

BDMA 기반 UAV 운용 전력 최소화를 위한 빔 설계

강 홍 구*, 박 재 수*,
 황 찬 호**, 강 준 혁*

Beam Design for Power Minimization of BDMA-Based UAV Operation

Honggu Kang*, Jaesoo Park*,
 Chan-Ho Hwang**, Joonhyuk Kang*

요 약

본 논문에서는 중계기 unmanned aerial vehicle (UAV)가 빔분할다중접속 기반으로 여러 대의 단말 UAV를 운용하기 위해 신호를 보내는 시나리오에 대해 연구한다. 해당 시나리오에서 단말 UAV의 SINR을 보장하며 중계기 UAV의 소비 전력을 최소화하는 문제를 형성하고 최적화를 통해 최적의 빔을 설계한다. 또한, 수치적인 결과는 송신 안테나 수와 단말 UAV의 물리적인 위치 차이에 대해 필요한 최소의 전력량에 대해 보이고 통찰을 제공한다.

Key Words : UAV communications, beam division multiple access, power optimization, minimum required power, beam design

ABSTRACT

In this paper, we study a scenario of unmanned aerial vehicle (UAV) relay transmitting signal based on beam division multiple access (BDMA) for operating terminal UAVs. Under the above scenario, we formulate the problem of minimizing power guaranteeing SINR and design the optimal beam.

Numerical results show minimum required power according to transmit antenna numbers and physical location difference and provide insights.

I. 서 론

최근 unmanned aerial vehicle (UAV)는 감시, 정찰, 물자 보급, 공중 기지국, 공중 중계기 등 이동성에 대한 이점으로 인하여 군 및 민간 분야에서 관심을 받고 있다^[1]. 다양한 애플리케이션의 UAV를 운용하기 위해서는 지상으로부터의 통제가 필요하다. 이에 따라 UAV에 적합한 control and command (C2) 통신 링크가 연구되고 있다. 그러나, UAV를 ground control station (GCS)에서 통제·운용하면 지형에 따라 non-line-of-sight (NLoS) 환경이 발생할 수 있어 통신 링크의 성능이 떨어지고 장거리의 통신을 구현하기 힘들어질 수 있다.

한편, 다수 대의 UAV 운용을 통해 더 다양한 임무를 수행할 수 있을 뿐만 아니라 임무의 효율성을 높일 수 있다. 그러나, common data link (CDL) 등의 데이터링크는 하나의 GCS가 한 대의 UAV만을 지원할 수 있는 일대일 통신에 한정이 되어 있어 다수 대의 UAV를 지원하기 위해 다수의 GCS에 필요하다.

이에 따라 본 논문에서는 (i) line-of-sight (LoS) 환경이 보장될 수 있는 air-to-air 통신을 통해 장거리 통신이 가능하고 (ii) 하나의 GCS로 여러 대의 단말 UAV를 지원할 수 있는, beam division multiple access (BDMA) 기반 통신 시스템이 가능한 중계기 UAV를 통해 GCS-중계기 UAV-단말 UAV의 구조의 통신 시스템에 대해 연구한다^[2]. 본 연구에서는 중계기 UAV가 각 단말 UAV의 quality-of-service (QoS, 예를 들어, SINR)를 만족하며 최소의 소비 전력을 소모하도록 빔을 설계하는 문제를 최적화한다. 또한 수치적으로 중계기 UAV의 안테나 수 및 단말 UAV의 물리적인 위치에 따른 최소 전력량에 대해 수치적으로 보이고 이를 통해 미래 UAV 운용 데이터링크 설계를 위한 통찰을 제공할 수 있다.

* 본 논문은 2019년도 국방과학연구소 (UC180005ED) 및 한화시스템(주) (U-19-005)의 재원을 지원 받아 수행된 연구임.

• First Author : (OCID:0000-0003-2138-8641)School of Electrical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), khg13@kaist.ac.kr, 학생회원

◦ Corresponding Author : (OCID:0000-0002-5508-3742)School of Electrical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), jhkang@kaist.edu, 중신회원

* (OCID:0000-0002-7595-0778)Hanwha Systems Co., Ltd., js2007.park@hanwha.com, 정회원

** (OCID:0000-0001-8807-7210)Agency for Defense Development., hwangchanho@add.re.kr, 정회원

논문번호 : 201911-298-A-LU, Received November 12, 2019; Revised November 20, 2019; Accepted November 20, 2019

II. 시스템 모델

본 연구에서는 그림 1과 같이 uniform linear array (ULA) 구조의 N 개 안테나를 가진 중계기 UAV 한 대가 각 한 개의 안테나를 가지는 K 대의 단말 UAV를 BDMA 기반의 통신 시스템을 통하여 지원하는 시나리오를 고려한다. 이 때, k 번째 단말 UAV의 수신 신호 y_k 는 다음과 같다.

$$y_k = \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_k d_k + \sum_{i=1, i \neq k}^K \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_i d_i + n_k \quad (1)$$

여기서 \mathbf{h}_k 는 중계기 UAV로부터 k 번째 단말 UAV까지의 $N \times 1$ 채널 벡터, \mathbf{w}_k 는 $N \times 1$ 빔포밍 벡터, d_k 는 normalized된 데이터 심볼, $n_k \sim \mathcal{CN}(0, \sigma^2)$ 는 가우시안 노이즈이고 $(\cdot)^H$ 는 Hermitian을 나타낸다. 이 때, $\sum_{i=1, i \neq k}^K \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_i d_i$ 는 k 번째 UAV에 수신되는 간섭을 나타내며 k 번째 UAV의 SINR 값은 다음과 같다.

$$\text{SINR}_k = \frac{|\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_k|^2}{\sigma^2 + \sum_{i=1, i \neq k}^K |\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_i|^2} \quad (2)$$

중계기 UAV로부터 단말 UAV로의 air-to-air 채널 모델은 narrowband LoS 채널 모델과 채널 감쇄 모델로는 free space path loss 모델을 가정하고 다음과 같이 모델링 된다.

$$\mathbf{h}_k = \sqrt{\frac{\alpha_0}{d_k^2}} [1 \exp(j\pi \sin \theta_k) \dots \exp(j\pi(N-1) \sin \theta_k)]$$

여기서 파장의 길이를 λ_{wave} 라고 할 때, 안테나 사이의 간격은 $\lambda_{wave}/2$ 로 가정되며, θ_k 는 중계기 UAV와 k 번째 단말 UAV 사이의 각도를 나타내고, G_t 는 송신 안테나 이득을, G_r 는 수신 안테나 이득을 의미할 때, $\alpha_0 = G_t G_r \lambda_{wave} / 4\pi$ 이다.

III. 소비 전력 최적화

본 장에서는 단말 UAV가 중계기 UAV로부터 통제 명령 신호를 수신할 때, 단말 UAV가 SINR threshold 값 γ_k 를 만족하며 중계기 UAV가 소비 전력을 최소화하는 문제를 형성하고 이를 최적화한다. 여기서 매개변수 γ_k 는 특정 data rate을 만족하기 위

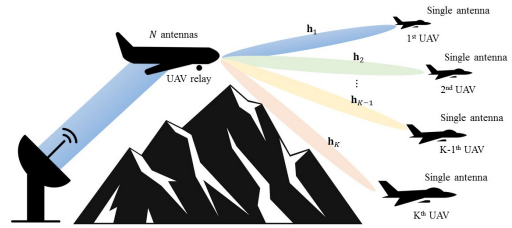


그림 1. N 개의 안테나를 가진 중계기 UAV가 BDMA 기반으로 K 대의 단말 UAV를 운용하기 위해 신호를 송신하는 시나리오

Fig. 1. BDMA-based signal transmission of a relay UAV equipped with N antennas for operating K user UAVs

한 SINR 값들로 표현될 수 있다. 그러면, 해당 문제는 아래와 같이 형성될 수 있다.

$$\begin{aligned} \min_{\mathbf{w}_k} & \sum_{k=1}^K \|\mathbf{w}_k\|^2 \\ \text{s.t.} & \text{SINR}_k \geq \gamma_k \end{aligned} \quad (3)$$

첫 번째로 위 문제를 convex하게 재형성하기 위해 제약조건에 간단한 방법을 적용할 수 있다. 어떤 θ'_k 에 대해서도 \mathbf{w}_k 와 $e^{j\theta'_k} \mathbf{w}_k$ 는 SINR 값 및 비용함수에 영향을 미치지 않는 것을 통해 optimality를 잃지 않고, $\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_k$ 를 양수의 실수로 만들어 제약조건을 다음과 같이 쓰일 수 있게 한다.

$$\frac{1}{\sqrt{\gamma_k \sigma^2}} \text{Re}(\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_k) \geq \sqrt{\sum_{i \neq k}^K \frac{1}{\sigma^2} |\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_i|^2 + 1} \quad (4)$$

여기서 $\text{Re}(\cdot)$ 는 실수를 의미한다. 재형성된 제약 조건은 convex 유형의 제약조건인 second-order cone 제약조건이며 Slater의 제약조건 qualification이 만족된다. 따라서 재형성된 최적화 문제는 strong duality를 만족하며 Karush-Kuhn-Tucker (KKT) 조건들은 최적의 솔루션에 대해 필요충분한 조건이다. 이러한 특성들은 (3)에 대해서도 만족한다. 그러면 (3)에 대한 Lagrangian 함수는 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$L(\mathbf{w}_1, \dots, \mathbf{w}_K, \lambda_1, \dots, \lambda_K) = \sum_{k=1}^K \|\mathbf{w}_k\|^2 + \sum_{k=1}^K \lambda_k \left(\frac{1}{\sigma^2} |\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_k|^2 + 1 - \frac{1}{\gamma_k \sigma^2} |\mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_k|^2 \right) \quad (5)$$

여기서 $\lambda_k \geq 0$ 는 k 번째 SINR 제약조건

Lagrange multiplier이다. 해당 문제를 풀기 위해, stationarity KKT 조건을 이용한다. 그러면, 최적의 빔 포밍 벡터는 다음과 같다:

$$\mathbf{w}_k = \left(\mathbf{I}_N + \sum_{i=1}^K \frac{\lambda_i}{\sigma^2} \mathbf{h}_i \mathbf{h}_i^H \right)^{-1} \mathbf{h}_k \frac{\lambda_k}{\sigma^2} \left(1 + \frac{1}{\gamma_k} \right) \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_k \quad (6)$$

여기서 \mathbf{I}_N 는 $N \times N$ 단위행렬이다. (6)로부터 $\lambda_k / \sigma^2 (1 + 1/\gamma_k) \mathbf{h}_k^H \mathbf{w}_k$ 가 스칼라기 때문에 \mathbf{w}_k 는 $(\mathbf{I}_N + \sum_{i=1}^K (\lambda_i / \sigma^2) \mathbf{h}_i \mathbf{h}_i^H)^{-1} \mathbf{h}_k$ 과 방향을 같은 것을 알 수 있다. 따라서 최적의 빔포밍 벡터 $\mathbf{w}_1^*, \dots, \mathbf{w}_K^*$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다:

$$\mathbf{w}_k^* = \sqrt{p_k} \tilde{\mathbf{w}}_k^* = \sqrt{p_k} \frac{\left(\mathbf{I}_N + \sum_{i=1}^K \frac{\lambda_i}{\sigma^2} \mathbf{h}_i \mathbf{h}_i^H \right)^{-1} \mathbf{h}_k}{\left\| \left(\mathbf{I}_N + \sum_{i=1}^K \frac{\lambda_i}{\sigma^2} \mathbf{h}_i \mathbf{h}_i^H \right)^{-1} \mathbf{h}_k \right\|} \quad (7)$$

여기서, p_k 는 빔포밍 전력을 의미하고, $\tilde{\mathbf{w}}_k^*$ 는 단위 방향 벡터이다. 이 때, 빔포밍 전력의 경우, 최적의 값에서 제약조건 (4)가 등식을 만족한다는 것을 알 수 있다. 만약, 특정 \mathbf{w}_k 가 제약식의 등식을 만족하지 않는다면, 다른 빔포밍벡터 $\mathbf{w}_{k'} (k' \neq k)$ 로 제약조건은 그대로 유지하며 비용 함수는 더 작은 값으로 스케일 될 수 있기 때문이다. 따라서 K 개의 선형 식으로부터 K 개의 빔포밍 전력을 얻을 수 있다. 식으로 표현하면 $[p_1 \dots p_K]^T = \mathbf{M}^{-1} [\sigma^2 \dots \sigma^2]^T$ 과 같으며 여기서

$$[\mathbf{M}]_{ij} = \begin{cases} (1/\gamma_i) |\mathbf{h}_i^H \tilde{\mathbf{w}}_i^*|^2, & i=j \\ -|\mathbf{h}_i^H \tilde{\mathbf{w}}_j^*|^2, & i \neq j \end{cases} \quad (8)$$

와 같다. $[\mathbf{M}]_{ij}$ 는 행렬 \mathbf{M} 의 (i,j) 번째 요소를 의미한다. 이제 최적의 빔포밍 벡터를 구하기 위해서는 $\lambda_1, \dots, \lambda_K$ 를 찾으면 되는데, 이는 $\lambda_1, \dots, \lambda_K$ 를 임의의 값으로 초기화한 후 fixed-point 기법을 통해 구할 수 있다³⁾.

IV. 모의실험 결과

이 장은 모의실험 결과를 보이고 결과에 따른 통찰을 제공한다. 모의실험을 위한 매개변수의 값은 잡음 전력 $\sigma^2 = -123$ dBW, 단말 UAV까지의 거리

$d_k = 100$ km $\forall k$, 송수신 안테나 이득 $G_t = G_r = -1.5$ dB, 파장의 길이 $\lambda_{wave} = 0.02$ m, 단말 UAV의 수는 4대로 설정하였다. 그림 2는 중계기 UAV의 송신 안테나 수가 6개와 8개일 경우, 각 단말 UAV가 위치한 각도가 $[\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4] = [15^\circ, 35^\circ, 55^\circ, 75^\circ]$ 일 경우와 $[\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4] = [30^\circ, 40^\circ, 50^\circ, 60^\circ]$ 일 경우 SINR threshold 값에 따라 필요로 하는 최소 전력량을 나타낸다.

검정색 선과 빨간색 선을 비교해보면, 동일한 송신 안테나 수를 가질 때, 단말 UAV가 물리적으로 떨어져 있을수록, 적은 전력량이 필요로 하는 것을 알 수 있다²⁾. 이는 물리적으로 떨어져있을수록 서로의 단말의 채널의 상관도가 떨어져서 서로에게 영향을 미치는 간섭량이 줄어들기 때문에 적은 전력으로도 SINR threshold를 맞출 수 있기 때문이다.

다음으로, 실선과 점선을 비교하면, 안테나 수가 많을수록 적은 전력이 필요한 것을 알 수 있다. 이는 안테나수가 많아짐에 따라 빔포밍 벡터의 자유도가 높아져 더욱 효율적인 구조의 빔포밍 벡터를 설계할 수 있기 때문이다.

또한 모든 결과의 경향에 있어, SINR threshold 값이 증가함에 따라 필요로 하는 전력량이 증가하는 결과를 얻을 수 있었다.

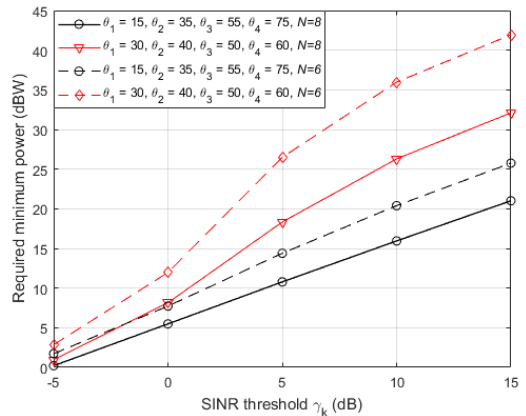


그림 2. γ_k 값 대비 필요로 하는 최소 전력량
Fig. 2. Minimum required power across γ_k

V. 결론

본 논문은 BDMA 기반의 중계기 UAV가 다수의 단말 UAV를 지원할 때, 기준 SINR을 만족하는 데에 필요로 하는 최소의 소비 전력에 대해 연구한다. 이를

위해 최적화 문제를 형성하고 최적의 빔을 설계했으며 수치적 결과를 통해 단말 UAV의 물리적 거리나 중계기 UAV의 안테나 수 등 해당 시나리오에 대한 통찰을 제공한다. 본 연구 결과를 통해 향후 BDMA 기반 다중 UAV 운용 시스템의 가이드라인을 제공할 수 있으며 향후 미래 UAV 운용 테이터링크 설계에 통찰을 제공할 수 있다.

References

- [1] H. Kang, J. Joung, J. Ahn, and J. Kang, "Secrecy-aware altitude optimization for quasi-static UAV base station without eavesdropper location information," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 23, no. 5, pp. 851-854, May 2019.
- [2] H. Kang, J. Joung, and J. Kang, "Power efficient beam design for BDMA-Based relay UAV," in *Proc. KICS Fall Conf.*, Seoul, Korea, Nov. 2019.
- [3] A. Wiesel, Y. Eldar, and S. Shamai, "Linear precoding via conic optimization for fixed MIMO receivers," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 54, no. 1, pp. 161-176, Jan. 2006.