DBpia

논문 20-45-06-22 The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences '20-06 Vol.45 No.06
https://doi.org/10.7840/kics.2020.45.6.1122

빔분할다중접속 기반 다중 무인항공기 소모 전력을 최소화하는 하향 링크 빔포밍 설계

강 홍 구◆, 정 진 곤*, 강 준 혁°

BDMA-Based Downlink Beamforming Design to Minimize Multi-UAV Power Consumption

Honggu Kang◆, Jingon Joung*, Joonhyuk Kang°

요 약

본 연구에서는 빔분할다중접속 기반 중계 무인항공기(unmanned aerial vehicle, UAV)가 다수 단말 UAV들을 지원하는 UAV 기반 중계 시스템에서, 다수 단말 UAV의 quality-of-service (QoS)를 보장함과 동시에 중계 UAV의 전력 소비를 최소화하는 빔포밍을 가상 상향 링크 쌍대성과 라그랑지안 쌍대성을 통해 설계하였다. 또한, 모의실험을 통해 최적 빔포밍 성능을 zero forcing (ZF) 빔포밍과 비교하여 QoS의 문턱 값에 따른 최소의 필요한 전력 소모 값을 보였으며 설계한 빔포밍이 최적의 성능을 보임을 확인하였다. 또한, 중계 UAV 안테나 수와 단말 UAV 위치에 따른 필요한 전력 소모의 최솟값으로부터 향후 연구 방향을 제시한다.

Key Words : UAV communications, BDMA, power minimization, multi-UAV, beamforming

ABSTRACT

In this study, a beam-division multiple-access (BDMA) based UAV relay is considered. The BDMA-based relay UAV transmits signals to multiuser UAVs. Using virtual uplink and Lagrangian dualities, a beamforming vector that minimizes power consumption and sustains quality-of-service (QoS) is designed. Numerical results verify that the designed beamforming achieves the minimum required power consumption irrespective of the QoS threshold for the optimum beamforming performance, compared to a zero-forcing (ZF) beamforming scheme. Furthermore, the numerical results for the minimum required power consumption in terms of the number of antennas at a relay UAV and the position of the user UAVs provide the direction of future work.

Ⅰ. 서 론

최근 군·민간 산업에서 무인이동체(UAV: unmanned aerial vehicle)는 많은 주목을 받고 있으며 다양한 산업을 더욱 발전시킬 수 있는 기술로 주목 받고 있다. 이에 따라 UAV는 감시, 정찰, 물자보급, 이동 수단, 공중 기지국 등 다양한 분야에서 활용한 연구가 활발하게 이루어지고 있다[1-4]. 지상 기지국은

※ 이 논문은 2018년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(2018R1A4A1023826)
◆ First Author : School of Electrical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), khg13@kaist.ac.kr, 학생(박사), 학생회원
° Corresponding Author : School of Electrical Engineering, Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST), jhkang@kaist.edu, 정교수, 종신회원
* School of Electrical and Electronics Engineering, Chung-Ang University, jgjoung@cau.ac.kr, 부교수, 종신회원
논문번호 : 202002-039-A-RE, Received February 28, 2020; Revised March 17, 2020; Accepted March 17, 2020

www.dbpia.co.kr

control and command (C2) 링크를 통해 UAV를 제어한다. 한편, 통달 거리가 먼 non-line-of-sight (NLoS) 채널 환경에서 UAV 통신 성능이 급격히 악화될 수 있으며, 단일 UAV는 한정된 화물 탑재량 및 배터리 제약이 있어 임무 수행이 한정적이며, 그 효율성이 떨어질 수 있다. 이러한 문제를 극복하기 위해 중계 UAV를 활용한 다수의 군집 UAV를 지원하는 시나리오를 생각할 수 있다. 중계 UAV는 장애물이 거의 없는 air-to-air (A2A) 채널 환경 아래, line-of-sight (LoS) 채널 확률을 더욱 높이며[5], 군집 UAV는 임무 분담을 통해 더욱 정교하고 경제적이며 효율적으로 임무 수행을 할 수 있다.

한편, 다중 사용자와 통신하기 위한 다중 접속 기법(multiple access)이 활발히 연구가 되어왔다[2,6-8]. 공간분할 다중접속(SDMA: space division multiple access) 혹은 빔분할 다중접속(BDMA: beam division multiple access)은 시분할 다중접속(TDMA: time division multiple access) 및 주파수분할 다중접속(FDMA: frequency division multiple access)과 비교하여 사용자간의 간섭을 일으킬 수 있지만, 적절한 신호처리 및 조율(coordination)을 통해 TDMA나 FDMA보다 성능을 높일 수 있다. 따라서, BDMA 기반 다중 UAV를 운용하기 위해 적절한 송수신 빔포밍을 설계하여 간섭을 제어하면, 그 성능을 극대화할 수 있다.

본 연구에서는 먼 통달거리에서도 원활한 군집 UAV 통신을 지원하기 위한 중계 UAV를 고려하며, 중계 UAV가 다중 UAV를 BDMA 기반으로 지원하는 시나리오에 대해 연구한다. 해당 시나리오에서 UAV는 한정된 배터리를 가지고 있어 전력 소모에 대해 신중하게 설계할 필요가 있다. 따라서, 본 논문에서는 단말 UAV의 신호 대 간섭 및 잡음비(SINR: signal to interference plus noise ratio)를 보장하며 중계 UAV 전력 소모를 최소화하는 BDMA 빔을 설계 및 제안한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 시스템 모델을 서술하고, III장에서는 소비전력을 최소화하는 문제를 세우고, 가상 상향 링크 쌍대성과 라그랑지안 쌍대성을 통해 최적화하는 방법을 제시한다. 이어서 IV장에서는 모의실험을 통해 최적화한 빔포밍 벡터의 성능을 보이고, 단말 UAV 위치에 따른 성능을 통해 제안한 빔포밍 방식을 검증하고, V장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

Ⅱ. 시스템 모델

그림 1과 같이 지상 기지국과 uniform linear array (ULA) N개 안테나를 갖는 한 중계 UAV가 단일 안테나를 갖는 K대 단말 UAV를 BDMA 방식으로 지원하는 BDMA 기반 중계 UAV 시스템을 고려한다. 이때, k째 단말 UAV로부터의 수신 신호는 다음과 같이 쓸 수 있다:

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

여기서 $\mathbf{h}_k$는 중계 UAV로부터 k째 단말 UAV 사이 $N\times 1$ 채널 벡터, $\mathbf{w}_k$는 $N\times 1$ 빔포밍 벡터, d_k는 데이터 심볼, $n_k \sim CN(0,\sigma^2)$는 정규분포를 따르는 잡음이고, $(\cdot)^H$은 Hermitian 연산을, $\sum_{i=1, i\neq k}^{K} \boldsymbol{h}_k^H \boldsymbol{w}_i d_i$는 k째 단말 UAV에 수신되는 간섭 신호를 나타낸다. (1)로부터 k째 단말 UAV의 SINR은 다음과 같이 나타낼 수 있다:

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

중계 UAV와 단말 UAV 사이에는 LoS 채널이 보장되며, 채널 감쇄는 free space path loss 모델을 따른다고 가정한다. 이 때, 중계 UAV의 ULA와 단말 UAV 사이의 채널 모델은 다음과 같이 표현된다:

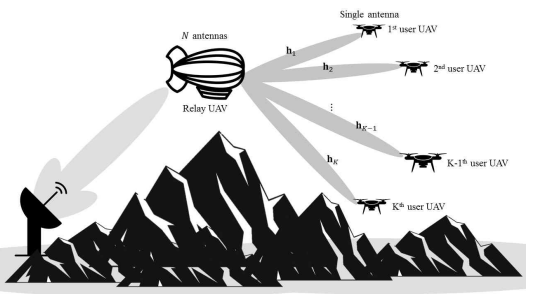


그림 1. 시스템 모델. 한 대의 N 개의 ULA 안테나를 가진 중계 UAV가 K 대의 단일 안테나를 가진 단말 UAV를 BDMA를 통해 신호를 송신함.
Fig. 1. System model. A relay UAV equipped with N antennas transmits signals to K user UAVs equipped with a single antenna by virtue of BDMA.

www.dbpia.co.kr

$$\mathbf{h}_k = \frac{\alpha_0}{d_k^2}\left[1 \quad \exp\left(j\pi\sin\theta_k\right) \quad \cdots \quad \exp\left(j\pi(N-1)\sin\theta_k\right)\right]^H \tag{3}$$

(3)에서 θ_k는 중계 UAV와 k째 단말 UAV 사이의 azimuth 각도를 나타내고, 이 때 중계 UAV와 모든 단말 UAV는 동일한 고도에서 비행한다고 가정하며, $\alpha_0 = G_t G_r \lambda_l / 4\pi$이고, λ_l는 파장의 길이, G_t는 송신 안테나 이득, G_r은 수신 안테나 이득을 의미하며, 안테나 사이의 간격은 $\lambda_l/2$라고 가정한다.

Ⅲ. 소비전력 최적화

본 장에서는 k째 단말 UAV의 quality-of-service (QoS)를 보장함과 동시에, 중계 UAV의 전력 소모를 최소화하는 BDMA 빔 최적화 문제를 형성하고, 최적화 과정을 설명한다. 앞서 I장에서 언급한 SINR_k를 특정 threshold γ_k 이상으로 보장하며 소비 전력을 최소화하는 최적화 문제는 다음과 같이 세울 수 있다:

$$\begin{aligned} \underset{\mathbf{w}_1,\ldots\mathbf{w}_K}{\text{minimize}} \quad & \sum_{k=1}^{K} ||\mathbf{w}_k||_2^2 \\ \text{subject to} \quad & \mathrm{SINR}_k \geq \gamma_k \end{aligned}. \tag{4}$$

여기서, 위 최적화 문제는 NP-complete한 문제이지만, 변형을 통해 최적의 $\mathbf{w}_k$를 효율적으로 찾을 수 있다. 우선, 최적의 $\mathbf{w}_k$가 주어질 때, 모든 제약 조건에 대해서 등식을 항상 만족한다. 만약, 특정 $\mathbf{w}_k$가 제약식의 등식을 만족하지 않는다면, $\mathbf{w}_k$를 더 작은 값으로 스케일링한 $\mathbf{w}_k'$를 얻을 수 있다. $\mathbf{w}_k'$는 비용 함수를 줄일 수 있으며, 모든 제약 조건을 여전히 만족시킬 수 있다. 최적화 문제 (4)의 빔포밍 벡터를 임의의 양수 p_k와 단위 크기 벡터 $\mathbf{u}_k$에 대해 $\mathbf{w}_k = \sqrt{p_k}\mathbf{u}_k$로 표현할 수 있으며, 위 최적화 문제의 비용 함수는 $\sum_{k=1}^{K} p_k$와 동일하다. 해당 문제는 이어지는 1절과 2절에서 가상 상향 링크 쌍대성과 라그랑지안 쌍대성을 통해 다뤄진다.

3.1 가상 상향 링크 쌍대성

본 절에서는 가상 상향 링크 쌍대성 정리 (virtual uplink duality theorem)을 통해 최적화 문제를 변형한다. 일반적으로 하향 링크 문제는 상향 링크 문제 비해 최적화하기가 어렵다[6]. 이는 하향 링크의 빔포밍 벡터가 다른 최적화 제약 조건에도 영향을 끼치는 반면, 상향 링크는 각 최적화 제약 조건에만 영향을 끼치기 때문이다. 따라서, 가상 상향 링크 쌍대성 정리를 통해 하향 링크 문제를 상향 링크 문제로 변형하여 최적화 문제를 풀 수 있다.

만약 모든 시스템에서 잡음의 크기가 모두 동일하면, 즉, $\boldsymbol{\sigma} = \sigma^2\mathbf{1}$ (여기서, $\mathbf{1} = [1,\ldots,1]^T$), 동일한 전력의 합으로, 달성할 수 있는 상향 링크의 SINR은 하향 링크에서도 달성이 가능하다. 다음과 같이 행렬을

$$\mathbf{D} = \begin{bmatrix} \frac{\gamma_1}{\left|\mathbf{u}_1^H\mathbf{h}_1\right|^2} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \frac{\gamma_2}{\left|\mathbf{u}_2^H\mathbf{h}_2\right|^2} & \cdots & 0 \\ \vdots & & \ddots & \\ 0 & 0 & \cdots & \frac{\gamma_K}{\left|\mathbf{u}_K^H\mathbf{h}_K\right|^2} \end{bmatrix}, \tag{5}$$

$$[\mathbf{F}]_{ik} = \begin{cases} \mathbf{u}_k^H\mathbf{h}_i\mathbf{h}_i^H\mathbf{u}_k, & i \neq k, \\ 0, & i = k, \end{cases} \tag{6}$$

로, 전력 벡터 $\mathbf{p} = [p_1,\ldots,p_K]^T$로 정의하면, 모든 k에 대하여 등식 $\mathrm{SINR}_k = \gamma_k$는 다음과 같이 표현할 수 있다:

$$(\mathbf{I} - \mathbf{DF})\mathbf{p} = \mathbf{D}\boldsymbol{\sigma} \tag{7}$$

이와 마찬가지로 상향 링크의 전력 벡터를 $\mathbf{q} = [q_1,\ldots,q_K]^T$로 정의하면, SINR도 다음과 같이 표현할 수 있다:

$$(\mathbf{I} - \mathbf{DF}^T)\mathbf{q} = \mathbf{D}\boldsymbol{\sigma} \tag{8}$$

이 때 $\mathbf{DF}$의 최대 고윳값이 1보다 작다면, Perron-Frobenius 정리에 의하여 $\mathbf{p} = (\mathbf{D}^{-1} - \mathbf{F})^{-1}\boldsymbol{\sigma}$, $\mathbf{q} = (\mathbf{D}^{-1} - \mathbf{F}^{\mathrm{T}})^{-1}\boldsymbol{\sigma}$로 전력 벡터를 얻을 수 있다. 얻어진 전력 벡터는

$$\begin{aligned} ||\mathbf{p}||_1 &= \mathbf{1}^T\left(\mathbf{D}^{-1} - \mathbf{F}^T\right)^{-1}\boldsymbol{\sigma} = \boldsymbol{\sigma}^T\left(\mathbf{D}^{-1} - \mathbf{F}\right)^{-1}\mathbf{1} \\ &= \mathbf{1}^T\left(\mathbf{D}^{-1} - \mathbf{F}\right)^{-1}\boldsymbol{\sigma} = ||\mathbf{q}||_1 \end{aligned} \tag{9}$$

www.dbpia.co.kr

을 만족하기 때문에 동일한 전력 합을 가진다. 동일하지 않은 잡음 크기에 대해서는, 공분산 행렬 $\mathbf{h}_k\mathbf{h}_k{}^H$ 대신 $\mathbf{h}_k\mathbf{h}_k{}^H/\sigma_k^2$로 스케일링하고, 가상 상향 링크 문제로 변형하여, 앞선 철학과 동일하게 문제를 풀 수 있다. 본 논문에서는, 일반성을 잃지 않고, 잡음의 크기가 모두 동일하다고 가정한다. 이 때, 가상 상향 링크 문제는 다음과 같이 설계된다:

$$\begin{aligned} \underset{\mathbf{u}_k,\rho_k}{\text{minimize}} \quad & \sum_{k=1}^{K}\rho_k \\ \text{subject to} \quad & \frac{\rho_k\mathbf{u}_k^H\mathbf{h}_k\mathbf{h}_k^H\mathbf{u}_k}{\mathbf{u}_k^H\left(\sum_{i\neq k}\rho_i\gamma_i\mathbf{h}_i\mathbf{h}_i^H+\mathbf{I}\right)\mathbf{u}_k}\geq 1 \\ & ||\mathbf{u}_k||^2=1 \end{aligned} \tag{10}$$

여기서 ρ_k는 가상 상향 링크의 가상 전력이다. 그러면, (9)의 최적화 문제는 빔포밍 벡터와 가상 전력을 각각 수렴할 때까지 업데이트하는 과정을 반복하여 풀 수 있으며, 이 때 얻은 빔포밍 벡터와 가상 전력의 최적의 값이다. 최적의 값으로 수렴한다는 것은 standard function approach로 증명할 수 있다[7]. 최종적으로 얻어낸 결과를 통해 하향 링크에서 최적의 빔포밍 벡터와 전력을 얻을 수 있다. 반복적으로 가상 상향 링크 문제 (9)를 푸는 과정은 다음과 같은 알고리즘 1로 표현할 수 있다:

알고리즘 1: 가상 상향 링크 최적화 알고리즘

Initialize $\rho_k(1)=1$ for $k=1,2,\ldots,K$, and $t=1$
while $|\rho_k(t)-\rho_k(t-1)|<\epsilon$ **do**
1. Beamforming vector update:
Find $\mu_k=\max_{||\mathbf{u}_k||=1}\frac{\rho_k(t)\mathbf{u}_k^H\mathbf{h}_k\mathbf{h}_k^H\mathbf{u}_k}{\mathbf{u}_k^H\left(\sum_{i\neq k}\rho_i\gamma_i\mathbf{h}_i\mathbf{h}_i^H+\mathbf{I}\right)\mathbf{u}_k}$
and the corresponding vector $\mathbf{u}_k$ for $k=1,2,\ldots,K$
2. Power control update:
$\rho_k(t+1)=\frac{\gamma_k}{\mu_k}\rho_k(t)$
$t\leftarrow t+1$
end while

알고리즘 1에서 빔포밍 벡터 $\mathbf{u}_k$와 μ_k를 얻는 과정은 일반 고윳값 분해 (generalized eigendecomposition)을 통해 최대 고윳값과 고유 벡터를 찾는 문제와 동일하다.

$$\rho_k(t)\mathbf{h}_k\mathbf{h}_k^H\mathbf{u}_k=\mu_k\left(\sum_{i\neq k}\rho_i(t)\gamma_i\mathbf{h}_i\mathbf{h}_i^H+\mathbf{I}\right)\mathbf{u}_k \tag{11}$$

이는, MMSE filter 혹은 Wiener filter와도 동일한 결과를 얻게 해준다. 알고리즘 1에서 ρ_k 값이 수렴하면, (4)에 대한 최적화 빔포밍 벡터는 다음과 같이 얻을 수 있다:

$$\begin{bmatrix}p_1\\ \vdots\\ p_K\end{bmatrix}=\mathbf{M}^{-1}\begin{bmatrix}\sigma^2\\ \vdots\\ \sigma^2\end{bmatrix} \tag{12}$$

$$\mathbf{M}_{ij}=\begin{cases}\frac{1}{\gamma_i}\left|\mathbf{h}_i^H\mathbf{u}_i\right|^2, & i=j,\\ -\left|\mathbf{h}_i^H\mathbf{u}_j\right|^2, & i\neq j,\end{cases} \tag{13}$$

$$\mathbf{w}_k=\sqrt{p_k}\mathbf{u}_k \tag{14}$$

$\mathbf{M}_{ij}$는 행렬 $\mathbf{M}$의 (*i*,j)번째 요소를 의미한다.

3.2 라그랑지안 쌍대성

본 절에서는 라그랑지안 쌍대성을 활용하여 문제를 다룬다. 우선 문제 (4)를 convex하게 재형성하기 위해 어떤 $\theta_k^{'}$에 대해서도 $\mathbf{w}_k$와 $e^{j\theta_k^{'}}\mathbf{w}_k$는 SINR 값 및 비용함수에 영향을 미치지 않는다는 것을 통해, $\mathbf{h}_k^H\mathbf{w}_k$를 양의 실수로 만들어 제약 조건을 다음과 같이 쓰일 수 있게 한다:

$$\frac{1}{\sqrt{\gamma_k\sigma^2}}\mathrm{Re}(\mathbf{h}_k^H\mathbf{w}_k)\geq\sqrt{\sum_{i\neq k}\frac{1}{\sigma^2}|\mathbf{h}_k^H\mathbf{w}_i|^2+1} \tag{15}$$

여기서 $\mathrm{Re}(\cdot)$는 실수부를 나타내는 연산을 의미한다. 그러면 재형성된 제약 조건은 second-order cone 제약 조건이 되고 Slater의 제약 조건 qualification이 만족된다. 그러면, 재형성된 최적화 문제는 strong duality를 만족하며 Karush-Kuhn-Tucker (KKT) 조건들은 최적의 솔루션에 대해 필요충분한 조건이다. 이러한 특성은 (4)에 대해서도 만족하고 (4)에 대한 라그랑지안 함수는 다음과 같이 정의할 수 있다:

$$\begin{aligned} &L(\mathbf{w}_1,\ldots,\mathbf{w}_K\lambda_1,\ldots,\lambda_K)= \\ &\sum_{k=1}^{K}\|\mathbf{w}_k\|^2+\sum_{k=1}^{K}\lambda_k\left(\frac{1}{\sigma^2}|\mathbf{h}_k^H\mathbf{w}_i|^2+1-\frac{1}{\gamma_k\sigma^2}|\mathbf{h}_k^H\mathbf{w}_k|^2\right) \end{aligned} \tag{16}$$

여기서 $\lambda_k\geq 0$는 *k*번째 SINR 제약 조건의 라그랑

www.dbpia.co.kr

제 승수다. 여기서 stationarity KKT 조건을 이용하면, 최적의 빔포밍 벡터는 다음과 같다:

$$\mathbf{w}_k = \left(\mathbf{I}_N + \sum_{i=1}^{K} \frac{\lambda_i}{\sigma^2}\mathbf{h}_i\mathbf{h}_i^H\right)^{-1}\mathbf{h}_k \frac{\lambda_k}{\sigma^2}\left(1+\frac{1}{\gamma_k}\right)\mathbf{h}_k^H\mathbf{w}_k \quad (17)$$

여기서 $\mathbf{I}_N$는 $N\times N$ 단위 행렬이다. 식 (17)에서 $\lambda_k/\sigma^2(1+1/\gamma_k)\mathbf{h}_k^H\mathbf{w}_k$는 스칼라다. 따라서 $\mathbf{w}_k$는 $\left(\mathbf{I}_N+\sum(\lambda_i/\sigma^2)\mathbf{h}_i\mathbf{h}_i^H\right)^{-1}\mathbf{h}_k$과 같은 방향을 갖는 벡터라는 것을 알 수 있다. 그러면 최적의 빔포밍 벡터 $\mathbf{w}_1^*,\ldots,\mathbf{w}_K^*$는 다음과 같이 표현할 수 있다:

$$\mathbf{w}_k^* = \sqrt{p_k}\,\mathbf{u}_k^* = \sqrt{p_k}\,\frac{\left(\mathbf{I}_N + \sum_{i=1}^{K} \frac{\lambda_i}{\sigma^2}\mathbf{h}_i\mathbf{h}_i^H\right)^{-1}\mathbf{h}_k}{\left\|\left(\mathbf{I}_N + \sum_{i=1}^{K} \frac{\lambda_i}{\sigma^2}\mathbf{h}_i\mathbf{h}_i^H\right)^{-1}\mathbf{h}_k RIGHT\| RIGHT\|} \quad (18)$$

이 때, 앞서 보인 것처럼 최적의 값에서 제약 조건 (15)가 등식을 만족한다는 것을 알 수 있다. 따라서 K개의 선형 식으로부터 K개의 빔포밍 전력을 얻을 수 있고, (13) 식으로부터 $\mathbf{p}=\mathbf{M}^{-1}\boldsymbol{\sigma}$과 같이 표현할 수 있다.

이제 최적의 빔포밍 벡터를 구하기 위해서는 $\lambda_1,\ldots,\lambda_K$를 찾으면 되는데, 이는 $\lambda_1,\ldots,\lambda_K$를 임의의 값으로 초기화하고 fixed-point 기법을 통해 구할 수 있다[8]. 이 때 구한 최적의 빔포밍 벡터는 III-1장에서 얻은 것과 동일하다.

Ⅳ. 모의실험 결과

본 장에서는 모의실험 결과와 결과에 따른 통찰을 제공한다. 모의실험을 위한 매개변수의 값은 표 1과 같다. 또한 벤치마크로서 zero forcing (ZF) 빔포밍 벡터를 고려하였으며, 각 단말 UAV의 주어진 SINR threshold 값은 모두 동일하며 ($\gamma_k=\gamma\,\forall k$), feasibility가 보장되는 환경에서 실험하였다.

그림 2는 단말 UAV과 중계 UAV 사이의 각도가 표 2의 Deployment 1을 따르고, 중계 UAV 송신 안테나수 $N=4,6,10$이며, ZF 빔포밍 벡터와 III장에서 기술한 최적의 빔포밍 벡터가 적용될 때, SINR thrshold γ_k 값에 따른 소비되는 전력의 최솟값을 보여준다. 최적의 빔포밍 벡터를 사용하면, ZF 빔포밍 벡터보다 적은 전력을 사용하여 주어진 SINR threshold 값을 성취할 수 있으며, threshold 값이 증가함에 따라 그 차이는 적어진다. 이는 threshold 값이 증가함에 따라, 시스템의 요구사항을 맞추기 위해 더 많은 전력 소모가 요구되는데, 이에 따라 잡음보다 간섭의 영향이 커지기 때문이다. 또한, 안테나 수가 증가함에 따라 전체적으로 더 적은 전력 소모가 요구되는데, 이는 많은 안테나로 더욱 정교한 빔을 설계할 수 있기 때문이며, 그에 따라 ZF 빔포밍 벡터와 최적 빔포밍 벡터 사이의 성능 차이도 줄어든다.

그림 3은 중계 UAV의 안테나가 6개이고, 중계 UAV와 단말 UAV 사이의 각도가 표 2와 같이 Deployment 1, Deployment 2, Deployment 3일 경우, 최적의 빔포밍 벡터와 ZF 빔포밍 벡터의 성능을 비교한다. 역시 최적 빔포밍 벡터는 ZF 빔포밍 벡터와 비교하여 더 적은 전력 소모를 할 수 있다. 단말 UAV의

표 1. 모의실험 매개변수 값
Table 1. Parameter for numerical simulations

σ^2	-123 dBW
$d_k\,\forall k$	100 km
$G_t=G_r$	-1.5 dB
λ_l	0.02 m
K	4

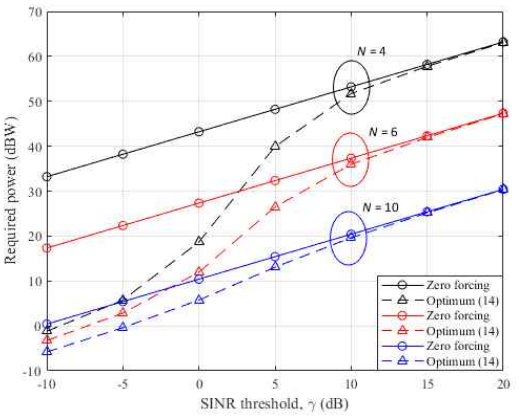


그림 2. ZF 빔포밍 벡터 ('o' 마커의 실선)과 최적 빔포밍 벡터 ('△' 마커의 파선) 적용시 SINR 문턱값 대비 필요한 소비 전력. 중계 UAV는 4개의 안테나 (검은선), 6개의 안테나 (빨간선), 10개의 안테나 (파란선)을 가지고 있음.
Fig. 2. Required power across SINR threshold for ZF beamforming vector (solid line with 'o' marker) and optimum beamforming vector (dashed line with '△' marker). The relay UAV is equipped with 4 antennas (black lines), 6 antennas (red lines), and 10 antennas (blue lines).

www.dbpia.co.kr

표 2. 중계 UAV와 단말 UAV 사이의 각도 값
Table 2. Anlge between relay UAV and user UAVs

	θ_1	θ_2	θ_3	θ_4
Deployment 1	30°	40°	50°	60°
Deployment 2	0°	30°	60°	90°
Deployment 3	−30°	20°	70°	120°

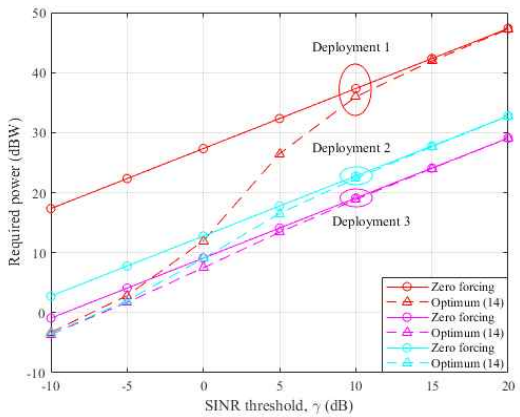


그림 3. ZF 빔포밍 벡터 ('o' 마커의 실선)과 최적 빔포밍 벡터 ('△' 마커의 파선) 적용시 SINR 문턱값 대비 필요한 소비 전력. 단말 UAV는 deployment 1 (빨간선), deployment 2 (청록선)와 deployment 3 (자홍선)에 위치해 있다.
Fig. 3. Required power across SINR threshold for ZF beamforming vector (solid line with 'o' marker) and optimum beamforming vector (dashed line with '△' marker). The user UAVs are located in deployment 1 (red lines), deployment 2 (cyan lines), and deployment 3 (magenta lines).

위치에 따라 전력 소모에 큰 영향을 미치는 것을 알 수 있다. 이는 단말 UAV의 위치에 따라 서로 채널 상관도가 변하기 때문이며, 일반적으로 공간적인 위치가 멀어질수록 간섭의 영향이 적어져 적은 전력소모가 필요하게 되는 것을 알 수 있다.

그림 4는 $\gamma = 10$ dB 일 때, 최적 빔포밍 벡터 환경 아래에서 각도 분리 값에 따른 필요 소모 전력을 나타낸다. 각도 분리 값은 각 단말 UAV와 중계 UAV 사이의 각도의 차이, 즉, $\theta_k - \theta_j$ $(k \neq j)$의 값을 나타낸다, 예를 들어, 10도 간격일 때, $\theta_k = 20 + 10k$이다. 결과를 보면, 특정 위치를 갖는 단말 UAV는 그렇지 않은 경우보다 필요한 소비 전력을 줄이는 것을 관찰 할 수 있다. 식 (3)을 참조하면, 사인 함수의 특성으로, 즉, $\sin\theta = \sin\pi - \theta$, 채널 상관도가 증가하기 때문이다.

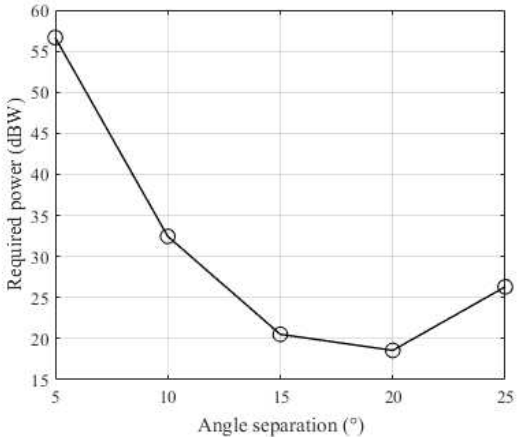


그림 4. 최적 빔포밍 벡터 적용시 각도 분리 값 대비 필요한 소비 전력.
Fig. 4. Required power across SINR threshold for optimum beamforming vector.

V. 결 론

본 연구에서는 BDMA 기반의 중계 UAV를 통하여 다수의 단말 UAV를 운용할 때, 단말 UAV의 통신 성능 QoS를 보장하며 중계 UAV 소비 전력을 최소화하는 빔을 설계하였다. 빔을 최적화하기 위해 가상 상향 링크 쌍대성과 라그랑지안 쌍대성을 제시하였으며, 이를 통해 얻은 BDMA 빔의 성능을 모의실험을 통해 평가하였다. 그 결과 제시한 최적 빔포밍 벡터는 ZF에 비해 낮은 소비전력을 요구함을 확인할 수 있었으며, 다수의 단말 UAV들이 위치에 따라서 중계 UAV에서 필요로 하는 소비전력이 달라질 수 있다는 것을 확인하였다. 본 실험 결과는 향후 중계 UAV를 통해 단말 UAV를 지원하는 시스템 설계에 있어 참고될 수 있는 지표로써 중요한 결과라 할 수 있다. 향후 단말 UAV 위치 설계에 있어 다양한 안테나 구조를 고려할 계획이다.

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. Park, C.-H. Hwang, and J. Kang, "Beam design for power minimization of

www.dbpia.co.kr

BDMA-Based UAV operation," *J. KICS*, vol. 45, no. 2, pp. 281-284, Feb. 2020.

[3] H.-B Jeon, T. Jung, and C.-B. Chae, "Energy-efficient clustering algorithm for UAV-BSs with low-complexity," *J. KICS*, vol. 44, no. 10, pp. 1856-1859, Oct. 2019.

[4] D. Oh, J. Lee, J. Lim, and K. Kim, "An airborne communication relay UAV model for locating the GPS-Denied crashed UAV," *J. KICS*, vol. 44, no. 6, pp. 1163-1172, Jun. 2019.

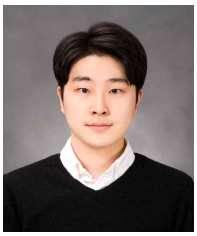
[5] H. Kang, J. Joung, and J. Kang, "A study on probabilistic line-of-sight air-to-ground channel models," in *Proc. 2019 34th ITC-CSCC*, pp. 831-832, JeJu, Korea, Jun. 2019.

[6] M. Schuber and H. Boche, "Solution of the multiuser downlink beamforming problem with individual SINR constraints," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 53, no. 1, pp. 18-28, Jan. 2004.

[7] F. Rashid-Farrokhi, L. Tassiulas, and K. J. R. Liu, "Joint optimal power control and beamforming in wireless networks using antenna arrays," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 46, no. 10, pp. 1313-1324, Oct. 1998.

[8] A. Wiesel, Y. Eldar, and S. Shamai, "Linear precoding via coninc optimization for fixed MIMO receivers," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 54, no. 1, pp. 161-176, Jan. 2006.

강 홍 구 (Honggu Kang)



2017년 2월 : 한양대학교 융합전자공학부 학사

2019년 2월 : 한국과학기술원 전기및전자공학부 석사

2019년 3월~현재 : 한국과학기술원 전기및전자공학부 박사과정

<관심분야> UAV 통신, 확률 기하, 신호처리

[ORCID:0000-0003-2138-8641]

정 진 곤 (Jingon Joung)

2001년 2월 : 연세대학교 전파공학과 학사

2003년 2월 : 한국과학기술원 전기및전자공학부 석사

2007년 2월 : 한국과학기술원 전기및전자공학부 박사

2007년 3월~2008년 8월 : 한국과학기술원 전기및전자공학부 박사후연구원

2008년 9월~2009년 10월 : UCLA, Research Fellow

2009년 10월~2016년 2월 : I2R, Singapore, 연구원

2016년 3월~현재 : 중앙대학교 전자전기공학부, 교수

<관심분야> UAV 통신, 기계학습, 통신신호처리 등

[ORCID:0000-0002-9551-1123]

강 준 혁 (Joonhyuk Kang)

1991년 : 서울대학교 제어계측공학과 졸업

1993년 : 서울대학교 제어계측공학과 석사

2002년 : The University of Texas at Austin 전자컴퓨터공학과 박사

2003년~2009년: ICU 부교수

2009년~현재: 한국과학기술원 전기및전자공학부 정교수

<관심분야> 무선통신, 신호처리, 인지무선통신, 실내위치인식 등

[ORCID:0000-0002-5508-3742]

www.dbpia.co.kr