

분산형 빔 합성을 위한 UAV 군집 배치 최적화

윤성권¹, 정홍석¹, 박철순², 전종화³, 조세민³, 주형준³, 김선우^{1*}

한양대학교¹, 국방과학연구소², 한화시스템³

{ysk37, hssjung, remero}@hanyang.ac.kr,

csun1402@add.re.kr,

{jonghwa.jeon, semin9508, junie.ju}@hanwha.com

UAV Swarm Deployment Optimization for Distributed Beam Synthesis

Seongkwon Yoon¹, Hongseok Jung¹, Cheol-Sun Park², Jonghwa Jeon³, Semin Jo³,

Hyung-Jun Ju³ and Sunwoo Kim^{1*}

Hanyang University¹, Agency for Defense Development², Hanwha Systems³

요 약

본 논문은 1 GHz 대역에서 운용되는 UAV(unmanned aerial vehicle) 군집의 배치 최적화가 분산형 빔 합성 성능에 미치는 영향을 분석한다. 8 대 UAV(총 16 요소)의 3 차원 배열에 대해 X/Y 축 최소 1 m, Z 축 최소 0.65 m 의 제약을 부여하고, 빔 합성 성능 지표를 목적함수로 하는 다목적 유전알고리즘 통해 UAV 배치를 최적화하였다. 각 목적함수는 동일한 가중으로 평가되며 Pareto 최적해를 도출하였다. 이후 knee-point 해를 선정해 최적 배치 조건을 확정하고, 해당 배치에서 DAS(delay and sum), MVDR(minimum variance distortionless response), LCMV(linearly constrained minimum variance) 세 가지 빔 합성 기법의 성능을 비교하였다. 시뮬레이션은 1GHz 단일 주파수에서 수행되었으며, 각 기법의 성능을 평가하였다.

I. 서 론

최근 UAV 로 분산형 가상 안테나 배열을 구성해 분산 빔 합성을 수행하는 연구가 활발하다. 가변형 분산 배열은 고정식 배열의 한계를 보완하지만, 무인 이동체 간의 간격과 탑재 안테나 수 등의 제약으로 인한 SLL(side lobe level) 상승과 ML(main lobe)의 주변에 모호성이 발생한다[1]. 이에 본 연구는 배치 자체를 핵심 설계변수로 삼아 다목적 유전알고리즘으로 UAV 배치를 최적화하고, 신호처리 기반 빔 합성 방식에서 HPBW(half-power beamwidth), SLL, SINR(signal to interference plus noise ratio), 모호성을 지표로 빔 합성 성능을 비교한다. 본 논문은 1GHz 대역을 사용하는 안테나가 탑재된 UAV 군집의 배치를 다목적 유전알고리즘으로 배치 최적화를 진행하며 모호성 판단 기준을 포함한 평가 체계를 제시한다.

II. 시스템 모델 및 환경

본 연구에서는 UAV 8 대로 구성된 분산형 안테나 배열 시스템을 모델링하였다. 각 UAV 에는 1 GHz 대역에서 동작하는 안테나가 2 개씩 탑재되어 있으며, 전체 시스템은 총 16 개의 분산 배열 안테나 요소로 이루어져 있다. 각 안테나 소자의 방사 패턴은 이상적인 등방 방사로 가정하지 않고, 그림 1 과 같은 사전에 측정된 radiation pattern 을 참조하여 방사 특성을 적용하였다. 시뮬레이션은 1 GHz 대역에서 진행되었다.

이러한 UAV 기반 대규모 분산 배열은 분산 배열의 특성상 요소 간 간격이 일반적인 반 파장 간격보다 크게 벌어지므로 배열을 부적절하게 설계할 경우 grating lobe 와 같은 부엽이 발생할 수 있기에 최적화 기법을 통해 부엽을 억제하면서도 원하는 빔 성능을 확보한다.

UAV 간 배열 구성에는 일정한 간격 제약을 부과하였다. 구체적으로, UAV 들 사이의 X, Y 축 방향 최소 거리는 1 m, Z 축 방향 층간 최소 거리는 0.65 m 로 설정하였다.

Azimuth cut (1GHz, elevation=90°)

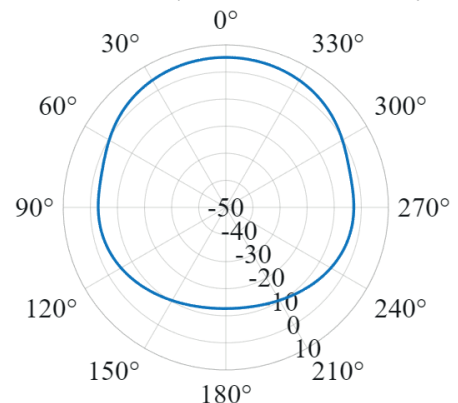


그림 1. Azimuth-plane radiation pattern

이러한 제약을 통해 UAV 들이 3 차원 공간상에서 과도하게 밀집되지 않도록 하여, 배열 성능을 유지함과 동시에 물리적 간섭이나 충돌 위험을 방지할 수 있다. 여러 상충되는 요구 사항들을 균형적으로 만족시키기 위해 안테나 배치 최적화 문제에 다목적 유전 알고리즘 MOGS(multi-objective genetic algorithm)을 적용하였다. 최적화를 위한 목적 함수에는 모두 동등한 가중치를 부여하였고, 첫번째로 SLL 을 최소화하여 불필요한 부엽 방사를 억제하였다. 둘째, HPBW 을 최소화하여 주엽의 지향성을 향상시킨다. 셋째, 평균 부엽 레벨(ASLL, average side lobe level)과 피크 부엽 비율(PSLR, peak side lobe ratio)을 모두 감소시켜 전체 부엽 에너지를 줄인다. 넷째, UAV 간 최소 거리 제약 조건 위반을 방지하여 배열 배치의 물리적 타당성을 확보한다. 특히, 거리 제약 조건은 적합도 함수에 벌점(penalty) 항으로 포함하여 해당 기준을 충족하지 못하는 해는 진화 과정에서 도태되도록 하였다. 초기의 해는 탐색 초기에 충분한 다양성을 확보하기 위해 랜덤 배열과 격자 배열 등 다양한 배열들로 구성하였다. 이러한 다목적 최적화

접근을 통해 상충 관계에 있는 여러 성능 지표들을 균형 있게 개선할 수 있다.

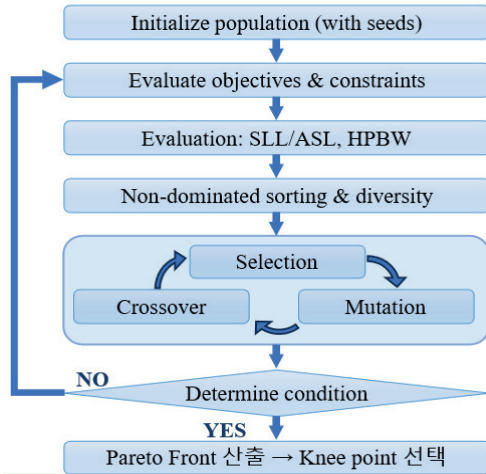


그림 2. 다목적 유전 알고리즘의 순서도

각 후보 배열의 성능은 SLL, HPBW, SINR 등의 지표로 산출되었으며, non-dominated sorting 기법을 적용하여 상호 지배하지 않는 해로 이루어진 Pareto 최적해 집합(pareto front)을 도출하였다. Pareto front 내의 해들 중에서는 성능 개선 효율이 급격히 떨어지는 구간에 위치한 knee-point 에 해당하는 해를 최종 솔루션으로 선정하고, 그에 대응하는 UAV 배열 배치를 최적으로 결정하였다.

선정된 최적 배열에 대해 세 가지 대표적인 빔 형성 알고리즘을 적용하여 빔 합성 결과를 비교 분석하였다. 본 연구에서는 지연 합산 방식의 DAS 과 통계적 최적화 기반의 적응형 빔 합성 기법인 MVDR 및 LCMV 를 사용하였다. 다양한 특성의 빔 형성 기법을 적용함으로써 최적 배열의 주엽 형상과 부엽 특성을 평가하였다.

III. 시뮬레이션 결과

본 연구에서는 MOGA 를 통해 도출된 1 GHz 대역의 안테나를 탑재한 UAV 배치 최적화를 진행하였으며 빔 합성 지표를 통해 optimized array 를 구성하였다. UAV 8 대는 XY 평면에서 비 균일하게 배치되었으며, XZ 및 YZ 측면에서 확인되는 것처럼 Z 축 방향으로 100 m ~ 120 m 고도 범위에서 그림 3과 같이 3차원 적층 구조를 형성하였다.

그림 4는 1 GHz 에서 DAS, MVDR, LCMV 세 빔 합성 방식의 radiation pattern 을 azimuth plane 에서 중첩한 결과이다. 세 기법 모두 주엽 방향은 0°로 조향되었고, LCMV (빨간색), MVDR (파란색), DAS (회색)의 빔 형상을 비교할 수 있다. 모든 기법에서 HPBW 는 동일하였으나, SLL 과 SINR 에서 유의한 차이를 보였다.

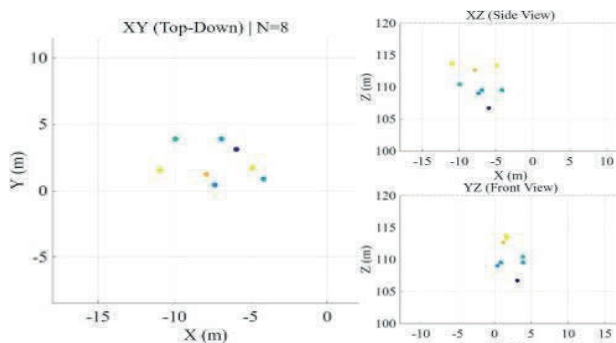


그림 3 다목적 유전알고리즘을 통한 최적 UAV 배치

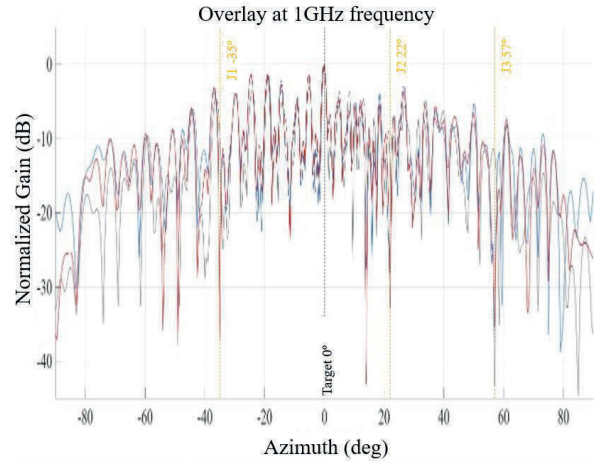


그림 4. 1GHz 대역에서 빔 합성 방식에 따른 방사 패턴

표1. 최적화 배치에서 빔 합성 방식별 결과

Beamformer	HPBW (°)	SLL (dB)	SINR (dB)
LCMV	2.0	-1.2	-17.4
MVDR	2.0	-1.2	-16.8
DAS	2.0	-1.6	-24.3

LCMV 빔 합성 방식에서 SLL 은 -1.2 dB, SINR 은 -17.4 dB 를 기록하였다. MVDR 은 SLL 은 동일하였으나 SINR 이 -16.8 dB 로 LCMV 보다 약 0.6 dB 낮은 SINR 을 보였다. 두 기법 모두 주엽 근방에서 급격한 노치 형성이나 주엽 대비 0.5 dB 이내의 부엽 피크가 없어 모호성(ambiguity) 판단 기준을 만족하지 않았다.

반면 DAS 빔 합성 방식은 가중치 최적화를 수행하지 않기 때문에 주엽이 가장 넓게 형성되었고 SLL 은 -1.6 dB, SINR 은 -24.3 dB 로 형성되었다. 주엽 양측에 깊은 노치가 발생하고 주엽 대비 0.5 dB 이내의 부엽 피크가 존재하여, ambiguity 가 발생하였다.

표 1 과 같이 LCMV 와 MVDR 은 비슷한 HPBW 를 유지하면서도 부엽 억제 성능이 우수하였고, DAS 는 간단하지만 SINR 열화와 패턴 불안정성을 보였다. 특히 LCMV 는 SLL 억제와 SINR 균형을 가장 잘 유지하여, OA(over-the-air) 환경에서 모호성 없이 안정적인 빔 합성을 제공할 수 있었다.

IV. 결론

본 연구는 UAV 배치 자체를 설계 변수로 하여 다중 제약 조건을 동시에 고려하는 다목적 유전알고리즘 기반 시스템을 제시하며 빔 합성 방식에 따른 성능 비교를 통해, UAV 배치와 빔 합성 모델 공동설계의 유효성을 입증하였다. 향후 과제로는 주파수 확장과 온라인 재배치 및 제약 업데이트가 가능한 모델로 고도화가 필요하다.

ACKNOWLEDGMENT

본 논문은 정부(방위사업청)의 재원으로 미래도전국방기술과제 (No.915087201)를 통해 연구가 수행되었다.

참 고 문 헌

- [1] Li, Jiahui, et al. "Multi-objective optimization for UAV swarm-assisted IoT with virtual antenna arrays." *IEEE Transactions on Mobile Computing* 23.5 (2023): 4890-4907.