

재난 후 상황에서의 TUAV 를 활용한 통신 네트워크 복구

송영진, 강원영, 최승일, 이상현
고려대학교

{thd4090, dogs0667, sungchoi, sanghyunlee}@korea.ac.kr

Recovering Communication Networks Using TUAVs in Post-Disaster Situations

Young Jin Song, Won-Young Kang, Sung Il Choi, Sang Hyun Lee
Korea Univ.

요약

본 논문은 TUAV 를 이용하여 통신 인프라가 망가진 재난 상황 하에서 통신 네트워크를 복구하는 전략을 제시하였다. 제시된 전략 하에서, 메시지 전달 기반 알고리즘은 재난이 일어난 지역에서 통신 환경이 열악한 유저가 더 나은 통신 환경을 보장받을 수 있도록 최적 할당을 보장한다. 이를 통해 재난 상황 하에서 위급한 상황에 처한 사용자가 복구된 통신 인프라를 이용하여 적절한 대처 방안을 찾을 수 있도록 돕는다.

I. 서론

무인 항공기 (UAV)는 지상의 기지국과 협력하여 무선 네트워크 유지를 도울 수 있으므로 재난 지역의 구조분야에서 큰 관심을 받고 있다 [1]. UAV 는 효과적으로 line-of-sight 통신 링크를 제공할 수 있으므로 신호 차단과 장애로부터 비교적 자유롭다. UAV 의 규제 완화, 비용 절감, 통신 장비의 소형화로 인해 UAV 를 활용한 무선 통신 네트워크 배치가 실질적으로 가능해졌다. 이러한 추세에 맞물려, 최신 표준 3GPP Rel-16 내 무선 네트워크의 용량과 커버리지를 향상시키기 위해 UAV 지원 무선 통신을 포함하였으며, 연방 항공국 (FAA)에서는 5G 셀룰러 네트워크 내 UAV 를 활용할 수 있도록 승인하였다.

기존 셀룰러 무선 네트워크와 협력하여 UAV 를 배치하기 위해서는 UAV 의 제한된 에너지와 비행 시간을 고려하여야 한다. 최신 UAV 는 약 1 시간 정도 공중에 머무를 수 있다. 통신 및 신호 처리에 필요한 에너지 소비를 고려하면 호버링 가능한 시간은 더 적다. 이러한 배터리 문제를 해결하기 위해 지상의 충전 스테이션과 연결한 tethered UAV (TUAV)가 제안되었다. TUAV 는 지상으로부터 안정적으로 파워를 공급받는다.

TUAV 지원 네트워크에서 백홀 링크는 시스템 처리량에 병목 현상을 일으키지 않도록 적절히 설계되어야 한다. TUAV 는 지상의 기지국과 연결된 백홀 링크 및 사용자와 연결된 사용자 링크 두 분류의 통신을 지원한다. 동일한 주파수로 두 분류의 링크를 통신한다면 링크 간 간섭 현상이 일어난다. 아울러, 백홀 링크의 처리량이 사용자 링크 처리량 대비 낮을 경우 병목 현상을 일어나 네트워크 안정성이 떨어진다. 본 논문에서는 재난 상황에서 TUAV 고려된 무선 네트워크를 제안한다. 또한, 주파수 간섭 현상 및 백홀 병목현상을 해결한 시스템을 제안하며 메시지 전달 알고리즘을 활용하여 제안한 시스템의 최적해를 찾는다.

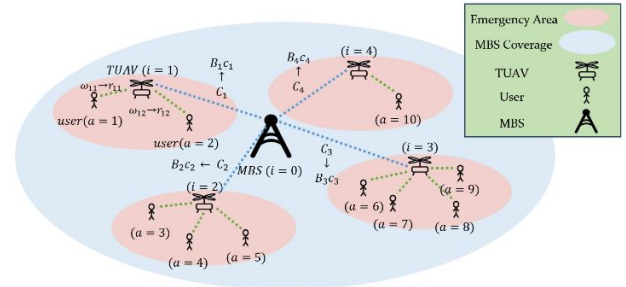


그림 1 MBS 및 TUAV 기반 무선 네트워크

II. 본론

재난 상황으로 인해 macro base station (MBS) 만으로 무선 네트워크 유지가 불가능한 상황을 고려하자. 그림 1 에서 네트워크를 유지하기 위해 TUAV 를 추가로 도입하였다. 사용자는 네트워크에 접속하기 위해 MBS ($i = 0$)에 직접 연결되거나 TUAV 를 relay node 로써 이용하여 연결된다. TUAV-MBS 백홀과 TUAV-사용자 링크의 간섭을 방지하기 위해 전체 대역폭의 B_i 비율 만큼 백홀에 활용하고 $1 - B_i$ 만큼 사용자 링크에 사용한다. 간섭을 회피하기 위해 reverse time division duplexing 방식이 활용되어 MBS 가 downlink 를 서비스 제공하면 TUAV 는 uplink 서비스 제공한다. 반대의 경우 동일하게, MBS 가 uplink 시, TUAV 는 downlink 서비스 한다. M 개의 TUAV 가 배치되었으며 D 개의 사용자가 네트워크에 참여한다. 대역폭이 전부 사용되었을 때의 TUAV i 와 MBS 사이의 전송 속도는 c_i 이다. TUAV 에 연결된 사용자들의 전송 속도의 합은 R_i 이다. 사용자 a 의 TUAV 또는 MBS 할당 여부를 나타내는 이진변수가 $x_{ia} = 1$ 일 때 할당된 상태이고, $x_{ia} = 0$ 일 때는 할당되지 않은 상태이다. 이 때의 전송 속도는 r_{ia} 이다. 각 사용자가 최소로 요구하는 전송 속도는 r_{\min} 이다.

최적화하고자 하는 문제는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \max_{x_{ia}, B_i} \sum_{i=0}^D \sum_{a=1}^T r_{ia} \\ \text{subject to } & \sum_{i=0}^D x_{ia} = 1, \quad \forall a \in \mathcal{T} \cup \{0\}, \\ & 0 \leq B_i \leq 1, \quad \forall i \in \mathcal{D}, \\ & R_i \leq B_i c_i, \quad \forall i \in \mathcal{D}, \\ & r_{ia} \geq r_{\min}, \quad \forall (i, a) \in (\mathcal{D}, \mathcal{T}), \\ & x_{ia} \in \{0, 1\}, \quad \forall i \in \mathcal{D}, \end{aligned}$$

네트워크의 총 전송 속도를 높이기 위해 사용자의 개별 전송 속도의 합을 최대화한다. 각 사용자가 네트워크에 연결되기 위해 TUAV 또는 MBS 에 연결되어야 한다. 네트워크의 병목 현상을 막기 위해 TUAV-MBS 간 연결의 전송 속도가 TUAV-사용자 간 전송 속도보다 커야한다. 각 사용자마다 최소 전송 속도를 보장한다.

MBS 에 연결된 사용자 a 의 처리율은 다음과 같다.

$$w_{0a} = \log_2 \left(1 + \frac{N_T - N_g + 1}{N_g} \frac{P_0 H_a}{N_g \sigma^2} \right)$$

N_T 는 MBS의 안테나 개수, N_g 는 MBS가 처리할 수 있는 데이터 양, P_0 , H_a , σ^2 는 MBS의 송신 전력을 나타낸다.

무선 백홀로 연결된 TUAV i 의 처리율은 다음과 같다.

$$c_i = \log_2 \left(1 + \frac{N_T - N_g + 1}{N_g} \frac{P_0 G_i}{\sigma^2} \right)$$

G_i 는 MBS와 TUAV i 사이의 채널 이득이다.

TUAV i 에 연결된 사용자 a 의 처리율은 다음과 같다.

$$w_{ia} = \log_2 \left(1 + \frac{P_i h_{ia}}{\sigma^2 + \sum_{j \in \mathcal{B} \setminus \{i, 0\}} P_j h_{ja}} \right)$$

P_i 는 TUAV i 의 송신 전력이고 h_{ia} 는 TUAV i 와 사용자 a 간의 채널 이득이다.

재난 상황에서 통신에 어려움을 겪는 사용자에게 더 나은 통신 환경을 제공하기 위해 사용자의 데이터 처리율의 역수를 이용하여 통신 자원을 할당할 것이다. 이를 반영한 전송 속도 r_{ia} 를 정의하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} r_{0a} &= \frac{B_0 x_{0a}}{\sum_{b \in \mathcal{K}} \frac{x_{0b}}{w_{0b}}} \quad \text{if MBS} \\ r_{ia} &= \frac{(1 - B_i) x_{ia}}{\sum_{b \in \mathcal{K}} \frac{x_{ib}}{w_{ib}}} \quad \text{if TUAV} \end{aligned}$$

MBS와 TUAV 간의 무선 백홀은 TUAV와 그에 연결된 사용자들의 연결의 최대를 제한하므로, 두 값이 같을 때 통신 자원을 가장 효율적으로 사용 가능하다. 이를 수식적으로 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{\sum_{a \in \mathcal{K}} (1 - B_i) x_{ia}}{\sum_{b \in \mathcal{K}} \frac{x_{ib}}{w_{ib}}} = B_i c_i$$

이를 B_i 에 대해 정리하여 r_{ia} 를 다시 쓰면 다음과 같다.

$$r_{ia} = \frac{c_i x_{ia}}{\sum_{b \in \mathcal{K}} \left(\frac{c_i}{w_{ib}} + 1 \right) x_{ib}}$$

제안한 최적화 문제를 r_{ia} 를 대입하여 재구성하면 다음과 같다.

$$\max_{x_{ia}} \left(\sum_{a \in \mathcal{K}} \frac{B_0 x_{0a}}{\sum_{b \in \mathcal{K}} \frac{x_{0b}}{w_{0b}}} + \sum_{i \in \mathcal{B} \setminus \{0\}} \sum_{a \in \mathcal{K}} \frac{c_i x_{ia}}{\sum_{b \in \mathcal{K}} \left(\frac{c_i}{w_{ib}} + 1 \right) x_{ib}} \right)$$

III. 메시지 유도

주어진 최적화 문제를 풀기 위해 목적 함수와 제약 조건을 factor graph 형식으로 재해석한다. 각각의 factor는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Q_a(\mathcal{X}_a) &= \begin{cases} 0, & \text{if } \sum_{i \in \mathcal{B}} x_{ia} = 1 \\ -\infty, & \text{otherwise} \end{cases} \\ R_i(\mathcal{X}_i) &= \begin{cases} \sum_{a \in \mathcal{K}} U\left(\frac{B_0 x_{0a}}{\sum_{b \in \mathcal{K}} \frac{x_{0b}}{w_{0b}}}, \alpha\right), & \text{if MBS} \\ \sum_{a \in \mathcal{K}} U\left(\frac{c_i x_{ia}}{\sum_{b \in \mathcal{K}} \left(\frac{c_i}{w_{ib}} + 1\right) x_{ib}}, \alpha\right), & \text{if TUAV} \\ -\infty, & \text{otherwise} \end{cases} \end{aligned}$$

두개로 나뉜 factor는 메시지 전송 기법을 활용하여 최적의 해를 구할 수 있다 [3].

하나의 변수 노드 x_{ia} 에 들어오는 메시지는 하나밖에 없으므로, $\alpha_{ia} = \beta_{ia}$, $\eta_{ia} = \rho_{ia}$ 이다. α_{ia} 와 η_{ia} 를 구하면 메시지 패싱 알고리즘을 이용해서 최적 할당을 구할 수 있다.

메시지 η_{ia} 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\eta_{ij} = \mu_{Q_a \rightarrow x_{ia}}(x_{ia} = 1) - \mu_{Q_a \rightarrow x_{ia}}(x_{ia} = 0)$$

$$= - \max_{j \in \mathcal{B} \setminus i} \beta_{ja}$$

메시지 α_{ia} 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \alpha_{ia} &= \mu_{R_i \rightarrow x_{ia}}(x_{ia} = 1) - \mu_{R_i \rightarrow x_{ia}}(x_{ia} = 0) \\ &= \max_{\mathcal{X}_i \setminus x_{ia}} \left(R_i(x_{ia} = 1, \mathcal{X}_i \setminus x_{ia}) + \sum_{b \in \mathcal{K} \setminus a} \mu_{x_{ib} \rightarrow R_i}(x_{ib}) \right) \\ &\quad - \max_{\mathcal{X}_i \setminus x_{ia}} \left(R_i(x_{ia} = 0, \mathcal{X}_i \setminus x_{ia}) + \sum_{b \in \mathcal{K} \setminus a} \mu_{x_{ib} \rightarrow R_i}(x_{ib}) \right) \end{aligned}$$

위와 같은 메시지를 수렴할 때까지 반복한다. 이 메시지들을 알고리즘이 수렴할 때까지 교환한 후, 수렴한 메시지 η_{ia} 와 α_{ia} 를 더해 양수면 $x_{ia} = 1$, 음수면 $x_{ia} = 0$ 으로 할당 변수를 결정한다.

IV. 결론

재난 상황 발생 시 하나의 MBS와 여러 대의 TUAV를 활용하여 손상된 통신 인프라를 복구하고, 사용자에게 적절한 통신 환경을 제공하는 알고리즘을 제안하였다.

ACKNOWLEDGMENT

이 논문은 2021년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 정보통신기획평가원의 지원(No. 2021-0-00467, 지능형 6G 무선 액세스 시스템)과 2022년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2022R1A5A1027646)

참고 문헌

- [1] Panda, Kirtan Gopal, *et al.*, "Design and deployment of UAV-aided post-disaster emergency network," IEEE Access 7, pp. 102985-102999, 2019.
- [2] Zhang, Shuai, Weiqi Liu, and Nirwan Ansari, "On tethered UAV-assisted heterogeneous network," IEEE Transactions on Vehicular Technology, pp. 975-983, 2021.
- [3] Kschischang, Frank R., Brendan J. Frey, and H-A. Loeliger, "Factor graphs and the sum-product algorithm." IEEE Transactions on information theory, 47 (2), pp. 498-519, 2001.