

# 노드 선택 기법을 활용한 3차원 협력 빔형성의 사이드로브 제어

한지은, 정해준, 신현동

경희대학교

[jehan@khu.ac.kr](mailto:jehan@khu.ac.kr), [haejoonjung@khu.ac.kr](mailto:haejoonjung@khu.ac.kr), [hshin@khu.ac.kr](mailto:hshin@khu.ac.kr)

## Sidelobe Control for Three-Dimensional Collaborative Beamforming using Node Selection

Han Jieun, Jung Haejoon, Hyundong Shin  
Kyung Hee University

요약

6세대 통신(6G)에서는 기존의 지상 네트워크와 위성, 무인 이동체(UAV)를 포함한 비지상 네트워크(NTN)의 통합을 통해 전 지구적 연결이 달성될 것으로 예상된다. 이에 따라서 의도된 수신자에게 신뢰할 수 있는 통신 링크를 형성함과 동시에 의도치 않은 수신 측으로의 간섭을 관리하는 3차원 네트워크 구축이 매우 중요하다. 본 연구에서는 협력적 빔형성을 통하여 안정적인 링크를 생성하는 동시에 원하지 않는 수신기에 대한 간섭을 줄일 수 있는 사이드로브 제어 기법을 제안한다. 대부분 기존의 협력적 빔형성 연구는 2차원 네트워크에 초점을 맞추었으나, 본 논문에서는 3차원 네트워크에서 전송 범위를 확장하거나 개별 송신기의 전력 효율을 높이는 전략으로 여러 대의 UAV를 사용하는 협력 빔포밍을 고려한다. 또한, 본 논문에서는 기존에 2차원에서 연구되었던 기존 연구를 확장하여 협력 빔형성에 참여하는 무인이동체를 선택하여 간섭을 억제하는 3차원 간섭 관리 기법을 제안하였다. 3차원 uniform 분포와 Gaussian 분포에 따라 배치된 무인이동체를 활용한 빔형성 시뮬레이션을 통해, 본 연구에서 제안한 알고리즘의 확장이 3차원 네트워크 환경에서 효과적으로 간섭을 제어할 수 있음을 보여준다.

### I. 서론

무인이동체 (unmanned aerial vehicle, UAV)의 운용상의 유연성으로 인해 UAV의 활용처가 군사, 구조 작업 그리고 환경 모니터링 등 다양한 영역으로 확대되고 있다. 또한, 개별 UAV은 전력 및 하드웨어 제약이 존재하지만, 다수의 UAV가 협업을 통해 협력 그룹을 구성하여 더욱 효율적인 작업 수행이 가능하다. 통신영역에서는, 단일 UAV 대비, 다수의 UAV는 가상 안테나 배열을 구성하여 협력 빔포밍(Collaborative Beamforming, CB)을 통해 송신 거리 증대가 가능하다. CB를 통한 빔포밍 시, 발생하는 사이드로브를 제어하는 기법 중, 디스크 형태의 2차원 (two-dimensional, 2D) 네트워크를 가정한 노드 선택 알고리즘이 연구되었다[1].

UAV를 포함한 비지상 플랫폼들이 실제로는 3차원 (three-dimensional, 3D) 상 배치되어 있지만, 대부분의 기존 연구는 2D 네트워크를 가정하여 수행되었다. 이러한 기존 연구의 한계에 착안하여, 본 논문에서는 송신기를 3D uniform 및 Gaussian분포를 따르는 다수의 UAV로 가정한다. 특히, CB로 인해 발생하는 사이드로브가 의도치 않은 수신기에 간섭으로 작용하는 상황에 대해, 2D 상 고안된 노드 선택 알고리즘을 확장한다. 이를 통해 여러 UAV 중, 특정 UAV를 CB에 참여하는 노드로 선정하여 의도치 않은 방향으로의 사이드로브를 특정 임계치 이하로 제한한다.

### II. 시스템 모델

본 논문에서는 의도된 수신기 1개와 1개 이상의 의도치 않은 수신기가 고정된 위치에 있고 송신 UAV  $M$ 개가 랜덤하게 분포된 구형 3D 네트워크를 가정한다. 소스 노드  $S$ 는 UAV 네트워크 중심에 위치한다고 가정하며, 의도된 수신기  $D$ 의 위치는 구면좌표계  $P_D(\rho_0, \varphi_0, \vartheta_0)$ 로 표기한다. 반면, 다수의 의도치 않은 수신기  $U_q$ 는 모든  $q \in \{1, \dots, Q\}$ 에 대해  $P_{D_q}(\rho_q, \varphi_q, \vartheta_q)$ 로 표기한다. CB에 참여하는 UAV 개수는  $N (< M)$ 으로 가정한다. 또한,  $m$ 번째 UAV는  $m \in \{1, \dots, M\}$ 에 대해

$P_m(r_m, \phi_m, \theta_m)$ 로 표기하며  $r_m$ 은 클러스터 중심으로부터의 거리이고  $\phi_m$ 과  $\theta_m$ 은 각각 azimuth 및 elevation 각도를 의미한다. 3D uniform 분포의 결합확률분포는 다음과 같다.

$$f_{r_m, \phi_m, \theta_m}(r, \phi, \theta) = \frac{3\sin\theta}{4\pi R^3} r^2 \quad (1)$$

여기서, 각 파라미터는  $0 \leq r \leq R$ ,  $-\pi \leq \phi < \pi$  그리고  $0 \leq \theta \leq \pi$ 를 만족한다. 3D Gaussian 분포의 결합확률분포는 다음과 같다.

$$f_{r_m, \phi_m, \theta_m}(r, \phi, \theta) = \frac{\sin\theta}{(2\pi)^{3/2} \kappa^3} r^2 e^{-\frac{r^2}{2\sigma^2}} \quad (2)$$

여기서, 각 파라미터는  $\kappa \geq 0$ ,  $r \geq 0$ ,  $-\pi \leq \phi < \pi$  그리고  $0 \leq \theta \leq \pi$ 를 만족한다. 송신 UAV를 포함한 모든 노드는 등방성 안테나를 장착하고 각 타임 슬롯마다 UAV를 랜덤하게 선정하여 test CB를 수행한다. 이때 test CB에 참여하는 UAV 집합을 active UAVs라 하며, 그 크기는  $L$ 이다.

### III. 협력 빔포밍 신호 모델

본 논문에서는 송신 UAV가  $D$ 로부터의 비콘 신호에 기반하여 위상을 조정하는 폐쇄 루프 시나리오를 가정한다.  $m$ 번째 UAV로부터 3차원 구좌표계를 따르는 수신 위치  $(\rho, \varphi, \vartheta)$ 까지의 거리는 다음과 같다.

$$d_m(\rho, \varphi, \vartheta) = \frac{\sqrt{\rho^2 + r_m^2 - 2\rho r_m \times (\sin\vartheta \sin\theta_m \cos(\varphi - \phi_m) + \cos\vartheta \cos\theta_m)}}{\quad} \quad (3)$$

CB수행 시, 각 노드의 초기 위상은  $D$ 에 맞춰지고 각 노드의 공통 위상 편차는  $P_D(\rho_0, \varphi_0, \vartheta_0)$ 에서 상쇄되므로,  $m$ 번째 UAV의 초기 위상은  $-\frac{2\pi}{\lambda} d_m(\rho, \varphi, \vartheta_0)$ 으로 설정된다. 여기서,  $\lambda$ 는 파장을 의미한다. 그리고 송신 UAV는 동시에 신호를 송신하여  $D$ 에서 보강 간섭이 발생한다. 그러므로

UAV와 수신기 사이를 line-of-sight 채널로 가정하면, 특정 위치  $(\rho, \varphi, \vartheta)$ 에서의 array factor는 다음과 같다[2].

$$AF(\rho, \varphi, \vartheta) = \sqrt{P} \sum e^{\frac{j2\pi}{\lambda}(d_m(\rho, \varphi, \vartheta) - d_m(\rho_0, \varphi_0, \vartheta_0))} \quad (4)$$

$$\approx \sqrt{P} \sum \frac{1}{\rho} e^{\frac{j2\pi}{\lambda}(d_m(\rho, \varphi, \vartheta) - d_m(\rho_0, \varphi_0, \vartheta_0))}$$

여기서 (a)는 far-field를 가정하여  $\rho \gg r_m$ 를 따르며  $P$ 는 각 UAV의 송신 전력을 의미한다. 총 송신 전력을 송신 UAV 개수와 무관하게 유지하기 위해  $P = P_{\max}/L$ 을 따른다. 특정 위치에서의 수신 전력  $\Upsilon(\rho, \varphi, \vartheta)$ 은  $|AF(\rho, \varphi, \vartheta)|^2$ 로 정의된다.

#### IV. 사이드로브 제어

본 연구는 [1]에서 제안된 노드 선택 알고리즘을 3D 네트워크에 적용한다. 노드 선택 알고리즘을 통해 최종적으로 CB에 참여하는  $N$ 개의 UAV를 선정한다. 여기서  $N$ 개 UAV는 CB를 통해 방사하는 사이드로브의 잡음 대비 간섭(interference-to-noise ratio, INR)이 의도치 않은 수신기  $U_q$ 에서 INR 임계치  $\eta_{th}$ 를 넘기지 않도록 선정된다. 한 번의 시도로 INR 요구사항을 만족하는  $N$ 개의 UAV를 찾기 어렵기 때문에  $L$ 개의 UAV를 무작위로 선정하여 active UAVs를 구성하고 test CB를 수행한다. 이때, 모든  $U_q$ 에 대해 INR 요구사항을 만족하면 해당 active UAVs는 CB에 참여하는 UAV로 선정된다. CB에 참여하는 노드로 선정되면 다음번 active UAVs에 포함될 수 없다. test CB 결과 INR 요구사항을 만족하지 않으면 active UAVs는 해체되고 다시 active UAVs를 선정하는 작업을 수행한다. 이러한 과정을 반복하여 최종적으로 CB에 참여하는  $N$ 개 UAV 선정을 완료한다.

#### V. 시뮬레이션 결과 및 결론

표 1. 시뮬레이션 파라미터 요약

시뮬레이션 파라미터	값
총 UAV 개수 ( $M$ )	256
CB에 참여하는 UAV 개수 ( $N$ )	128
test에 참여하는 UAV 개수 ( $L$ )	16
과장으로 정규화된 반경( $\tilde{R}$ )	2
INR 임계치 ( $\eta_{th}$ )	10 [dB]
CB 총 송신 파워 ( $P_{\max}$ )	5 [W]
잡음 전력 ( $\nu^2$ )	0.05 [W]
의도된 수신기 위치( $\rho_0, \varphi_0, \vartheta_0$ )	(1km, $0^\circ$ , $90^\circ$ )
3D Gaussian 분포의 표준편차( $\chi$ )	$R/3$

본 장에서는 3D 네트워크에서 사이드로브 제어 알고리즘을 검증하며, 표 1의 파라미터가 적용된다.

그림 1은 의도치 않은 수신기가 클러스터 형태로 존재하는 경우의 시뮬레이션 결과를 보여준다. 각 클러스터의 중심위치( $\varphi, \vartheta$ )는  $(90^\circ, 135^\circ)$  및  $(-100^\circ, 90^\circ)$ 로 설정하였으며, 각 클러스터는 X-표기된 7개의 의도치 않은 수신기로 구성된다. 그림 1 (a) 및 (b)는 3D uniform 및 Gaussian 분포에서 제안된 기법의 결과를 보여준다. 또한, 그림 1. (c) 및 (d)는 그림 1. (a) 및 (b)와 동일한 결과를 보여주지만, 3D로 표현하여 빔패턴으로써 수신 전력을 표현한다. 수신 전력은 잡음 전력으로 정규화하여 dB 단위로 표현하였다. 이 결과를 통해, 3D로 확장된 기법이 의도치 않은 수신기와의 간섭을 효과적으로 제어할 수 있음을 확인할 수 있다.

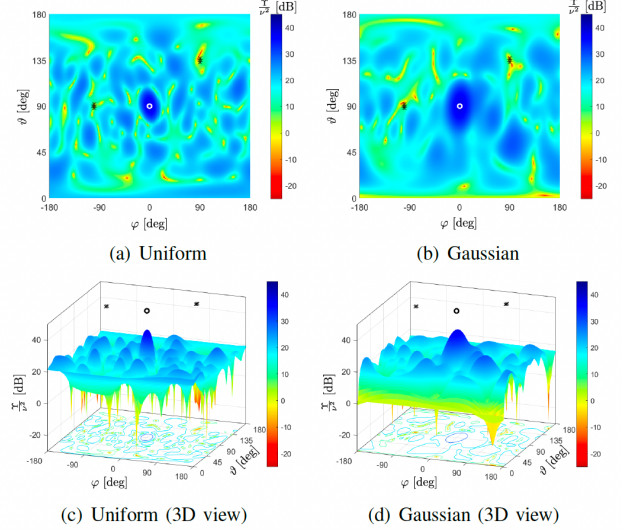


그림 1. 의도치 않은 수신기가 클러스터 형태로 존재하는 경우의 정규화된 수신 전력

본 연구는 3D 네트워크상 랜덤하게 배치된 다수의 송신기가 CB를 통해 far-field에 위치한 수신기로 빔을 송신하는 경우에 대해, 의도치 않은 방향으로의 사이드로브 제어를 위해 2D 상 개발된 노드 선정 방식을 확대 적용하였다. 그리고 해당 사이드로브 제어 기법이 uniform 및 Gaussian 분포 모두에 대해 3D 네트워크에서도 유효함을 확인하였다.

#### ACKNOWLEDGMENT

This work was supported by the MSIT, Korea, in part under the National Research Foundation of Korea grants (RS-2023-00303757, NRF-2022R1A4A3033401, and NRF-2022R1F1A1065367) and in part under the ITRC support programs (IITP-2024-2021-0-02046) supervised by the IITP.

#### 참고 문헌

- [1] M. F. A. Ahmed and S. A. Vorobyov, "Sidelobe control in collaborative beamforming via node selection," in IEEE Transactions on Signal Process., vol. 58, no. 12, pp. 6168-6180, Dec. 2010.
- [2] K. Buchanan and G. H. Huff, "A stochastic mathematical framework for the analysis of spherically-bound random arrays," in IEEE Transactions on Antennas Propag., vol. 62, no. 6, pp. 3002-3011, Jun. 2014.