

사용자 공정성을 고려한 UAV 통신:

UAV 배치, 전력 분배, 도청단 발견에 따른 재배치 경로 최적화 연구

허정원, 이시현*

한국과학기술원 전기 및 전자공학부

jungwon00@kaist.ac.kr, *sihyeon@kaist.ac.kr

요약

본 논문에서는 무인 항공기(UAV)가 사용자 공정성을 목적으로 데이터를 전송하는 시스템을 고려한다. 이 시스템에서 UAV는 사용자 공정성을 고려한 최적의 위치에서 호버링(hovering)하여 서비스를 하며, 도청단 발견으로 인한 위치 이동시에도 공정성을 고려한 경로를 통해 이동한다. 본 연구에서는 앞서 언급한 통신 상황을 위한 UAV의 위치와 경로, 그리고 전송 전력을 최적화한다. 제안한 문제의 비볼록성(non-convexity)을 해결하기 위해, 우리는 블록 간 최적화(BCD)와 연속적인 볼록 근사화(SCA) 기법을 활용한 알고리즘을 제시한다. 최종적으로 우리가 제시한 방법이 기존 방식에 비해 높은 성능을 달성함을 보인다. 추가적으로 최적 위치에서의 통신에 더 집중할 수 있도록, 도청단 발견에 따른 이동 시 UAV 에너지 소모를 줄이는 방법도 제시한다.

I. 서론

무인 항공기(UAV)는 높은 이동성, 유동성, 접근성 등의 특징으로 인해 상업, 학문 등 다양한 분야에서 관심을 받고 있다. 특히 통신에서 UAV는 기지국, 중계기, 재머 등의 용도로 사용된다. 그러나 UAV는 지상과의 통신에서 line of sight (LOS) 성질이 강해 정보 유출에 취약하다는 특성이 있다. 보안에 민감한 군 통신과 같은 분야에서 해당 문제는 더 중요하게 다루어진다. 데이터 보안을 강화하기 위해 다중 안테나 빔포밍, 데이터 암호화 등의 방식이 사용되고 있다. 본 논문에서는 UAV의 이동성을 이용하여 보안을 강화하는 방법을 제시한다. 또한 본 논문은 다중 사용자 상황에서 모든 사용자들에게 지속적으로 공정한 통신을 제공하는 것을 목적으로 한다.

II. 본론

1. 모델

본 논문은 한 대의 UAV가 호버링(hovering)해서 지상의 K 명의 사용자를 서비스하는 상황을 다룬다. 사용자 k 의 수평 위치는 $\mathbf{u}_k = [x_k, y_k]$, $k \in \mathcal{K} = \{1, \dots, K\}$ 로 정의된다. 각 사용자는 FDMA 기법을 이용하여 동일한 대역폭 B 로 서비스 받는다. 또한 최대 전송 전력인 P_{max} 를 사용자들에게 할당한다. UAV는 안정적인 통신을 위해 고정된 높이 H 에서 호버링하고, UAV와 지상 링크는 LOS만 고려한 모델로 가정한다.

여기서 UAV는 다중 사용자에게 공정한 서비스를 하는 것을 목적으로, 최적의 위치에서 호버링한다. 이때, 도청장치가 감지된다면 UAV는 공정성을 여전히 유지하면서, 도청장치에 대응한 새로운 최적 위치로 이동해야 한다. 이를 위해 우리는 공정한 서비스를 위한 UAV의 호버링 위치, 도청 장치에 대응하여 공정성을 고려하는 위치, 그리고 이에 대응하여 이동 중에도 공정성을 유지하는 경로를 최적화한다. 또한 본 대응 과정에서 전송 전력 분배도 함께 최적화한다.

2. 문제 정의

<문제 1>

먼저 도청장치가 감지되지 않았을 때 사용자 공정성을 고려한 전송 전력 분배 $\mathbf{p}_1 = \{p_1, \dots, p_K\}$ 와 UAV의 위치 $\mathbf{q}_1 = [x_1, y_1]$ 를 찾는다. p_k 는 k 번째 사용자에게 할당되는 전력을 의미한다. UAV와 사용자 k 사이의 채널 h_k 는 $\frac{\rho_0}{\|\mathbf{q}_1 - \mathbf{u}_k\|^2 + H^2}$ 로 주어진다. 여기서 ρ_0 는 1m에서의 기준 채널 이득을 의미한다. k 번째 사용자 용량은 $R_k = \log_2(1 + \frac{p_k h_k}{\sigma^2})$ 로 주어지고, σ^2 은 잡음 전력이다. 문제 1에서는 최대 전송 전력 제약하에 최소 용량(minimum rate) 최대화를 목적으로 한다.

<문제 2>

UAV가 수평 위치 $\mathbf{u}_e = [x_e, y_e]$ 인 지상 도청 장치를 감지했다고 가정했을 때, 우리는 여전히 공정한 통신을 목표로 하며 동시에 도청 장치에 대응하는 최적의 위치 $\mathbf{q}_F = [x_F, y_F]$ 와 전송 전력 $\mathbf{p}_F = \{p_1, \dots, p_K\}$ 을 최적화한다. 보안 용량은 $R'_k = \{R_k - R_{e,k}\}^+$, $\{x\}^+ = \max(0, x)$ 로 주어지고,

$R_{e,k} = \log_2(1 + \frac{p_k h_e}{\sigma^2})$, $h_e = \frac{\rho_0}{\|\mathbf{q}_F - \mathbf{u}_e\|^2 + H^2}$ 이다. 문제 2는 최대 전송 전력 제약하에 최소 보안 용량(minimum secrecy rate) 최대화를 목적으로 한다.

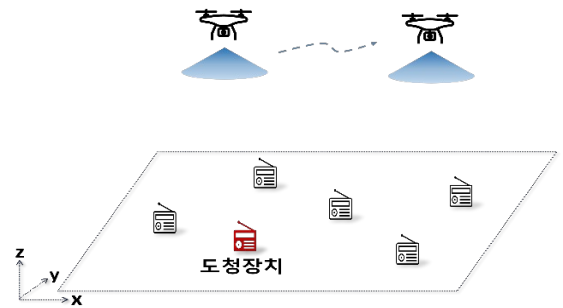


그림 1. 도청 장치 감지 후 최적의 위치로 이동하는 UAV

<문제 3>

UAV는 도청 장치에 대응하는 위치까지 최적의 경로로 이동해야 한다. 여기서 우리는 이동 중에도 지속적으로 공정성을 유지하는 것을 목적으로 한다. UAV의 경로를 이산화하기 위해 총 비행 시간인 T 는 N 개의 시간 구간으로 나누어진다. 각 시간 구간의 길이는 $\Delta = \frac{T}{N}$ 로 정의된다. UAV 수평경로는 $\mathbf{Q} = \{q[1], \dots, q[N]\}$ 이고, n 번째 시간 구간의 전력분배는 $\mathbf{P}[n] = \{p_1[n], \dots, p_K[n]\}$ 이다. n 번째 시간에서 UAV-사용자 채널 $h_k[n]$, UAV-도청장치의 채널 $h_e[n]$ 는 이전 문제와 동일하며, 보안용량은 $R'_k[n] = \{R_k[n] - R_{e,k}[n]\}^+$ 로 주어진다. 우리는 전력 분배 \mathbf{P} 와 UAV 경로 \mathbf{Q} 를 변수로 지속적인 공정성을 고려하기 위해 매 순간 최소 보안 용량의 합인 $\sum_{n=1}^N \min_k R'_k[n]$ 을 최대화시킨다. 추가로 각 순간의 최대 전력 제약, 도청장치 감지 전 최적의 위치에서 출발하여 감지 후의 최적 위치에 도착해야 하는 UAV 위치 제약, UAV 이동 최대 속도 제약, 그리고 최적의 위치에서 효과적인 통신을 하기 위해 이동중 에너지 소모에 대한 제약 조건을 고려한다.

3. 제안 알고리즘

해당 최적화 문제들의 비볼록성으로 인해 우리는 블록 간 최적화(BCD)와 연속적인 볼록 근사화(SCA)를 이용한 알고리즘을 제안한다[1]. 해당 변수에 대해 비볼록한 식들을 SCA 기법인 first-order Taylor's expansion을 이용하여 볼록한 식으로 근사한 후 각각의 전력과 UAV위치 변수들을 고정해가면서 목적 함수가 일정 비율 이하로 증가할 때까지 CVX를 이용하여 문제를 반복적으로 푼다[2].

4. 결과

해당 부분에서는 제안한 방식의 보안과 공정성 성능을 확인한다. 우선 사용자 5, 7, 9명에 대해 각 10번씩 사용자 위치를 랜덤으로 반복 생성하여 제안한 방식과 다른 기법들을 비교하였다. 공정성 성능을 효과적으로 확인하기 위해 우선 에너지 제약을 무시하였다.

	문제 1의 결과	문제 2의 결과
최소 보안 용량[bps/Hz]	0.8773	1.5507

표 1. 문제 1과 문제 2의 결과의 최소 보안 용량 비교

먼저 최적화된 위치의 성능 확인을 위해, 해당 반복 실험들의 평균적인 최소 보안 용량을 확인하였다. 표 1에서 보듯이, 공정성만 고려한 문제 1과 비교하여, 도청 장치에 대응하며 공정성을 고려한 문제 2의 결과가 해당 성능을 향상시켰음을 확인할 수 있다.

다음으로 UAV가 이동 시에도 지속적으로 공정성을 달성하는지 확인하였다. 비교 기법인 straight기법은 최고 속도로 최적 위치까지 이동시키며, average fairness는 모든 비행 시간 동안 공정성을 고려하는 기법으로 $\min_k \sum_{n=1}^N R'_k[n]$ 을 최대화한다. 특히 average fairness기법은 기존에 보안 상황에서 공정성을 고려하는 연구에서 사용된 방식으로[3], 해당 기법 대비 우리 방식의 우수성을 확인하는 것이 주요 목적이다.

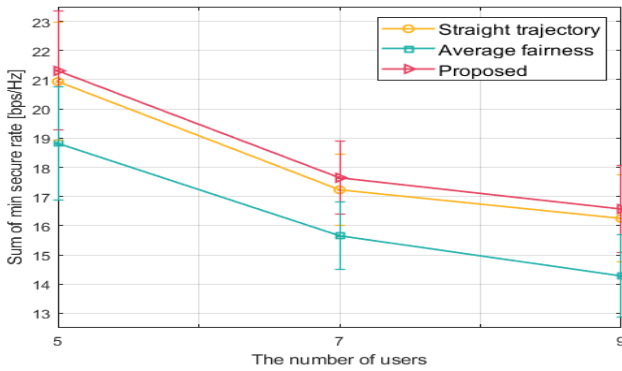


그림 2. 지속적 공정성을 고려한 성능 비교

그림 2에서는 사용자 수를 조정해가며 지속적인 공정성에 대한 성능 확인을 위해 $\sum_{n=1}^N \min_k R'_k[n]$ 를 목적으로 성능을 확인하였다. 우리가 제안한 기법이 가장 성능이 좋았고, 최적의 위치까지 빨리 이동한 뒤 공정성을 유지하는 straight 기법이 average fairness 보다 성능이 좋았다.

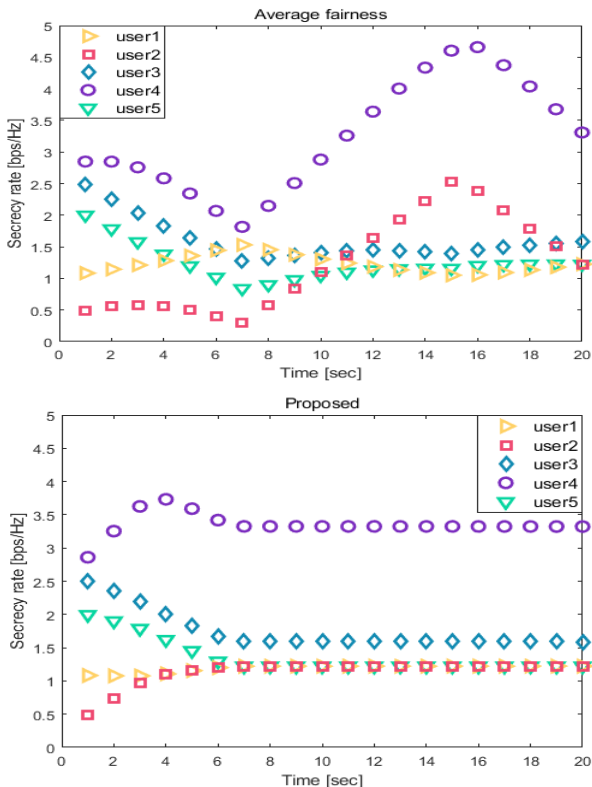


그림 3. 시간에 따른 모든 사용자의 보안 용량 변화

우리는 지속적인 공정성의 자세한 분석을 위해, 고정된 환경에서의 성능도 확인하였다. 그림 3에서는 시간에 따른

모든 사용자들의 보안용량 변화를 보여준다. 우선 average fairness 기법을 보면, 처음에는 사용자 4, 5 가, 7 초에는 사용자 1 이, 그리고 1 초에는 사용자 2, 4 가 보안 용량이 높은 것을 볼 수 있다. 해당 방식은 총 이동 시간 동안의 공정성을 고려하는 기법으로, 특정 시간에 특정 사용자에게 자원을 몰아주는 방식으로 목적을 달성한다. 때문에 모든 사용자의 보안 용량이 시간에 따라 크게 변동하며, 7 초에는 사용자의 보안 용량이 0 에 가까운 값으로 떨어지기도 하였다. 반면, 제안한 기법은 매 순간 공정성을 목적으로 하였기에 모든 사용자의 보안 용량이 안정적으로 변화하며 수렴하는 것을 확인할 수 있다. Average fairness 기법의 보안 용량 최대 변동폭은 2.84bps/Hz 에 달하는 반면, 제안한 기법은 0.87bps/Hz 의 변동만을 보여준다.

에너지 제약 값	No constraint	3000
최소 보안 용량[bps/Hz]	22.7617	20.8729
에너지 소모[J]	4611	3000

표 2. 에너지 제약에 따른 최소 보안 용량과 에너지 소모량

마지막으로, UAV 의 한정된 배터리 용량으로 인해 에너지 효율은 UAV 연구에서 중요한 요소로 다루어진다. 에너지 제약을 추가하여, 제안된 경로에서의 에너지 효율 증가를 확인하였다. UAV 에너지 모델은 이동 속도에 대한 함수로 나타나므로, 제약 조건을 추가하면 해당 경로에 대해 이동 속도를 조절해가며 에너지 효율을 높인다[4]. 우리는 해당 제약 값을 조정하며 보안 용량은 8% 감소시키지만 에너지 소모를 34%까지 줄일 수 있음을 확인하였다.

III. 결론

본 논문은 UAV 가 사용자 공정성을 목적으로, 도청장치 발견에 대응하여 최적의 통신을 위한 위치와 이동 경로를 찾는 방법을 제안한다. 여기서 우리는 도청장치에 대응하여 이동 중에도 지속적으로 공정성을 유지하는 문제를 다룬다. 제안한 방법은 기존 방법들과 비교하여 공정성 측면에서 우수한 성능을 보인다. 해당 연구는 사용자 입장에서 더욱 안정적인 통신이 가능하게 하며, 추가로 UAV 에너지 효율 문제도 함께 고려하였기에 현실적인 상황에서 더욱 선호될 것으로 기대된다.

ACKNOWLEDGMENT

본 연구는 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원과(No. 2020M3C1C1A03078081) 정보통신기획평가원의 지원을(No. 2020-0-01787-004) 받아 수행되었음.

참고 문헌

- [1] Y. Sun, P. Babu, and D. P. Palomar, "Majorization-Minimization Algorithms in Signal Processing, Communications, and Machine Learning," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 65, no. 3, pp. 794-816, Aug. 2017.
- [2] Grant, Michael and Boyd, Stephen. CVX: Matlab Software for Disciplined Convex Programming, version 2.1. Available at: <http://cvxr.com/cvx>, March 2014. 24
- [3] Ouyang, Jian and Pan, "Achieving Secrecy Energy Efficiency Fairness in UAV-Enabled Multi-User Communication Systems", *IEEE Wireless Communications Letters*, vol. 11, no. 5, pp. 918-922. May 2022
- [4] Zeng, Yong and Xu, Jie and Zhang, Rui, Energy Minimization for Wireless Communication with Rotary-Wing UAV, *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 18, no. 4, pp. 2329-2345. April 2019