

실내 재난 환경에서 상향링크 NOMA 기반의 Fair UAV MAC 프로토콜의 성능 분석

강정화*, 김재현^o

Performance Analysis of Fair UAV MAC Protocol Based on Uplink NOMA in Indoor Disaster Environment

Junghwa Kang*, Jae-Hyun Kim^o

요약

Unmanned aerial vehicles (UAVs)는 실내 재난 상황에서 셀룰러 네트워크가 중단될 때 공중 기지국 역할을 한다. 비직교 다중접속 기술은 처리율 및 스펙트럼 효율성을 증가시키기 위한 기술로 사용되고 있다. 본 논문에서는 실내 재난 환경에서의 효율적인 통신을 위해 비직교 다중접속 기술을 사용한 UAV 스케줄링 알고리즘을 제안한다. 제안하는 알고리즘은 새로운 경로손실 모델을 고려하여 보다 현실적인 시스템 모델을 제공하며, 스케줄링을 통한 높은 처리율과 공정성을 보장한다. 시뮬레이션 결과, 제안하는 알고리즘은 기존의 MAC 프로토콜들에 비해 처리율과 fairness 측면에서 성능이 향상되는 것을 확인하였다.

Key Words : Indoor Disaster Environment, Unmanned Aerial Vehicle (UAV), Non-Orthogonal Multiple Access (NOMA), Medium Access Control (MAC)

ABSTRACT

Unmanned aerial vehicles (UAVs) serve as aerial base stations when cellular networks are disrupted in indoor disaster situations. Non-orthogonal multiple access technology is being used as a technology to increase throughput and spectrum efficiency. In this paper, we propose a UAV scheduling algorithm using non-orthogonal multiple access technology for efficient communication in indoor disaster environment. The proposed algorithm considers a realistic environment using a new path loss model. The proposed algorithm can guarantee better throughput and fairness through scheduling. In simulation results, we confirm that the proposed algorithm can improve throughput and fairness than conventional MAC protocol.

I. 서론

Unmanned aerial vehicles (UAVs)는 높은 이동성과 저렴한 비용으로 인해 군사 및 민간 통신 분야에서 널리 사용된다. 또한, UAV는 통신이 불가능한 지역에서 공중 무선 기지국 역할을 할 수 있다. 특히 재난 환경으로 인해 실내 네트워크를 활용할 수 없는 상황에서 UAV를 무선 기지국으로 활용하기 위한 연구가 진행되고 있다¹⁾. 하지만, 기존의 경로손실 모델은 건물의 층 투과를 고려하지 않고, 건물의 벽 투과만 고려하기 때문에 실제 실내 재난 환경에 적합하지 않다.

따라서, 본 논문에서는 건물의 층 투과를 고려한 새로운 경로손실 모델과 비직교 다중접속 (non-orthogonal multiple access, NOMA)을 적용한 스케줄링 MAC 프로토콜을 제안한다. UAV는 각 노드의 전송 여부를 확인하고 노드는 NOMA를 통해 UAV에게 동시에 데이터를 전송한다. 성능분석 결과, 제안하는 MAC 프로토콜이 기존보다 처리율과 fairness 측면에서 성능이 향상되는 것을 확인하였다.

※ 본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소가 지원하는 미래전투체계 네트워크기술 특화연구센터 사업의 일환으로 수행되었습니다.(UD190033ED)

• First Author : (ORCID:0000-0002-7949-6445) Ajou University Department of Artificial Intelligence Convergence Network, kjh990220@ajou.ac.kr, 학생(석사과정), 학생회원

o Corresponding Author : (ORCID:0000-0003-4716-6916) Ajou University Department of Electrical and Computer Engineering, jkim@ajou.ac.kr, 정교수, 종신회원

논문번호 : 202201-012-A-LU, Received January 20, 2022; Revised January 31, 2022; Accepted January 31, 2022

II. 시스템 모델

본 논문에서 고려하는 시스템 모델은 하나의 UAV와 N개의 실내 노드로 구성되며, 셀룰러 네트워크를 사용할 수 없는 상황이기 때문에 실내에 존재하는 노드는 UAV와 통신을 한다. UAV는 수직 이동성이 있으며, 노드는 고정된 상황을 고려하였다. 실내 노드들은 데이터를 전송할 때 비직교 쌍이 가능한 경우 UAV에게 동시에 데이터를 송신한다. UAV는 실내 노드들의 업링크를 받기 위한 최적의 위치를 찾는다. 이를 위해 UAV는 노드의 signal to interference plus noise ratio (SINR) 정보를 알고 있어야 한다. 업링크 노드의 SINR 값은 다음과 같이 표현한다.

$$SINR_{UL1} = P_{N1} + G_N + G_{UAV} - PL_{UN1} - (P_{N2} + 2 * G_N + PL_{NN12}) - \sigma^2, \quad (1)$$

$$SINR_{UL2} = P_{N2} + G_N + G_{UAV} - PL_{UN2} - \sigma^2, \quad (2)$$

P_N 은 노드의 전송 파워, G_N , G_{UAV} 는 각각 노드와 UAV의 안테나 이득, PL_{UN} 은 UAV와 업링크 노드 사이의 경로 손실, PL_{NN} 은 업링크 노드 사이의 경로 손실을 의미한다. σ^2 은 잡음을 의미한다. 기존의 실외 실내 경로 손실 식은 다음과 같다^[2].

$$PL = PL_b + PL_{tw} + PL_{in}, \quad (3)$$

PL 은 경로손실이며, PL_b 은 자유 공간 경로 손실, PL_{tw} 은 건물 벽 투과 손실, PL_{in} 은 실내 경로 손실이다. 벽 투과 손실은 다음과 같이 표현한다.

$$PL_{tw} = g_1 + g_2(1 - \cos(\theta))^2, \quad (4)$$

g_1 , g_2 는 건물 투과 계수이며, θ 는 벽의 법선과 투과 경로 사이의 각도이다.

기존 모델은 건물의 벽 투과만 고려하고 층 투과 손실은 고려하고 있지 않다. 따라서 더 현실적인 모델을 고려하기 위해서는 건물의 층 투과 손실도 고려해야 한다. 실내 재난 환경에서 건물의 층 투과 손실을 고려한 실내 경로 손실은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$PL = PL_b + PL_{tw} + PL_{floor} + PL_{in}, \quad (5)$$

층 투과 손실은 다음과 같이 표현한다.

$$PL_{floor} = g_1 + g_2(1 - \sin(\theta))^2. \quad (6)$$

III. 제안하는 MAC 프로토콜

UAV는 위, 아래로 반복하는 비행을 한다고 가정한다. 그림 1과 그림 2는 본 논문에서 고려하고 있는 시스템 모델과 스케줄링 절차이다. UAV는 초기에 아래에서 위로 비행하면서 데이터 전송 여부를 확인하기 위해 노드마다 polling frame을 전송한다. 노드들은 그에 대한 응답으로 버퍼상태 정보를 담은 response frame을 전송한다. 위의 그림에서는 1번과 4번 노드가 보낼 데이터가 있는 상황을 가정한다. 이 과정을 통해 통신이 필요한 노드들 찾고 비직교 쌍과 UAV의 위치에 대한 짝을 지어준다. 비직교 쌍과 통신을 할 UAV의 최적위치는 두 업링크의 SINR 중 작은 값의 SINR이 최대가 되는 위치로 설정한다. UAV 위치와 비직교 쌍이 짝이 지어지면, 스케줄링을 통해 UAV는 위에서 아래로 비행하면서 비직교 쌍으로부터 데이터를 수신한다. 이때 1번 노드와 4번 노드의 비직교 쌍과 짝 지어진 UAV의 최적위치는 3번 노드의 데이터를 받는 위치보다 높고 1번 노드의 데이터를 받는 위치보다 낮기 때문에 3번의 버퍼 상태에 대한 수집부터 처리한다. 이 절차를 거치면, 다시 모든 노드의 버

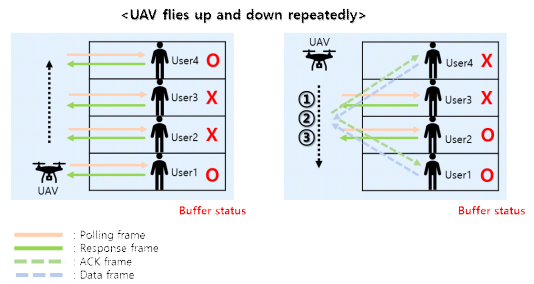


그림 1. 시스템 모델
Fig. 1. System Model

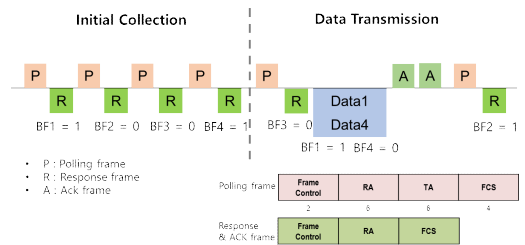


그림 2. 스케줄링 MAC Procedure
Fig. 2. Scheduling MAC Procedure

퍼 상태에 대한 정보를 수집할 수 있다. 따라서 다시 스케줄링 과정을 거치고 UAV는 아래로 비행하면서 업링크 노드의 데이터를 수신하는 반복적인 과정을 거친다.

IV. 성능 평가

4.1 시뮬레이션 환경

본 논문에서는 MATLAB을 활용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 성능 분석의 편의를 위해 saturation 환경을 가정하였다. UAV와 노드의 송신 전력, 안테나 이득, 패킷의 크기 등의 시뮬레이션 파라미터는 IEEE 802.11ac 표준 값을 사용하였다^[3]. 건물의 층간 높이는 2 m로 가정하며, 각 층에는 노드가 2개 씩 존재한다. 건물의 높이는 10 ~ 100 m 까지 (5층 ~ 50층), 즉, 노드의 개수를 10 ~ 100개로 증가시키며 각각에 대해 3,000번씩 시뮬레이션을 수행하였다. 재난 상황을 고려하여 낮은 MCS 레벨, SINR 임계값은 2 dB, data rate는 6.5 Mbps로 설정하였다.

4.2 시뮬레이션 결과

그림 3은 기존의 경로 손실 모델과의 비교를 위해 해당 환경에서 실내 노드가 100개 일 때, 1분 동안 아래에서 위로 비행하는 UAV를 사용하여 해당 위치에서의 반이중 통신 처리율을 나타낸다. 제안하는 스케줄링 방법은 UAV가 경로 손실을 고려하여 SNR를 계산하고 SNR이 최대가 되는 위치에서 통신을 하기 때문에, 기존 경로 손실 모델과 제안하는 경로 손실 모델 모두 층 투과를 거의 고려하지 않아도 되는 최적의 위치에서 통신이 가능하다. 따라서, 기존 경로 손실 모델과 제안하는 경로 손실 모델의 비교를 위해 기존 경쟁 기반 환경에서 성능평가를 진행하였다. 성능 분석 결과, 경로 손실 모델은 층 투과를 고려하기 때문에 경로 손실이 크고 따라서, 기존 경로 모델을 사용했을 때보다 더 낮은 처리율을 갖는다.

그림 4는 노드 개수에 따른 처리율의 변화를 나타낸다. 제안하는 시스템 모델에서 기존의 반이중 통신과 NOMA를 사용했을 때 MAC 프로토콜과 제안하는 스케줄링 기반 MAC 프로토콜 성능을 비교 분석하였다^[4]. 기존 경쟁기반 MAC 프로토콜은 노드들이 데이터를 전송할 때 충돌이 발생하기 때문에 처리율이 떨어진다. 하지만 제안하는 MAC 프로토콜의 경

우 노드들은 스케줄링 결과에 따라 데이터를 전송하기 때문에 충돌이 발생하지 않는다. 따라서 제안하는 알고리즘이 기존 대비 높은 처리율을 갖는다. 또한,

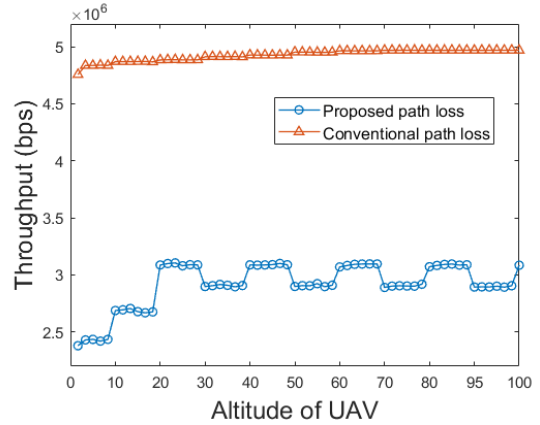


그림 3. UAV 고도에 따른 처리율 변화
Fig. 3. Throughput based on the altitude of UAV

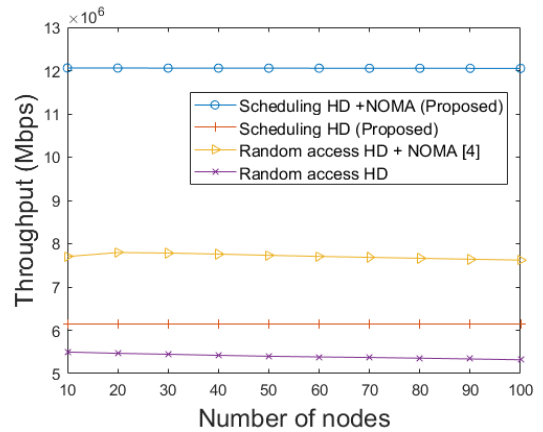


그림 4. 노드 개수에 따른 처리율 변화
Fig. 4. Throughput based on the number of nodes

해당 시뮬레이션을 기존의 제안하는 경로손실 모델에 적용하면, 동일한 결과가 나온다. 이는 두 모델 모두 UAV가 최적의 위치로 이동하여 노드를 서비스하므로 경로 손실과 관계없이 동일한 결과값을 갖기 때문이다.

그림 5는 fairness 성능 평가를 위해 packet inter-transmission time (PITT)의 cumulative distribution function (CDF)를 측정하였다. PITT는 노드가 패킷을 전송한 후 그 다음 패킷을 전송하는 데 까지 걸리는 시간을 의미한다. 이때 PITT의 CDF가 수직에 가까울수록 노드의 전송 시간의 간격이 일정하므로 fairness가 높다고 할 수 있다. 노드가 100개 일 때 PITT를 측정한 결과, 기존 경쟁기반 MAC 프로토콜은 충돌이 발생하면서 contention window가 커지기 때문에 다음 패킷 전송을 하는 데까지 오래 걸린다. 하지만, 제안하는 알고리즘은 스케줄링을 통해 충

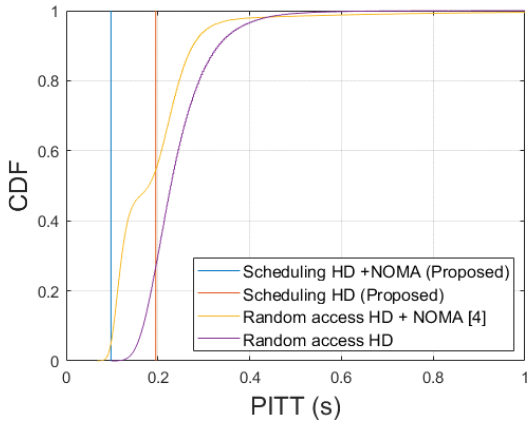


그림 5. PITT의 CDF (N=100)
 Fig. 5. CDF of PITT (N=100)

돌 없이 전송하기 때문에 노드들의 전송이 비교적 더 공정하다.

V. 결 론

본 논문에서는 새로운 경로손실 모델을 이용하여 비직교 다중접속 기술을 적용한 스케줄링 MAC 프로토콜을 제안하였다. 제안하는 방식은 스케줄링을 통해 기존의 MAC 프로토콜보다 처리율과 fairness를 향상시킬 수 있다. 시뮬레이션 결과 기존의 MAC 프로토콜과는 달리 노드의 개수가 증가하여도 충돌 확률이 증가하지 않기 때문에 처리율 성능이 증가하였다. 또한, fairness 측면에서도 성능이 증가하였다.

References

- [1] N. H. Hyung, et al., "Performance analysis of random access protocols according to GCS deployment in multi-UAV wireless networks," *J. KICS*, vol. 46, no. 6, pp. 965-973, Jun. 2021.
- [2] H. Shakhathreh, et al., "Unmanned aerial vehicles (UAVs): A survey on civil applications and key research challenges," *IEEE Access*, vol. 7, pp. 48572-48634, Apr. 2019.
- [3] IS Committee, "IEEE std. 802.11 ac-2013," *IEEE Std. for Inf. Technol.*, pp. 1-425, Dec. 2013.
- [4] Y. Kwon, H. Baek, and J. Lim, "Uplink NOMA using power allocation for UAV-aided CSMA/CA networks," *IEEE Syst. J.*, vol. 15, no. 2, pp. 2378-2381, Jun. 2021.