JKIICE Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering

한국정보통신학회논문지 Vol. 24, No. 12: 1639~1645, Dec. 2020

두 UAV를 활용하는 데이터 페리 기반의 가상 전이중 중계전송 기법

우동혁[1] · 황호영[2*]

A Data Ferrying-Based Virtual Full-Duplex Relaying Scheme with Two UAVs

Dong Hyuck Woo[1] · Ho Young Hwang[2*]

[1]Graduate Student, Department of Computer Engineering, Kwangwoon University, Seoul, 01897 Korea
[2*]Professor, School of Computer and Information Engineering, Kwangwoon University, Seoul, 01897 Korea

요 약

본 논문에서는 2개의 UAV(Unmanned Aerial Vehicle)를 중계기로 활용하는 데이터 페리 기반의 가상 전이중 중계전송 기법을 제안한다. 제안하는 기법은 2개의 UAV의 높은 이동성을 활용하여 데이터 페리 기반으로 통신하고자 하는 대상과의 거리를 좁힌 후 송수신을 진행한다. 또한, 제안하는 기법은 가상 전이중 중계전송을 통해 반이중 중계전송의 성능 제약 및 전이중 중계전송의 구현 제약을 극복할 수 있다. 또한, IRI(Inter-Relay Interference)에 의한 성능 제약을 완화하기 위해 2개의 UAV에 대한 이동경로의 중심점을 조절하는 알고리즘도 제안한다. 시뮬레이션을 통해 제안하는 중심점 조절 알고리즘에 의한 중심점 이동 결과를 보인다. 제안하는 기법의 성능 평가를 진행한 결과, 기존의 고정된 중계기를 활용한 중계전송 방식에 비해 제안하는 중계전송 기법에서 더 높은 시스템 종단 간 평균 SE (Spectral Efficiency) 성능이 나타났다.

ABSTRACT

In this paper, we propose a virtual full-duplex relaying scheme based on data ferrying using two unmanned aerial vehicles (UAVs). By utilizing high mobility of two UAVs, the proposed relaying scheme can make each UAV communicate with a source node or a destination node when the UAV is near the source node or the destination node. The proposed relaying scheme can overcome the performance limitations of the half-duplex relaying and the implementation constraints of the full-duplex relaying. In addition, we propose an algorithm to shift the center point of two UAVs' trajectory with consideration of inter-relay interference (IRI). We show the simulation results of our proposed trajectory's center point shift algorithm. From the simulation results, it is shown that our proposed relaying scheme can achieve higher end-to-end spectral efficiency (SE) than the conventional static relaying scheme.

키워드 : 무인 항공기, 중계기, 데이터 페리, 가상 전이중

Keywords : UAV, Relay, Data ferrying, Virtual full-duplex

Received 8 September 2020, **Revised** 25 September 2020, **Accepted** 6 October 2020

***Corresponding Author** Ho Young Hwang(E-mail:hyhwang@kw.ac.kr, Tel:+82-2-940-8265)
Professor, School of Computer and Information Engineering, Kwangwoon University, Seoul, 01897 Korea

Open Access http://doi.org/10.6109/jkiice.2020.24.12.1639 print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

ⓒThis is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/li-censes/by-nc/3.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright Ⓒ The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

Ⅰ. 서 론

중계기를 활용한 통신 방식은 네트워크의 커버리지를 늘림과 동시에 데이터 전송률 증가 및 신뢰성 있는 전송을 가능하게 한다[1, 2]. 이러한 중계전송은 데이터를 어떠한 방식으로 송수신 하는지에 따라, 반이중(Half-Duplex) 중계전송과 전이중(Full-Duplex) 중계전송으로 구분할 수 있다. 반이중 중계전송의 경우, 시스템에 위치한 중계기가 특정 시간에 데이터의 송신 혹은 수신 중 하나의 작업만 수행하는 중계전송 방식을 의미한다. 반면, 전이중 중계전송의 경우, 데이터의 송신과 수신을 동시에 진행함에 따라, 반이중 중계전송보다 이론상 2배 높은 SE(Spectral Efficiency)를 달성할 수 있는 중계전송 방식을 의미한다. 하지만, 전이중 중계전송의 경우, SI(Self-Interference)로 인해 현실적으로 구현에 제약이 존재한다[3-5]. 이러한 SI의 영향을 받지 않음과 동시에, 반이중 중계전송의 성능 제약으로부터 벗어나기 위해 가상 전이중(Virtual Full-Duplex) 중계전송에 대한 연구가 이루어져 왔다[6-8]. 해당 중계전송 방식은 두 개 이상의 중계기를 활용하여 데이터의 송신과 수신을 동시에 진행하되, 이들 각각을 다른 중계기에서 진행하는 중계전송 방식을 의미한다. 가상 전이중 중계전송의 경우, IRI(Inter-Relay Interference)가 발생하는 문제점을 가지고 있지만, 송신 안테나와 수신 안테나가 서로 다른 중계기에 분산되어 위치함에 따라[3, 9], 안테나 간 이격거리가 크기 때문에 SI에 비해 세기가 약하며 제거하기 용이하다[9]. 해당 IRI를 제거 혹은 완화하는 방식에 대한 연구는 논문[10, 11]에서 진행되어 왔다.

최근 UAV(Unmanned Aerial Vehicle)의 비용이 낮아져 운용이 용이해짐에 따라[12], 해당 UAV를 중계기로 활용하는 연구들이 활발하게 진행되고 있다. UAV를 중계기로 활용할 경우, UAV의 높은 이동성을 고려함에 따라, 기존의 고정된 중계기를 활용한 중계전송 대비 성능상 이점을 가질 수 있다. UAV의 높은 이동성을 활용하여, UAV가 소스노드로부터 데이터를 수신하는 경우, UAV를 소스노드와 가깝게 이동시켜 데이터를 수신하도록 하고, 수신한 데이터를 목적노드에 송신할 경우, UAV를 목적노드와 가깝게 이동시켜 송신하게 함으로써, 경로 손실을 줄이는 데이터 페리(Data Ferrying) 관련 연구가 논문[13]에서 진행되었다. 이와 관련된 연구[14-16]들은 아래의 표 1과 같다.

Table. 1 Some related works on data ferrying

	Relaying scheme	Relay mode	Trajectory	Objectives
[14]	HD	DF[1]	Circle	Max SE, EE[3]
[15]	HD	DF	Flexible	Max SEE[4]
[16]	FD	AF[2]	Straight	Max EE

[1] DF(Decode-and-Forward), [2] AF(Amplify-and-Forward)
[3] EE(Energy Efficiency), [4] SEE(Secrecy Energy Efficiency)

본 논문에서는 전이중 중계전송에서 발생하는 SI의 영향을 받지 않음과 동시에, 반이중 중계전송의 성능 제약으로부터 벗어나기 위해, 데이터 페리 방식 기반의 2개의 UAV를 활용하는 가상 전이중 중계전송 기법을 제안한다. 또한, 2개의 UAV에서의 가상 전이중 중계전송에 따라 발생하는 IRI에 의한 성능 제약을 완화하기 위하여, 이들 UAV에 대한 이동 경로의 중심점을 조절하는 알고리즘을 제안한다. 시뮬레이션 결과를 통해 제안하는 2개의 UAV를 활용하는 가상 전이중 중계전송 기법이 기존의 중계전송 기법보다 더 높은 종단 간 평균 SE를 나타냄을 보인다.

Ⅱ. 시스템 모델

그림 1은 본 논문에서 제안하는 2개의 UAV를 활용하는 가상 전이중 중계전송 기법을 위한 시스템 모델을 나타낸다. 본 시스템 모델에서는 소스노드(S), 2개의 UAV, 그리고 목적노드(D)가 위치해 있다. 각각의 UAV는 반이중 중계기를 탑재하여, S와 D 간의 통신을 중계하는 역할을 수행한다. 이 때, S와 D 간의 직접적인 통신은 불가능한 상황이라고 가정한다[9, 15]. 또한, S 혹은 D는 특정 시간 t에서 하나의 UAV와 통신을 수

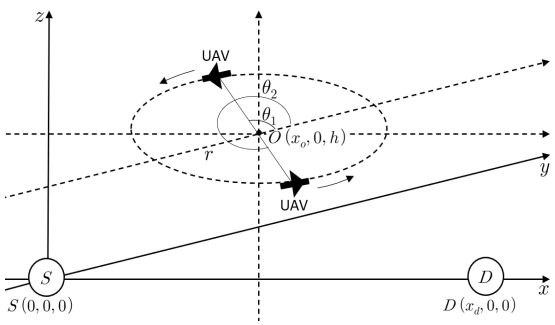

Fig. 1 The system model of the proposed scheme

행한다고 가정한다. 2개의 UAV는 에너지 효율적인 경로라고 알려져 있는 원의 경로를 따라 이동한다[14]. 2개의 UAV는 동일 경로를 따라 이동하며, 이 때 경로, 즉, 원의 반경은 r이다. 동일한 높이(h)에서 2개의 UAV가 지속적으로 운용되기 위해서는 서로 간의 충돌이 발생하지 않아야 하며, 이를 위해서 UAV의 속도(v)는 동일하다고 가정한다. 실제 운용 시 속도가 조금 어긋남으로 인해 발생할 수 있는 충돌은 카메라와 센서를 통한 감지 및 UAV 간 위치 정보 교환 등의 충돌 방지 기법을 통해 방지된다고 가정한다[17, 18]. S의 위치는 $(0,0,0)$, D의 위치는 $(x_d,0,0)$이며, 이들 UAV의 이동 경로에 대한 중심점의 위치는 $(x_o,0,h)$이다. 그림 1에 따라, 특정 시간 t에서 2개의 UAV의 위치는 각각 $(x_o-rsin(\theta_1+vt),\ rcos(\theta_1+vt),\ h)$, $(x_o-rsin(\theta_2+vt),\ rcos(\theta_2+vt),\ h)$로 나타낼 수 있다. 2개의 UAV는 GT(Ground Terminal)보다 높은 곳에 위치해 있기 때문에, UAV와 GT 간의 통신은 장애물로부터 방해받지 않는 LOS(Line-of-sight) 채널을 통해 이루어진다고 가정한다[15]. UAV의 이동으로 인해 발생하는 도플러 효과는 무시한다[19]. 이에 따라, 본 시스템 모델에서 UAV 이동 경로의 중심점의 x 좌표가 x_o일 때 특정 시간 t에서의 $\{i \rightarrow j\}$ 링크에 대한 채널 이득은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$g_{ij}(x_o,t) = kd_{ij}^{-2}(x_o,t) \tag{1}$$

이 때, k는 거리가 1m일 때의 채널 이득을 의미하며, $d_{ij}(x_o,t)$는 UAV 이동 경로의 중심점의 x 좌표가 x_o일 때 특정 시간 t에서 노드 i와 j 간의 거리를 의미한다.

본 논문에서는 전이중 중계전송 시 발생하는 SI의 영향으로부터 벗어남과 동시에, 반이중 중계전송보다 높은 SE를 달성하기 위하여, 가상 전이중 중계전송 기법 중의 하나인 SuR(Successive Relaying)[6]의 개념을 접목하여 사용한다. 그림 2는 기존의 중계 시스템 모델에서 SuR을 사용하여 통신하는 상황을 나타낸다.

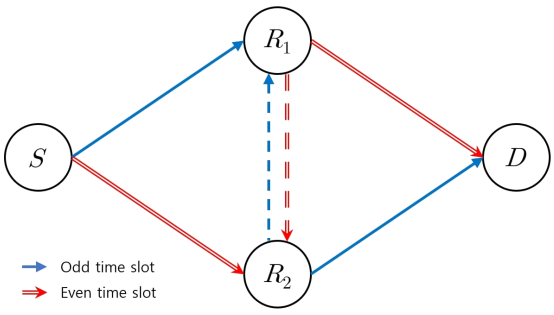

Fig. 2 Successive Relaying (SuR)

해당 중계 시스템에는 하나의 소스노드(S)와 2개의 중계기(R_1, R_2), 그리고 하나의 목적노드(D)가 위치해 있다. SuR은 홀수 슬롯에서 $\{S \rightarrow R_1\}$ 링크, $\{R_2 \rightarrow D\}$ 링크를 통한 통신을 진행하고, 짝수 슬롯에서 $\{S \rightarrow R_2\}$ 링크, $\{R_1 \rightarrow D\}$ 링크를 통한 통신을 진행한다. 시간을 슬롯 단위로 나누어 교차 전송을 진행함에 따라, 이전 슬롯에서 소스노드로부터 수신한 데이터를 바로 다음 슬롯에서 목적노드로 송신할 수 있다. 또한, 2개의 중계기를 활용하여 $\{S \rightarrow R\}$ 링크와 $\{R \rightarrow D\}$ 링크의 통신을 동시에 진행함으로써, 반이중 중계전송보다 높은 SE를 달성할 수 있으며, 전이중 중계전송에서 발생하는 SI의 영향으로부터 벗어날 수 있다. 하지만, 본 중계전송 기법의 경우, 그림 2의 점선과 같이 IRI가 발생하여, 반이중 중계전송 대비 2배의 성능을 내는데는 제약이 존재한다.

Ⅲ. 제안하는 2개의 UAV를 활용하는 데이터 페리 기반의 가상 전이중 중계전송 기법

이동성을 갖는 2개의 UAV(U)를 중계기로 활용함에 따라, 매 순간 U의 위치 변화로 인해 $\{S \rightarrow U\}$ 링크 및 $\{U \rightarrow D\}$ 링크의 환경이 달라질 수 있다. 본 논문에서는 2개의 U에 해당하는 U_1 및 U_2의 이동성을 고려하여 S 혹은 D 중에 링크 환경이 좋은 대상과의 통신을 진행하되, SuR 중계 방식을 접목하여 $\{S \rightarrow U\}$ 링크를 통한 통신 및 $\{U \rightarrow D\}$ 링크를 통한 통신이 동시에 진행되도록 하는 가상 전이중 중계전송 기법을 제안한다.

본 시스템 모델의 경우 식 (1)에 따라 U와 통신 대상 간의 거리가 가까울수록 링크 상황이 좋기 때문에, 각각의 U_1, U_2가 경로를 이동하는 과정에서 S와 가까이 위치한 경우 S로부터 데이터를 수신하고 D와 가까이 위치한 경우 D로 데이터를 송신하면 높은 SE를 달성할 수 있다. 이 때, U가 운용되는 동안 $\{S \rightarrow U\}$ 링크를 통한 수신 및 $\{U \rightarrow D\}$ 링크를 통한 송신이 동시에 이루어지도록 하기 위해, 각각의 U가 S와 통신하는 구간은 U의

이동 경로의 좌측 절반 부로 설정하고, 각각의 U가 D와 통신하는 구간은 U의 이동 경로의 우측 절반 부로 설정한다. 이와 같이 설정함에 따라, $U_1(U_2)$이 $0 \le \theta_1(\theta_2) < \pi$ 구간에서 S로부터 데이터를 수신하는 동안, $U_2(U_1)$는 $\pi \le \theta_2(\theta_1) < 2\pi$ 구간에서 D로 데이터를 송신하게 되며, 이 때, U_1, U_2 간의 위상차는 π가 된다. $U_1(U_2)$은 이동 경로의 좌측 구간에서 S로부터 데이터를 수신하다가, 이동 경로의 우측 구간에서는 앞서 S로부터 수신한 데이터를 D로 송신하게 된다. 기존의 SuR 중계전송에서는 중계기 간의 역할 교차가 시간 슬롯 단위로 이루어지는데 반해, 본 중계전송 기법에서는 구간 단위로 진행된다. 각 구간에서의 순간 SINR(Signal to Interference plus Noise Ratio)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma_{SU}(x_0,\theta) = \frac{P_S k(\sqrt{(x_0 - r\sin(\theta))^2 + (r\cos(\theta))^2 + h^2})^{-2}}{\sigma^2 + P_U k(2r)^{-2}} \quad \text{for } 0 \le \theta \le \pi \tag{2}$$

$$\gamma_{UD}(x_0,\theta) = \frac{P_U k(\sqrt{(x_0 - r\sin(\theta) - x_d)^2 + (r\cos(\theta))^2 + h^2})^{-2}}{\sigma^2} \quad \text{for } \pi \le \theta \le 2\pi \tag{3}$$

이 때, P_S는 S의 송신 전력, P_U는 U의 송신 전력을 나타내고, σ^2은 AWGN(Additive White Gaussian Noise)의 분산으로 잡음의 전력 값을 나타낸다. $\{S \rightarrow U\}$ 링크에서의 순간 SINR에는 $U1$, $U2$가 동시에 통신을 진행함에 따라 IRI가 존재한다. 해당 시스템에서 $U1$, $U2$의 위상차는 π이므로, 서로 간의 거리는 $2r$로 고정되어, 식 (1)에 따라 IRI에 대한 채널 이득은 $k(2r)^{-2}$로 나타낼 수 있다. 식 (2), (3)에 따라, 각 구간에서의 평균 SE는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\overline{R_{SU}}(x_0) = \frac{1}{\pi}\int_0^{\pi} \log_2(1 + \gamma_{SU}(x_o,\theta))\, d\theta \tag{4}$$

$$\overline{R_{UD}}(x_0) = \frac{1}{\pi}\int_{\pi}^{2\pi} \log_2(1 + \gamma_{UD}(x_o,\theta))\, d\theta \tag{5}$$

제안하는 중계전송 기법의 경우, U의 이동 경로를 절반으로 나누어, $\{S \rightarrow U\}$ 구간 및 $\{U \rightarrow D\}$ 구간별 통신을 진행하지만, U_1, U_2간 발생하는 IRI로 인해, 각 구간의 SE는 큰 차이가 발생할 수 있다. 종단 간 SE는 병목 구간의 SE에 의해 결정되기 때문에, 종단 간 SE 성능을 향상시키기 위해서는 이러한 차이가 고려될 필요가 있다. 본 논문에서는 이를 위해 그림 3과 같이 UAV 이동 경로의 중심점 조절 알고리즘을 제안한다.

그림 1에 따라, UAV의 이동 경로에 대한 중심점의 위치가 $(x_o, 0, h)$일 때, 중심점의 x 좌표인 x_o의 초기 위치는 S와 D의 정중앙에 있다고 가정하고, 식 (4), (5)에 따라 $\overline{R_{SU}}$와 $\overline{R_{UD}}$의 값을 계산하여, 해당 값들 간의 비교를 통해 중심점의 x 좌표인 x_o의 조절을 그림 3과 같이 진행한다.

그림 3에서 $\overline{R_{SU}} > \overline{R_{UD}}$인 경우, $\overline{R_{UD}}$의 증가를 위해 중심점의 x좌표인 x_o의 오른쪽 이동을 고려한다. 이 때, 중심점을 오른쪽으로 이동시킴에 따른 $\overline{R_{UD}}$의 증가를 보장하기 위해, 중심점을 이동하기 전의 $\{U \rightarrow D\}$ 구간 평균 SE($\overline{R_{UD}^{cur}}$)와 중심점을 이동하고 난 후의 $\{U \rightarrow D\}$ 구간 평균 SE($\overline{R_{UD}^{next}}$)를 비교하여, $\overline{R_{UD}^{cur}} < \overline{R_{UD}^{next}}$인 경우에 한해서 중심점을 오른쪽으로 이동시킨다. 이 때, 중심점을 이동하기에 앞서, 이동하고자 하는 위치가 일전에 방문한 위치인지 확인하여, 만약, 이미 방문한 위치라면, 반복문이 무한루프에 빠지는 것을 방지하기 위해, 중심점의 증감 폭을 줄이는 작업을 진행하고 중심점을 이동시킨다. 만약, 방문하지 않았던 위치라면, 증감 폭을 변경하지 않고 그대로 진행한다. 만약, 중심점이 오른쪽으로 이동함에 따라 $\overline{R_{UD}}$가 감소하거나, 증감 폭이 임계치보다 작거나 같은 경우, 알고리즘을 종료한다.

그림 3에서 $\overline{R_{SU}} \le \overline{R_{UD}}$인 경우, $\overline{R_{SU}}$의 증가를 위해 중심점의 왼쪽 이동을 고려한다. 이 때, 중심점을 이동하기 전의 $\{S \rightarrow U\}$ 구간 평균 SE($\overline{R_{SU}^{cur}}$)와 중심점을 이동한 후의 $\{S \rightarrow U\}$ 구간 평균 SE($\overline{R_{SU}^{next}}$)를 비교하여, $\overline{R_{SU}^{cur}} < \overline{R_{SU}^{next}}$인 경우에 한해서 중심점을 왼쪽으로 이동시킨다. 이 때, 중심점을 이동하기에 앞서, 해당 위치에 대해 일전에 방문한 위치인지 여부를 확인하여, 이미 방문한 위치라면 중심점의 증감 폭을 줄이는 작업을 진행한 후에 중심점을 이동한다. 중심점이 왼쪽으로 이동함에 따라 $\overline{R_{SU}}$가 감소하거나, 증감 폭이 임계치보다 작거나 같은 경우, 알고리즘을 종료한다.

그림 3과 같이 제안하는 알고리즘을 통해 얻어지는 UAV 이동 경로의 중심점의 x 좌표인 x_o을 식 (4), (5)에 대입하여 각 구간에서의 평균 SE인 $\overline{R_{SU}}$와 $\overline{R_{UD}}$를 구한 후, $\overline{R_{SU}}$와 $\overline{R_{UD}}$의 최소값을 계산하면, 제안하는 기법에서의 종단 간 평균 SE를 얻을 수 있다.

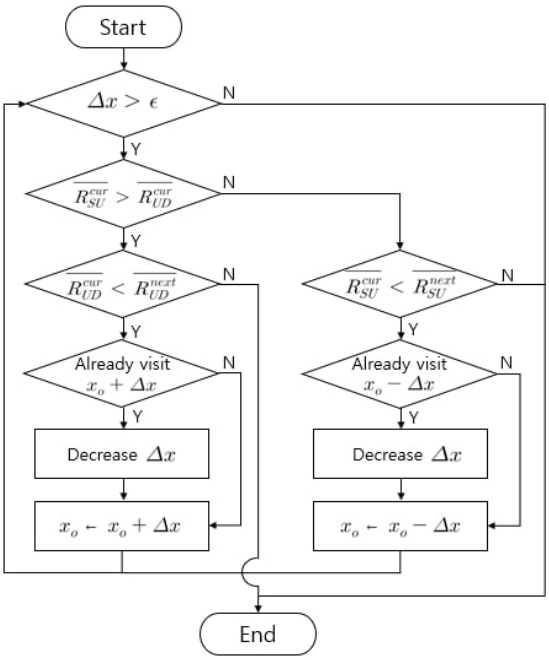

Fig. 3 Trajectory's center point shift algorithm

Ⅳ. 시뮬레이션 결과

본 장에서는 시뮬레이션을 통해 제안하는 기법의 성능을 평가한다. 그림 4에서는 U에 대한 이동 경로의 반지름(r)을 달리 적용함에 따른, 이동 경로의 중심점(x_o)에 대한 변화를 보이고, 그림 5에서는 제안하는 기법과 기존의 고정된 중계기를 통한 중계전송 기법 간의 종단 간 평균 SE를 비교한다. 이 때, S의 송신 전력(P_S)은 0.1 W, U의 송신 전력(P_U)은 0.01 W로 설정하고, S와 D 간의 거리(d_{SD})는 400 m ~ 2000 m, U의 높이(h)는 50 m로 설정한다. 또한, 거리가 1 m일 때의 채널 이득(k)은 -50 dB, 잡음의 전력(σ^2)은 -110 dBm으로 설정한다. 본 논문에서는 P_S 및 P_U를 고정하여 설정하였지만, 이는 종단 간 평균 SE 성능 저하를 야기할 수 있다. 이러한 문제를 해결하는데 있어, 앞서 이동 경로의 중심점을 조절하는 것과 같이, 송신 전력을 상황에 따라 조절하여, 달리 적용하는 방법이 사용될 수 있다. 해당 연구는 이후의 연구에서 다루고자 한다.

그림 4는 본문에서 제안하는 2개의 UAV를 활용하는 가상 전이중 중계전송 기법에서 UAV 이동 경로의 중심점 조절 알고리즘에 의한 x_o의 변화 결과를 나타낸다. 이 때, r을 각각 $d_{SD}/2$, $d_{SD}/3$, $d_{SD}/4$로 변화시키며 시뮬레이션을 진행한다. $r = d_{SD}/2$인 경우, $400\text{ m} \leq d_{SD} \leq 1050\text{ m}$ 구간에서 중심점이 왼쪽으로 이동함을 보인다. 이는 U 간 발생하는 IRI에 의해 $\overline{R_{SU}} < \overline{R_{UD}}$이기 때문에, $\overline{R_{SU}}$의 증가를 위해 중심점이 왼쪽으로 이동한 것을 나타낸다. 이 후, $1050\text{ m} < d_{SD} \leq 2000\text{ m}$ 구간의 경우, 중심점이 오른쪽으로 이동함을 보인다. 이는 d_{SD}가 증가함에 따라 U에서 송신하여 D에서 수신하는 신호의 세기가 작아져 $\overline{R_{SU}} > \overline{R_{UD}}$이 되어, $\overline{R_{UD}}$의 증가

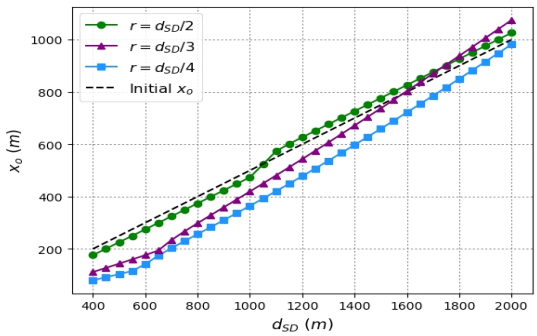

Fig. 4 Trajectory's center point with varying the values of d_{SD} and r

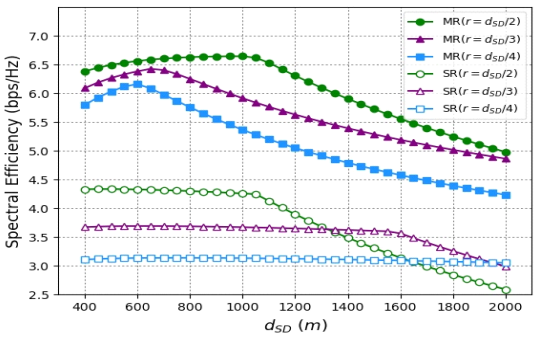

Fig. 5 Spectral efficiency of mobile relaying and static relaying with varying the values of d_{SD} and r

를 위해 중심점이 오른쪽으로 이동한 것을 나타낸다. $r = d_{SD}/3$인 경우, $400\,\mathrm{m} \le d_{SD} \le 1550\,\mathrm{m}$ 구간에서 중심점이 왼쪽으로 이동한 것을 확인할 수 있고, $1550\,\mathrm{m} < d_{SD} \le 2000\,\mathrm{m}$ 구간에서 중심점이 오른쪽으로 이동한 것을 확인할 수 있다. 각 구간에서 중심점이 이동한 이유는 $r = d_{SD}/2$인 경우와 같다. 다만, $r = d_{SD}/3$인 경우에 중심점이 왼쪽으로 이동한 구간이 더 길게 나타나는 이유는 U의 동일한 송신 전력 대비 r이 더 작게 설정되어$(d_{SD}/2 > d_{SD}/3)$, U 간 발생하는 IRI가 커져서 $\{S \rightarrow U\}$ 구간의 성능 저하가 더 긴 구간 동안 나타나기 때문이다. 이와 같은 이유로 $r = d_{SD}/4$인 경우, $400\,\mathrm{m} \le d_{SD} \le 2000\,\mathrm{m}$ 전 구간에서 중심점이 왼쪽으로 이동한 것을 확인할 수 있다.

그림 5는 본 논문에서 제안하는 2개의 UAV를 중계기로 활용하는 중계전송 기법(Mobile Relaying, MR)과 고정된 2개의 중계기를 활용한 기존의 중계전송 기법(Static Relaying, SR)의 종단 간 평균 SE에 대해 r을 각각 $d_{SD}/2$, $d_{SD}/3$, $d_{SD}/4$로 변화시킴에 따른 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 고정된 2개의 중계기를 활용한 경우 중계전송 방식은 SuR[6]을 적용하고, 이 때 고정된 2개의 중계기의 위치는 각각 $(d_{SD}/2, r, h)$, $(d_{SD}/2, -r, h)$로 설정한다. 시뮬레이션 결과, $400\,\mathrm{m} \le d_{SD} \le 2000\,\mathrm{m}$ 전 구간에서 제안하는 2개의 UAV를 중계기로 활용하는 중계전송 기법의 종단 간 평균 SE 성능이 더 높게 나타나는 것을 확인할 수 있다. 그림 5에 따르면 $r = d_{SD}/2$인 경우 제안하는 기법에서 기존의 고정된 2개의 중계기를 활용하는 기법 대비 최소 1.47배에서 최대 1.93배까지의 SE 성능 개선이 나타났다. 이는 2개 UAV의 높은 이동성을 활용하여, 링크 환경이 좋은 대상과의 통신을 진행함에 따른 결과를 나타낸다.

Ⅴ. 결 론

본 논문에서는 2개의 UAV를 중계기로 활용하여, 시스템 상에 위치한 소스노드 및 목적노드와 통신을 수행하는 데이터 페리 기반의 가상 전이중 중계전송 기법을 제안하였다. 제안하는 기법에서는 구간별 교차전송을 통해 데이터를 동시에 송수신하였다. 또한, IRI에 의한 성능 제약을 완화하기 위해 2개의 UAV에 대한 이동경로의 중심점을 조절하는 알고리즘도 제안하였다. 제안하는 중계전송 기법 및 알고리즘에 대하여, 시뮬레이션을 통해 시스템 종단 간 평균 SE 성능 평가를 진행하였다. 성능 평가를 진행한 결과, 제안하는 중계전송 기법이 기존의 고정된 중계기를 활용한 중계전송 방식에 비해 높은 종단 간 평균 SE 성능을 나타냄을 보였다.

ACKNOWLEDGEMENT

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (NRF- 2018R1D1A1B07049601) and by the Research Grant of Kwangwoon University in 2019.

REFERENCES

[1] Y. Liang and V. V. Veeravalli, “Cooperative relay broadcast channels,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 53, no. 3, pp. 900-928, Mar. 2007.

[2] S. S. Ikki and M. H. Ahmed, “Exact error probability and channel capacity of the best-relay cooperative-diversity networks,” *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 16, no. 12, pp. 1051-1054, Dec. 2009.

[3] S. Hong and G. Caire, “Virtual full-duplex relaying with half-duplex relays,” *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 61, no. 9, pp. 4700-4720, Sep. 2015.

[4] W. Wang, K. C. Teh, and K. H. Li, “Relay selection for secure successive AF relaying networks with untrusted nodes,” *IEEE Transactions on Information Forensics and Security*, vol. 11, no. 11, pp. 2466-2476, Nov. 2016.

[5] J. Wei, J. Wei, S. Hu, and W. Chen, “Successive decode-and-forward relaying with privacy-aware interference Suppression,” *IEEE Access*, vol. 8, pp. 95793-95806, Apr. 2020.

[6] B. Rankov and A. Wittneben, “Spectral efficient protocols for half-duplex fading relay channels,” *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 25, no. 2, pp. 379-389, Feb. 2007.

[7] A. Ikhlef, J. Kim, and R. Schober, “Mimicking full-duplex relaying using half-duplex relays with buffers,” *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 61, no. 7, pp.

3025-3037, Sep. 2012.

[8] N. Nomikos, D. Vouyioukas, T. Charalambous, I. Krikidis, P. Makris, D. N. Skoutas, M. Johansson, and C. Skianis, "Joint relay-pair selection for buffer-aided successive opportunistic relaying," *Transactions on Emerging Telecommunications Technologies*, vol. 25, no. 8, pp. 823-834, Nov. 2013.

[9] Q. Y. Liau, C. Y. Leow, and Z. Ding, "Physical Layer Security Using Two-Path Successive Relaying," *Sensors*, vol. 16, no. 6, pp. 846, Jun. 2016.

[10] N. Nomikos and D. Vouyioukas, "A successive opportunistic relaying protocol with inter-relay interference mitigation," in *Proceeding of the 8th International Wireless Communications and Mobile Computing Conference*, pp. 228-233, Aug. 2012.

[11] N. Nomikos, T. Charalambous, I. Krikidis, D. N. Skoutas, D. Vouyioukas, and M. Johansson, "A buffer-aided successive opportunistic relaying selection scheme with power adaptation and inter-relay interference cancellation for cooperative diversity systems," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 63, no. 5, pp. 1623 - 1634, May. 2015.

[12] Y. Zeng, R. Zhang, and T. J. Lim, "Wireless communications with unmanned aerial vehicles: Opportunities and challenges," *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 5, pp. 36-42, May. 2016.

[13] C. Cheng, P. Hsiao, H. Kung, and D. Vlah, "Maximizing throughput of UAV-relaying networks with the load-carry-and-deliver paradigm," in *Proceeding of the IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, pp. 4417-4424, Mar. 2007.

[14] J. Zhang, Y. Zeng, and R. Zhang, "Spectrum and energy efficiency maximization in UAV-enabled mobile relaying," in *Proceeding of the IEEE International Conference on Communications*, pp. 1-6, May. 2017.

[15] L. Xiao, Y. Xu, D. Yang, and Y. Zeng, "Secrecy energy efficiency maximization for UAV-enabled mobile relaying," *IEEE Transactions on Green Communications and Networking*, vol. 4, no. 1, pp. 180-193, Mar. 2020.

[16] N. Qi, M. Wang, W. Wang, T. A. Tsiftsis, R. Yao, and G. Yang, "Energy efficient full-duplex UAV relaying networks under load-carry-and-delivery scheme," *IEEE Access*, vol. 8, pp. 74349-74358, Apr. 2020.

[17] B. C. Karhoff, J. I. Limb, S. W. Oravsky, and A. D. Shephard, "Eyes in the domestic sky: An assessment of sense and avoid technology for the army's warrior unmanned aerial vehicle," in *Proceeding of the IEEE Systems and Information Engineering Design Symposium*, pp. 36-42, Apr. 2006.

[18] M. Erdelj, M. Krol, and E. Natalizio, "Wireless sensor networks and multi-UAV systems for natural disaster management," *Computer Networks*, vol. 124, pp. 72-86, Jun. 2017.

[19] X. Jiang, Z. Yin, Z. Wu, Z. Yang, and J. Sun, "Outage probability optimization for UAV-enabled wireless relay networks in fading channels," *Physical Communication*, vol. 33, pp. 35-45, Apr. 2019.

우동혁(Dong Hyuck Woo)

2019년 2월 : 광운대학교 컴퓨터공학과 학사
2019년 3월 ~ 현재 : 광운대학교 컴퓨터공학과 석사과정
※관심분야 : 이동통신시스템, 중계전송, UAV 통신 등

황호영(Ho Young Hwang)

2000년 2월 : KAIST 전자전산학과 학사
2002년 2월 : KAIST 전자전산학과 석사
2008년 2월 : KAIST 전자전산학부 박사
2002년 8월 ~ 2003년 8월 : 미국 국립표준기술연구소(NIST) 객원연구원
2008년 9월 ~ 2010년 8월 : 캐나다 워털루대학교 박사후연구원
2010년 9월 ~ 현재 : 광운대학교 컴퓨터정보공학부 교수
※관심분야 : 이동통신시스템, 무선자원관리, 센서네트워크 등