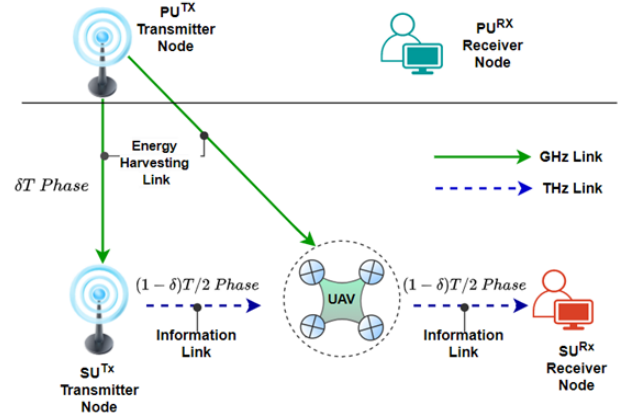


Fig. 1. System model.

그림 1. 시스템 모델

1차 네트워크는 1차 송신기( $PU^{Tx}$ )와 수신기( $PU^{Rx}$ )로 구성되며, 2차 네트워크는 2차 송신기( $SU^{Tx}$ ), 수신기( $SU^{Rx}$ ) 및 UAV 릴레이로 구성된다. 모든 장치는 단일 안테나를 가정한다. UAV는 DF 프로토콜을 사용하여  $SU^{Tx}$ 에서  $SU^{Rx}$ 로 데이터를 처리하고 전송한다.

2차 사용자인  $SU^{Tx}$ ,  $SU^{Rx}$ , UAV는 허가된 스펙트럼에 기회적으로 액세스하여 해당 통신 링크를 구축하고  $PU^{Rx}$ 에 대한 간섭을 방지한다.  $PU^{Rx}$ 를 보호하기 위해, 2차 사용자는 송수신 신호 모두에 대해 두 개의 서로 다른 주파수를 사용할 수 있다고 가정한다. 따라서 1차 네트워크는 RF 대역에서 작동하고 2차 네트워크는 RF 또는 THz 대역에서 동작한다. 즉 2차 네트워크의 기기는 에너지 수확을 위한 RF 대역과 2차 네트워크의 정보 전송을 위한 THz 대역을 활용한다.

전송 프로토콜은 두 개의 시구간으로 구분한다[7]. 첫 번째 주기  $\delta T$ 는  $SU^{Tx}$ 와 UAV의 에너지 수확에 사용되며, 여기서  $T$ 는 전체 전송 시간이고  $\delta$ 는 에너지 수확을 위한 시간비율을 의미한다. 나머지 전송 시간  $(1-\delta)T$ 는  $SU^{Tx}$ 에서 UAV로의 정보전송과 UAV에서  $SU^{Rx}$ 로의 정보전송의 두 가지 동일 시구간 단계로 나뉜다.

### 2. 채널모델

#### 가. RF 링크

정밀한 채널 모델 수립을 위해 RF 링크는  $PU^{Tx}$ 와 UAV 간의 지상 대 공중(g2a) 링크와  $PU^{Tx}$ 와  $SU^{Tx}$  간의 지상 대 지상(g2g) 링크로 구분한다.

g2a 링크에서  $PU^{Tx}$ 와 UAV 사이의 채널 이득은 다음과 같이 계산된다[8].

$$\|h_{pu}\|^2 = \beta_g g^2 / (d_{pu}^{3d})^2, \quad (1)$$

여기서  $\beta_g = (c/4\pi f_g)^2$ 로 기준 거리(1m)에서의 채널 이득을 나타내며,  $c$ 는 빛의 속도,  $f_g$ 는 RF 링크의 반송파 주파수,  $d_{pu}^{3d}$ 는 PU<sup>Tx</sup>와 UAV 사이의 직선거리를 의미한다.  $g$ 는 소규모 채널 계수이며 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$g = \sqrt{\kappa/(1+\kappa)} \tilde{g}_l + \sqrt{1/(1+\kappa)} \tilde{g}_n, \quad (2)$$

여기서  $\tilde{g}_l$ 은  $|\tilde{g}_l|=1$ 인 LOS 링크이고,  $\tilde{g}_n$ 은 평균이 0이고 분산이 1인 NLOS 링크,  $\kappa$ 는 라이시안 계수이다. g2g 링크에서 PU<sup>Tx</sup>와 SU<sup>Tx</sup> 사이의 채널 이득은 다음과 같이 계산할 수 있다[8].

$$\|h_{ps}\|^2 = \beta_g (g)^2 / (d_{ps}^{3d})^\epsilon, \quad (3)$$

여기서  $\epsilon$ 은 경로 손실 지수,  $d_{ps}^{3d}$ 는 PU<sup>Tx</sup>와 UAV 사이의 직선거리이다.

#### 나. THz 링크

RF 링크와 마찬가지로 THz 링크는 SU<sup>Tx</sup>와 UAV 사이의 g2a 링크, UAV와 SU<sup>Rx</sup> 사이의 공중 대 지상(a2g) 링크로 구성되며, 확산 손실과 분자 흡수 손실에 의해 결정된다. 확산 손실은 매체를 통한 파동의 전파 특성으로 인한 감쇠로, THz 대역의 수증기 및 산소로 인한 분자 공명으로 인해 매우 높은 대기 가스의 분자 흡수 손실을 가진다.

g2a 링크에서 SU<sup>Tx</sup>와 UAV 사이의 채널 이득은 다음과 같이 계산된다[9].

$$\|h_{su}\|^2 = \beta_t \exp(-A_c d_{su}^{3d}) / (d_{su}^{3d})^2, \quad (4)$$

여기서  $\beta_t = (c/4\pi f_t)^2$ 이며,  $f_t$ 는 THz 링크의 반송파 주파수를 의미한다.  $d_{su}^{3d}$ 는 SU<sup>Tx</sup>와 UAV 사이의 직선거리이며,  $A_c$ 는 분자 흡수 계수이다.

a2g 링크에서 UAV와 SU<sup>Rx</sup> 사이의 채널 이득은 다음과 같이 계산된다[9].

$$\|h_{us}\|^2 = S_c \beta_t \exp(-A_c d_{us}^{3d}) / (d_{us}^{3d})^2, \quad (5)$$

여기서,  $S_c$ 는 반사파의 산란 손실 계수로  $S_c = \exp(-8(\pi f_t h_s \cos(\theta)/c)^2)$ 이다.  $h_{rms}$ 는 표면의 제곱평균제곱근(root-mean-square) 높이이다.  $\theta$ 는 거친 표면에 대한 법선에 대한 입사파 각도이다.  $d_{us}^{3d}$ 는 UAV와 SU<sup>Rx</sup> 사이의 직선거리이다.

### III. UAV 채널 용량 및 궤도 설계

#### 1. 에너지 수확을 활용하는 정보전송

$\delta T$  주기에서 PU<sup>Tx</sup>는 에너지를 SU<sup>Tx</sup>와 UAV로 전송하며, SU<sup>Tx</sup>노드와 UAV 노드에서 각각 수확한 에너지는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$E_{SU^{Tx}} = \eta P_{pt} \|h_{ps}\|^2 \delta T, \quad (6)$$

$$E_U = \eta P_{pt} \|h_{pu}\|^2 \delta T, \quad (7)$$

여기서  $P_{pt}$ 는 PU<sup>Tx</sup>의 전송 전력을 나타내고,  $\eta$ 는 수확된 에너지의 효율이며,  $\delta T$ 는 에너지 전송 주기이다.  $\|h_{ps}\|^2$  및  $\|h_{pu}\|^2$ 은 각각 노드 PU<sup>Tx</sup>-SU<sup>Tx</sup> 및 PU<sup>Tx</sup>-UAV 간의 채널 이득을 의미한다.

본 연구에서 고려된 네트워크에서는 언더레이 방식의 스펙트럼 공유가 사용되기 때문에, 보조 사용자가 허가된 스펙트럼에 지속적으로 액세스하여 PU<sup>Rx</sup>에 대한 간섭이 사전 정의된 임계값 이하가 되도록 보장한다. 따라서 SU<sup>Tx</sup> 및 UAV의 송신 전력은 피크 간섭 전력  $I_{pp}$  이하이므로, PU<sup>Rx</sup>에 영향을 미치지 않는다. SU<sup>Tx</sup>의 전송 전력은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{SU^{Tx}} = \min\left(\frac{I_{pp}}{\|h_{sp}\|^2}, \frac{2E_{SU^{Tx}}}{(1-\delta)T}\right) \quad (8)$$

$$= \frac{2\eta\delta}{(1-\delta)} P_{pt} \|h_{ps}\|^2, \quad (9)$$

여기서  $\|h_{sp}\|^2$ 는 노드 SU<sup>Tx</sup>와 PU<sup>Rx</sup> 사이의 채널 이득이고, (8)은 RF 또는 THz 주파수에서 작동하는 에너지 수확 및 정보 전송 기간을 모두 나타내며, (9)은 RF 주파수에서 작동하는 에너지 수확 기간과 THz 주파수에서 작동하는 정보 전송 기간을 나타낸다.

비슷한 방식으로 UAV의 릴레이 특성 전송 전력은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_U = \min\left(\frac{I_{pp}}{\|h_{up}\|^2}, \frac{2E_U}{(1-\delta)T}\right) \quad (10)$$

$$= 2\eta\delta/(1-\delta) P_{pt} \|h_{pu}\|^2, \quad (11)$$

여기서  $\|h_{up}\|^2$ 은 노드 UAV와 PU<sup>Rx</sup> 사이의 채널 이득이다. (10) 및 (11)의 특성은 (8) 및 (9)와 유사하다. SU<sup>Tx</sup>와 UAV 간의 통신에서 신호 대 잡음비(SNR)는 다음과 같다.

$$\gamma_{SU^{Tx} \rightarrow U} = P_{SU^{Tx}} \|h_{su}\|^2 / \sigma_u^2, \quad (12)$$

여기서  $\|h_{su}\|^2$ 은 노드  $SU^{Tx}$ 와 UAV 사이의 채널 이득,  $\sigma_u^2$ 은 UAV 수신 잡음 전력을 의미한다. 따라서 짧은 패킷 OMA(Orthogonal Multiple Access) 시스템의 채널 용량 고려 사항을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$C_{SU^{Tx} \rightarrow U} = \frac{(1-\delta)}{2} \left[ \log_2(1 + \gamma_{SU^{Tx} \rightarrow U}) - \sqrt{\frac{D_{c1}}{l_b}} \frac{Q^{-1}(\epsilon_d)}{\log(2)} \right], \quad (13)$$

여기서  $D_{c1} = 1 - (1 + \gamma_{SU^{Tx} \rightarrow U})^{-2}$ 이며,  $\epsilon_d$ 는 디코딩 에러 확률을 의미한다. 모든 통신 단계에서 DF 릴레이 전송이 항상 성공하고 전송 실패가 없다고 가정하면,  $SU^{Rx}$ 의 성공적인 디코딩을 위한 SNR은 다음과 같다.

$$\gamma_{U \rightarrow SU^{Rx}} = P_U \|h_{us}\|^2 / \sigma_s^2, \quad (14)$$

여기서  $\|h_{us}\|^2$ 는 UAV에서  $SU^{Rx}$ 까지의 채널 이득이며,  $\sigma_s^2$ 은  $SU^{Rx}$ 의 잡음 전력이다.

위의 수학적식들을 활용하여  $SU^{Rx}$ 에 릴레이 채널 용량은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$C_{U \rightarrow SU^{Rx}} = \frac{(1-\delta)}{2} \left[ \log_2(1 + \gamma_{U \rightarrow SU^{Rx}}) - \sqrt{\frac{D_{c2}}{l_b}} \frac{Q^{-1}(\epsilon_d)}{\log(2)} \right], \quad (15)$$

여기서  $D_{c2} = 1 - (1 + \gamma_{U \rightarrow SU^{Rx}})^{-2}$ 이다.

## 2. 최대 채널 용량을 위한 UAV 위치 최적화

$L_u = (x_u, y_u)$ 는 드론의 수평 좌표를 나타낸다. 또한,  $v_m$ 은 최대 비행 속도이고  $T$ 는 총 비행 시간을 의미한다.  $T$ 는  $N = \{1, 2, \dots, N\}$ 으로 표시되는  $N$ 개의 동일한 시간 슬롯으로 나뉜다. 따라서  $L_u[1]$ 과  $L_u[M]$ 은 각각 첫 번째와 마지막 타임 슬롯의 시작 시점에 있는 UAV의 위치를 의미하며, UAV 궤적은  $L_u = \{L_u[1], L_u[2], \dots, L_u[M]\}$ 로 표현할 수 있다. 한 타임 슬롯 동안 UAV가 이동할 수 있는 거리는 최대 속도에 의해 조절되며 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\|L_u(t) - L_u(t-1)\|^2 \leq (v_m A)^2, 1 \leq t \leq T \quad (16)$$

여기서  $A = T/N$ 이다. 릴레이 채널 용량은 네트워크 시나리오에 따라  $SU^{Tx}$ 와 UAV간의 채널 용량과 UAV와  $SU^{Rx}$  간의 채널 용량 중 낮은 채널 용량에 의해 결정된다. 이러한 채널 용량을 최대화할 수 있는 UAV의 최적 위치를 구하기 위한 최적화 문제는 다음과 같이 정의할 수 있다.

Table 1. UAV Trajectory Design Algorithm.

표 1. UAV 궤적 설계 알고리즘

UAV Trajectory Algorithm 1
<p><b>Initialization:</b> Given <math>xy = [x_u^i; y_u^i] = [110; 250]</math></p> <p><b>Results:</b> Determine the optimal UAV location <math>xy = [x_u^o; y_u^o] = [x_u^*; y_u^*]</math> using <b>Theorem</b></p> <p><b>Iteration</b></p> <p><b>for</b> <math>n = 1 : N</math> <b>do</b></p> <p style="padding-left: 20px;"><math>xy(n, 1) = x_u^i(1) + (n-1) * (x_u^o(1) - x_u^i(1)) / (N-1);</math></p> <p style="padding-left: 20px;"><math>xy(n, 2) = x_u^i(2) + (n-1) * (x_u^o(2) - x_u^i(2)) / (N-1);</math></p>
UAV Trajectory Algorithm 2
<p><b>Initialization:</b> Given <math>xy = [x_u^i; y_u^i] = [110; 250]</math>.</p> <p><b>Results:</b> Determine the optimal UAV location <math>xy = [x_u^o; y_u^o] = [x_u^*; y_u^*]</math> using <b>Theorem</b></p> <p><b>Iteration</b></p> <p><math>C = 0.75; A = 0.5 * \sqrt{(x_u^o - x_u^i)^2 + (y_u^o - y_u^i)^2}; B = A \sqrt{1 - C^2};</math></p> <p><b>for</b> <math>n = 0 : \frac{(2\pi)}{N} : 2\pi</math> <b>do</b></p> <p style="padding-left: 20px;"><math>X = A * \cos(n); Y = B * \cos(n);</math></p> <p style="padding-left: 20px;"><math>\theta = \tan^{-1}((y_u^o - y_u^i) / (x_u^o - x_u^i));</math></p> <p style="padding-left: 20px;"><math>xy(n, 1) = (x_u^o + x_u^i) / 2 + X * \cos(\theta) - Y * \sin(\theta);</math></p> <p style="padding-left: 20px;"><math>xy(n, 2) = (y_u^o + y_u^i) / 2 + X * \sin(\theta) - Y * \cos(\theta);</math></p>

$$\max_{x_u, y_u} \min(C_{SU^{Tx} \rightarrow U}, C_{U \rightarrow SU^{Rx}}). \quad (17)$$

새로운 보조 결정 변수  $Z$ 를 도입하면 최적화 문제를 다음과 같이 재구성할 수 있다.

$$\begin{aligned} \max_{x_u, y_u, Z} \quad & Z \\ \text{s.t.} \quad & Z \leq C_{SU^{Tx} \rightarrow U}, Z \leq C_{U \rightarrow SU^{Rx}}. \end{aligned} \quad (18)$$

식 (12), (14)에 제시된 SNR 수식과 (13), (15)에 제시된 채널 용량 수식을 활용하여 위의 최적화 문제를 다음과 같이 유도한다.

$$\begin{aligned} \max_{x_u, y_u, Z} \quad & Z \\ \text{s.t.} \quad & Z \leq \frac{\beta_g(g)^2}{(d_{ps}^{\beta_d})^\epsilon} \frac{\beta_t}{(d_{su}^{\beta_d})^2} \exp(-A_c d_{su}^{\beta_d}) \\ & Z \leq \frac{\beta_g(g)^2}{(d_{pu}^{\beta_d})^\epsilon} \frac{S_c \beta_t}{(d_{us}^{\beta_d})^2} \exp(-A_c d_{us}^{\beta_d}). \end{aligned} \quad (19)$$

(19)의 두 제약 조건은  $(x_u, y_u)$ 에 대한 convex / non-convex 함수이며, 따라서 (19)의 non-convex 최적화 문제에 대한 해를 찾기 어렵다. 이 문제를 해결하기 위해  $PU^{Tx}$ ,  $SU^{Tx}$ ,  $SU^{Rx}$ 가 형성하는 영역 내로 한정하여 UAV의 최적 위치를 결정한다. 또한  $PU^{Tx}$ ,  $SU^{Tx}$ ,  $SU^{Rx}$ 의 위치가 고정되어 있고, UAV가  $PU^{Tx}$ ,  $SU^{Tx}$ ,  $SU^{Rx}$ 의 위치

를 알고 있다고 가정한다.

**Theorem :** UAV 위치의 최적해는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$x_u^* = \frac{\Delta_x}{\Delta}, \quad y_u^* = \frac{\Delta_y}{\Delta} \quad (20)$$

여기서  $\Delta = |c_{u11}c_{u22} - c_{u12}c_{u21}|$ ,  $\Delta_x = |c_{u1}c_{u22} - c_{u2}c_{u12}|$ ,  $\Delta_y = |c_{u2}c_{u11} - c_{u1}c_{u21}|$ ,  $c_{u11} = 2(x_{sr} - x_{st})$ ,  $c_{u12} = 2(y_{sr} - y_{st})$ ,  $c_{u21} = 2(x_{pt} - x_{st})$ ,  $c_{u22} = 2(y_{pt} - y_{st})$ ,  $c_{u1} = (x_{sr})^2 + (y_{sr})^2 - (x_{st})^2 - (y_{st})^2 + (z_{sr} - z_u)^2 - (z_{st} - z_u)^2 + \frac{\beta_t\beta_g(g)^2}{z(d_{ps}^{3d})^2} - \frac{S_c\beta_t\beta_g(g)^2}{z}$ ,  $c_{u2} = (x_{pt})^2 + (y_{pt})^2 - (x_{st})^2 - (y_{st})^2 + (z_{pt} - z_u)^2 - (z_{st} - z_u)^2 + \beta_t\beta_g(g)^2/z(d_{ps}^{3d})^2 - 1$ 이다.

**Proof :** UAV 위치의 최적 해는 다음과 같이 표현할 수 있다. (19)은 다음과 같이 변형된다.

$$\begin{aligned} \max_{x_u, y_u, Z} Z & \quad (21) \\ \text{s.t. } (d_{su}^{3d})^2 & \leq \frac{\beta_t\beta_g(g)^2}{z(d_{ps}^{3d})^2} \\ (d_{us}^{3d})^2 \cdot (d_{pu}^{3d})^2 & \leq \frac{S_c\beta_t\beta_g(g)^2}{z}. \end{aligned}$$

위 수식에 대한 라그랑지안은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mathcal{L}(x_u, y_u) = Z + \delta_1 \left[ (d_{su}^{3d})^2 - \frac{\beta_t\beta_g(g)^2}{z(d_{ps}^{3d})^2} \right] & \quad (22) \\ + \delta_2 \left[ (d_{pu}^{3d})^2 \cdot (d_{us}^{3d})^2 - \frac{S_c\beta_t\beta_g(g)^2}{z} \right], \end{aligned}$$

여기서  $\delta_1$ 과  $\delta_2$ 은 라그랑주 승수이다. (22)의 값이 0인 방정식과 KKT 조건 방정식들의 해를 구하면 최종적으로 (20)을 얻을 수 있다.

다음으로 위의 정리에 따라 결정된 UAV 최적 위치 기반으로 직선 궤적을 설계한다. 우선 UAV가 초기 위치와 목표 위치 사이의 최단 경로는 UAV의 직선 궤적으로 표 1에 표시된다. 다음으로, 표 1에 추가로 시계 반대 방향 타원형 궤적을 설계한다. 타원형 궤적은  $PU^{Tx}$ 가 방출하는 높은 에너지의 수확을 고려하여 설계한다. 우선 알고리즘 1과 동일하게 UAV의 초기 위치와 최적 위치를 기반으로 타원형 궤적을 설계한다.

#### IV. 성능평가 및 분석

시뮬레이션을 위해  $200 \times 400 \text{ m}^2$ 의 영역 내의 무선

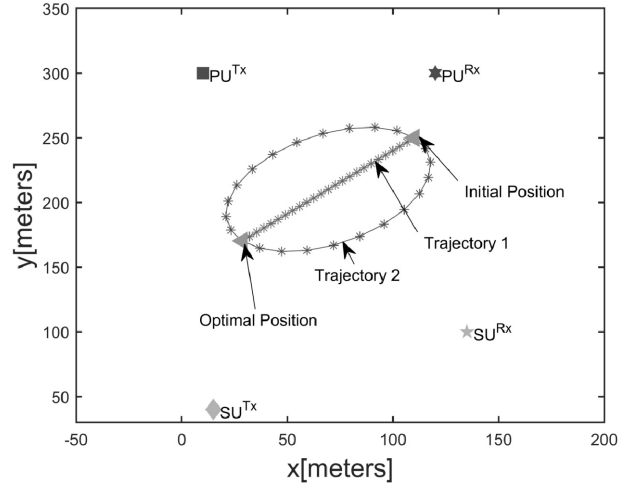


Fig. 2. UAV optimal position and two types of trajectories (straight, elliptical).

그림 2. UAV 최적위치 및 두 종류의 궤적(직선, 타원)

네트워크를 위한 UAV,  $SU^{Tx}$ ,  $SU^{Rx}$ ,  $PU^{Tx}$ ,  $PU^{Rx}$  모두 각 1대가 있는 경우를 고려한다. 주파수는  $f_g = 3.5 \text{ GHz}$  및  $f_t = 1 \text{ THz}$ 로 설정한다.  $\omega = 1 \text{ MHz}$ ,  $l_b = 32 \text{ bytes}$ ,  $\epsilon_d = 10^{-9}$ ,  $\eta = 0.5$ ,  $\delta = 0.5$ ,  $T = 0.125 \text{ ms}$ ,  $P_{pt} = 1000 \text{ KW}$ ,  $N_0 = -174 \text{ dBm}$ ,  $\theta = 45$ ,  $h_s = 0.3 \text{ km}$ ,  $A_c = 0.0016 \text{ m}^{-1}$  및  $\sigma_u^2 = \sigma_s^2 = \omega N_0$ 를 가정한다.

그림 2와 같이  $200 \times 400 \text{ m}^2$ 의 2차원 평면 내에서  $SU^{Tx} = (15, 40, 10)$ ,  $SU^{Rx} = (135, 100, 5)$ ,  $PU^{Tx} = (10, 300, 10)$ ,  $PU^{Rx} = (120, 300, 5)$  좌표에 위치하며, UAV의 초기 위치는  $UAV = (110, 250, 100)$ 이다. 그림 2는 제안한 알고리즘 1과 알고리즘 2에 따른 최적의 UAV 궤적을 나타낸 것으로, UAV 총 비행 시간인  $T = 50$ 초를 슬롯당 비행 시간 2초인  $N = 25$ 개의 시간 슬롯으로 균등하게 나눈 경우이다. UAV의 초기 위치에서 최적의 위치를 먼저 결정한 후, UAV는  $PU^{Tx}$ 와  $SU^{Tx}$ 에 가까운 직선 궤적(알고리즘 1)과 타원궤적(알고리즘 2)을 비행한다. 직선 궤적에서는 최종 목적지가 최적 위치인 반면, 타원 궤적에서는 최종 목적지가 최적 위치를 가로질러 복귀하는 초기 위치가 된다.

그림 3은 두 궤적에 대해 서로 다른  $N$ 에서 식 (18)에 정의된 달성 가능한 채널 용량 그래프를 나타낸다. 채널 용량이 높을수록 시스템 성능이 향상되며, 직선 궤적의 경우  $N$ 이 증가함에 따라 채널 용량이 증가하다  $N = 17$ 부터 감소하는 것을 확인할 수 있다. 이는 거리에 따라  $PU^{Tx}$ 로부터의 에너지 수확이 감소하기 때문이다. 그러나 타원 궤적의 경우,  $N = 6$ 과  $N = 17$  두 구간에서 변곡점을 가진다. 그 이유는  $N = 6$ 과  $N = 17$  사이의 구간에서

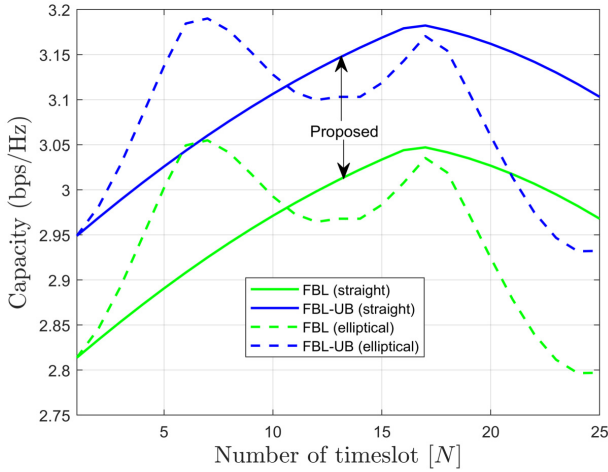


Fig. 3. Capacity variation for UAV moving time.  
그림 3. UAV 이동 시간에 따른 채널용량의 변화

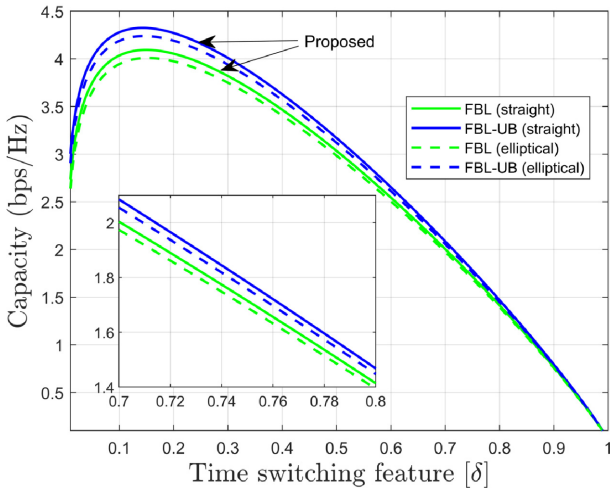


Fig. 4. Capacity variation for UAV moving time.  
그림 4. 에너지수확 용 시간비율에 따른 채널용량의 변화

$C_{U \rightarrow SU^{Rx}}$ 의 채널 용량이 감소하다 증가하기 때문이다. 예를 들어,  $N=17$ 에서 직선 궤적의 채널 용량은 3.05 bps/Hz이며, 이는 타원 궤적에서 달성한 채널 용량 (3.03 bps/Hz)보다 상대적으로 높다. 평균적으로  $SU^{Tx}$ -UAV- $SU^{Rx}$  통신 시나리오의 경우, 직선궤적이 타원궤적보다 우수하다.

그림 4는 두 궤적 모두에서 최대 1까지 확장되는 에너지 수확용 시간비율( $\delta$ )에 대한 채널 용량을 보여준다. 먼저 용량은  $\delta$ 가 증가함에 따라 증가하다가 감소한다. 그 이유는  $\delta$ 가 증가함에 따라 정보 전송 시간 슬롯이 감소하기 때문이다. 또한,  $\delta=0.15$ 에서 직선 궤적에서 달성되는 최대 채널 용량은 4.09 bps/Hz로, 타원 궤적에서 달성되는 4 bps/Hz보다 약간 높은 채널 용량을 제공한다.

## V. 결론

본 논문에서는  $SU^{Tx}$ -UAV와 UAV- $SU^{Rx}$  사이의 최소 채널 용량을 유지하는 것을 목표로 하는 최적의 UAV 위치를 유도하였다. 또한 최적위치를 목표위치로 하는 직선 및 타원형 궤적을 설계하였다. 시뮬레이션 결과를 통해, 전체 시간에서 초기 구간을 제외하면 직선 궤적이 타원형 궤적에 비해 채널 용량이 더 높음을 확인할 수 있다.

## References

- [1] K. M. S. Huq, S. A. Busari, J. Rodriguez, V. Frascolla, W. Bazzi, and D. C. Sicker, "Terahertz-enabled wireless system for beyond-5g ultra-fast networks: A brief survey," *IEEE Network*, vol.33, no.4, pp.89-95, 2019.  
DOI: 10.1109/MNET.2019.1800430
- [2] J. Wan, S. Tang, Q. Hua, D. Li, C. Liu, and J. Lloret, "Context-aware cloud robotics for material handling in cognitive industrial internet of things," *IEEE Internet of Things Journal*, vol.5, no.4, pp.2272-2281, 2017.  
DOI: 10.1109/JIOT.2017.2728722
- [3] X. Wang, P. Wang, M. Ding, Z. Lin, F. Lin, B. Vucetic, and L. Hanzo, "Performance analysis of terahertz unmanned aerial vehicular networks," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, 2020.  
DOI: 10.1109/TVT.2020.3035831
- [4] S. K. Moorthy and Z. Guan, "Letera: Stochastic beam control through esn learning in terahertz-band wireless uav networks," *IEEE INFOCOM 2020-IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, pp.1039-1044, 2020.  
DOI: 10.1109/INFOCOMWKSHPS50562.2020.9162654
- [5] A. A. Raja, M. A. Jamshed, H. Pervaiz, and S. A. Hassan, "Performance analysis of uav-assisted backhaul solutions in thz enabled hybrid heterogeneous network," *IEEE INFOCOM 2020-IEEE Conference on Computer Communications Workshops (INFOCOM WKSHPS)*, pp.628-633, 2020.

DOI: 10.1109/INFOCOMWKSHPS50562.2020.9162654

[6] S. Farrag, E. Maher, A. El-Mahdy, and F. Dressler, "Outage Probability Analysis of UAV Assisted Mobile Communications in THz Channel," *16th IEEE/IFIP Conference on Wireless On demand Network Systems and Services (WONS 2021)*. Virtual Conference: 2021.

[7] B. Ji, Y. Li, D. Cao, C. Li, S. Mumtaz, and D. Wang, "Secrecy performance analysis of uav assisted relay transmission for cognitive network with energy harvesting," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol.69, no.7, pp.7404-7415, 2020. DOI: 10.1109/TVT.2020.2995130

[8] J. H. Reed, A. W. Clegg, A. V. Padaki, T. Yang, R. Nealy, C. Dietrich, C. R. Anderson, and D. M. Mearns, "On the co-existence of td-lte and radar over 3.5 ghz band: An experimental study," *IEEE Wireless Communications Letters*, vol.5, no.4, pp.368-371, 2016.

[9] A. Moldovan, M. A. Ruder, I. F. Akyildiz, and W. H. Gerstacker, "Los and nlos channel modeling for terahertz wireless communication with scattered rays," *2014 IEEE Globecom Workshops (GC Wkshps)*, pp.388-392, 2014.

DOI: 10.1109/GCWkshps35276.2014

## BIOGRAPHY

### Yeongi Cho (Member)



2018 : BS degree in Electronic Control Engineering, Hanbat National University.

2020 : MS degree in Electronic Engineering, Hanbat National University.

2020~present : PhD candidate in Electronic Engineering, Hanbat National University.

### Saifur Rahman Sabuj (Member)



2007 : B. Sc in Electrical, Electronic and Communication Engineering from Dhaka University.

2017 : Ph.D. degree in the Graduate School of Engineering, Kochi University of Technology, Japan

2020~2022 : Postdoctoral Research Fellow in the Electronic Engineering Department at Hanbat National University, South Korea.

2018~present : Assistant Professor at Brac University, Bangladesh.

### Han-Shin Jo (Member)



2001 : BS degree in Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University.

2004 : MS degree in Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University.

2009 : PhD degree in Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University.

2009 : Post-Doc, University of Texas at Austin.

2011 : Senior Researcher, Network Division, Samsung Electronics.

2012~Present : Professor, Department of Electronic Engineering, Hanbat National University.