위상 동기 및 측위 정보 없이 동작하는 군집 드론 기반 다중 방위각 추정 기법 연구

임상훈, 김선교*
한화시스템, *국방과학연구소

sh.im@hanwha.com, *skkim0416@add.re.kr

UAV Swarm-Based Multi-DOA Estimation Without Inter-UAV Phase Synchronization or Position Information

Sanghun Im, Seon-Kyo Kim*
Hanwha Systems, *ADD.

요 약

본 논문에서는 군집 드론 분산 서브어레이 환경에서, 드론 간 위상 동기 및 개별 드론의 절대 측위 정보 없이 다수 송신원의 방위각(Direction-of-Arrival, DOA)을 추정하기 위한 스펙트럼 융합 기법을 제안한다. 각 드론에서 로컬 Capon 스펙트럼을 계산한 뒤, 이를 곱과 합의 비에 자연로그를 취한 형태의 글로벌 스펙트럼으로 융합함으로써, 개별 서브어레이 수준에서는 하나의 방향만 뚜렷이 보이는 상황에서도 근접한 다중 방위각을 동시에 분리해낼 수 있음을 보인다. 시뮬레이션 결과, 제안된 스펙트럼 융합 방식은 단순 합 또는 단순 곱만을 사용하는 경우보다 근접 DOA 에 대해 더 우수한 각도 분해능과 피크 분리 성능을 나타냈다. 제안 기법은 군집 드론과 같은 분산 센서 플랫폼에서 전역 동기·정밀 측위 인프라 없이도 고해상도 DOA 추정을 가능하게 하는 실용적인 수신 처리 구조로 활용될 수 있다.

Ⅰ. 서 론

다수의 센서가 공간적으로 분산된 배열(distributed array)을 구성하여 다중 송신원의 방위각을 추정하는 문제는 레이더, 무선 위치추정, 간섭원 탐지 등 다양한 응용에서 중요한 연구 주제이다. 최근에는 다수의 소형 드론을 군집(swarm)으로 운용하여, 넓은 지역에 분산 배치된 가상 대형 배열을 형성하고, 이를 통해 고해상도 방향탐지를 수행하려는 시도가 활발하다. 이론적으로 군집 전체 안테나를 하나의 거대 배열로 취급하면, 매우 큰 유효 개구(aperture)를 얻을 수 있어 각도 분해능과 방위각 추정 정확도가 크게 향상될 수 있다. 그러나 군집 드론 환경에서 전통적인 배열 신호처리 기법을 그대로 적용하기 위해서는, 1) 모든 드론 간의 시간·주파수·위상 동기가 매우 정밀하게 맞추어져야 하고, 2) 각 드론의 절대 위치 및 자세 정보가 파장 대비 충분히 작은 오차 범위로 추정되어야 한다. 실제 운용 환경에서는 바람, 플랫폼 기동, GPS 및 관성센서의 오차 등으로 인해 드론의 위치와 자세가 지속적으로 변동하며, 공중 플랫폼 간 동기를 서브 나노초(ns) 수준으로 유지하는 것은 구현 난이도와 비용 측면에서 비현실적인 경우가 많다. 그 결과, 전역(coherent) 배열을 전제로 하는 고전적인 DOA 추정 기법은 배열 매니폴드 불일치에 의해 심각한 성능 저하를 겪게 된다.

한편, 각 드론 내부에는 상대적으로 작은 크기의 서브어레이를 구성할 수 있으며, 이 경우 안테나 간 이격은 기계적으로 고정되고 동일한 클럭/로컬 오실레이터를 공유하므로, 서브어레이 내부에서는 고전적인 Capon 스펙트럼 분석과 같은 고해상도 DOA 추정 기법을 적용할 수 있다[1]. 따라서 본 논문에서는 전체 군집을 하나의 거대 배열로 보려는 대신, 드론별 서브어레이 차원에서 DOA 정보를 추출하고, 이를 비동기적으로 융합하는 구조를 제안한다. 본 논문에서는 특히, 드론별 서브어레이를 구성할 때 안테나 이격 간격을 서로 다르게 설계하여, 동일한 다중 송신원이 드론마다 서로 다른 steering 벡터 집합과 선형 공간을 스팬하도록 하는 구조에 주목한다. 이렇게 하면, 두 송신원이 가까운 방위각에 위치하더라도 어떤 드론에서는 두 피크가 잘 분리되고, 다른 드론에서는 다른 형태로 변형되는 등, 드론별 Capon 스펙트럼에 서로 다른 정보가 담기게 된다. 이후 이 상이한 스펙트럼들을 적절한 방식으로 융합하면, 전역 동기/측위 정보 없이도 고해상도 DOA 추정을 기대할 수 있다.

이에 본 논문에서는 드론별 공분산 행렬로부터 계산된 Capon 스펙트럼을 입력으로 하되, 스펙트럼의 단순 합이나 단순 곱이 아닌 곱/합 비율에 로그를 취한 글로벌 Capon 스펙트럼을 정의하고, 이 구조가 특히 근접한 두 송신원에 대해 각도 분해능을 향상시키는 이유를 분석한다.

Ⅱ. 시스템 모델 및 제안 기법

본 m번째 드론의 수신 신호 모델은 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{y}_m(n) = \boldsymbol{\Sigma}_{i=1}^{I} \mathbf{a}_{i,m}(\theta_i)\phi_{i,m}(\theta_i, \hat{\mathbf{p}}_m)\phi_m s_i(n) + \mathbf{n}(n)$$

여기서 $\mathbf{a}_i(\theta_i)$ 는 i 번째 수신 신호 $s_i(n)$ 의 어레이 응답이고, $i = 1,2,\ldots,I$ 이다. 드론의 측위 정보 $\hat{\mathbf{p}}_m$ 따른 드론 간 상대 위상 지연($\phi_{d,m}(\theta_d, \hat{\mathbf{p}}_m)$)과 드론 간 동기 오차 ϕ_m은 알 수 없다고 가정한다. $s_i(n) \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_i^2)$.

제안알고리즘은 다음과 같이 동작한다. 드론 m은 N개 스냅샷으로부터 공분산 행렬을 다음과 같이 계산한다.

$$\hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{y}_m} = \frac{1}{N}\sum_{n=1}^{N} \mathbf{y}_m(n)\mathbf{y}_m^H(n)$$

아래와 같이 공분산을 구하는 과정에서 드론 위치 $\hat{\mathbf{p}}_m$에 따른 위상 지연 성분 $\phi_{i,m}(\theta_i, \hat{\mathbf{p}}_m)$과 드론 간 동기 오차 ϕ_m은 상쇄되어 제거된다.

$$\mathbf{R}_{\mathbf{y}_m} = \mathbb{E}[\mathbf{y}_m(n)\mathbf{y}_m^H(n)] = \Sigma_{i=1}^{I}\mathbf{a}_{i,m}(\theta_i)\mathbf{a}_{i,m}^H(\theta_i)\sigma_i^2 + \sigma_n^2\mathbf{I}_M.$$

다음으로 드론 별 Capon 스펙트럼 $P_m(\theta)$를 연산 후, 그 결과를 융합하는 분산방향탐지스펙트럼 $P_{DDF}(\theta)$를 생성한다.

$$P_{DDF}(\theta) = \ln\left[\frac{\prod_{m=1}^{M} P_m(\theta)}{\sum_{n=1}^{N} P_m(\theta)}\right] = \frac{\sum_{n=1}^{N}\ln[P_m(\theta)]}{\ln[\sum_{n=1}^{N} P_m(\theta)]}$$

여기서 $P_m(\theta) = \frac{1}{|\mathbf{a}^H(\theta)\hat{\mathbf{R}}_{\mathbf{y}_m}^{-1}\mathbf{a}(\theta)|}$ 이다. 마지막으로 다중 신호원 방향 탐지는 $P_{DDF}(\theta)$로부터 K개의 첨두값 탐지를 통해 $\hat{\theta}_1, \ldots, \hat{\theta}_K$을 획득한다.

드론 당 2 개의 아테나 소자로 구성된 서브어레이는 기본적으로 한 개의 강한 DOA 에 대해 가장 뚜렷한 피크를 형성하며, 근접한 두 송신원에 대해서는 피크가 합쳐지거나 사이드로브와 섞여 분해능이 제한된다. 본 논문에서는 드론 별 Capon 스펙트럼의 곱 항을 통해 Capon 스펙트럼 여러 드론이 공통적으로 강한 응답을 보이는 송신원 수신방향의 첨두 값을 강화하고, 드론 별 Capon 스펙트럼의 합 항을 통해 드론 하나에서만 튀는 이상 첨두 값을 억제하였다. 이를 통해 인접한 방위각에서 수신되는 송신원을 탐지하기 위한 높은 분해능을 가질 수 있었다.

Ⅲ. 실험 결과 및 결론

제안 알고리즘 성능 검증을 위해 드론 8 대에 각각 2 대의 안테나가 탑재되어 있고, m 번째 드론의 두 안테나간 간격은 다음과 같이 정의하였다.

$$d_m = d_{min} + \frac{m}{M}(d_{max} - d_{min}),\ d_{min} = 1\lambda, d_{max} = 6\lambda$$

그림 1 은 두 신호원이 SNR 0dB 로 수신되는 환경에서 -30 도와 10 도에서 방향에서 수신되는 환경에서 분산 방향탐지 스펙트럼과 방향 탐지를 결과를 보여준다. 0dB 의 낮은 SNR 에서도 2 개의 방향탐지 결과가 추정되는 것을 확인할 수 있다. 다음으로 3 개의 신호원(SNR 0dB)이 각각 -30, -10, 30 도로 수신되는 환경에서의 방향탐지 결과를 그림 3 을 통해 도시하였다. 0dB 의 낮은 SNR 에서도 3 개의 방향탐지 결과가 잘 추정되는 것을 확인할 수 있다. 개별 드론의 서브어레이는 2 소자 구조로 인해 이론적인 degree of freedom 이 1 에 불과하여, 단독으로는 단일 DOA 추정만 가능하다. 반면 제안된 알고리즘에서는 글로벌 스펙트럼 융합 기법을 적용하여, 이러한 제한을 극복하고, 최대 3 개의 송신원에 대한 DOA 를 동시에 분해하여 추정할 수 있음을 시뮬레이션을 통해서 확인하였다.

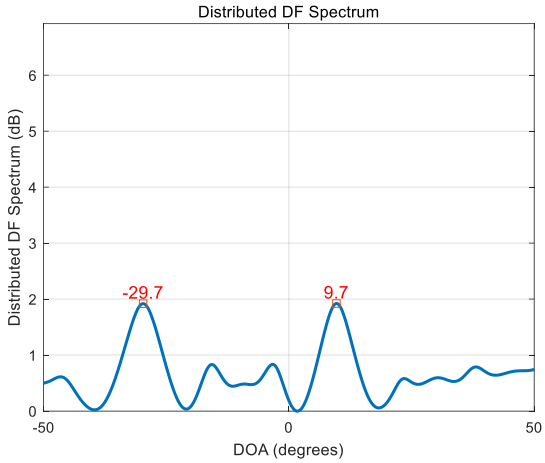

그림 1 분산방향탐지 스펙트럼과 방향탐지 결과 (2 개의 Low SNR 수신 신호원)

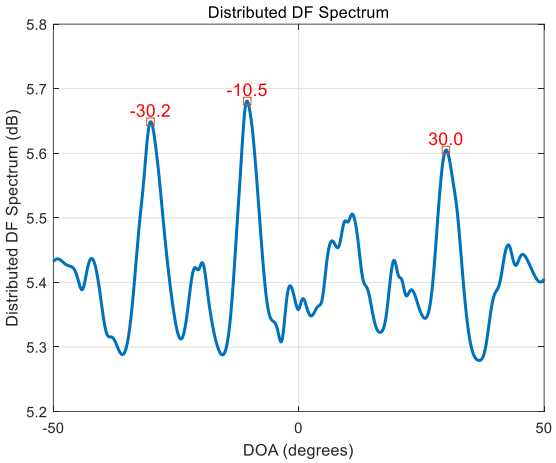

그림 2 분산방향탐지 스펙트럼과 방향탐지 결과 (3 개의 Low SNR 수신 신호원)

본 논문에서는 군집 드론 기반 분산 배열 환경에서 드론 간 위상 동기 및 개별 드론의 절대 측위 정보 없이 다수 송신원의 방위각을 추정하기 위한 Capon 스펙트럼 융합 기법을 제안하였다. 각 드론은 서로 다른 안테나 이격 간격을 갖는 서브어레이를 사용하여, 동일한 다중 입사 신호에 대해 서로 다른 선형 공간을 스팬하는 Capon 스펙트럼을 생성한다. 제안된 글로벌 스펙트럼 $P_{DDF}(\theta)$ 는 드론 별 Capon 스펙트럼의 곱과 합의 비에 자연 로그를 취한 형태를 이용하여여러 드론에서 공통으로 나타나는 날카로운 피크를 강조하고, 넓게 퍼진 에너지나 개별 드론에서만 발생하는 이상 피크를 억제하였다. 이는 서로 다른 서브어레이 기하가 생성하는 상이한 선형 공간 정보가 곱/합-로그 구조를 통해 효과적으로 결합되면서, 전역 동기/정밀 측위 없이도 고해상도 DOA 추정을 가능하게 한다는 것을 실험을 통해 검증하였다.

ACKNOWLEDGMENT

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

참 고 문 헌

[1] J. Capon, “High-resolution frequency-wavenumber spectrum analysis,” Proceedings of the IEEE, vol. 57, no. 8, pp. 1408-1418, Aug. 1969.