

드론 측위 오차 성능에 따른 범형성 성능의 영향 및 Robust Adaptive Beamforming 을 통한 성능 개선 효과 분석

임상훈, 박동혁, 강희석, 장재원*, 박철순*
한화시스템, *국방과학연구소

sh.im@hanwha.com

Impact of Drone Localization Errors on Beamforming Performance and Enhancement via Robust Adaptive Beamforming

Sanghun Im, Donghyuk Park, Heeseog Kang, *Jaewon Chang, *Cheolsun Park
Hanwha Systems, *Agency for Defense Development

요약

본 논문에서는 diagonal loading 기법을 활용한 RAB(Robust Adaptive Beamforming 알고리즘을 소개하고, 드론의 측위오차에 따른 범합성 성능 영향성을 분석하였다. 기존 범합성 알고리즘을 대상으로 드론 측위 오차의 크기에 따른 범형성 성능 저하 정도를 분석하였고, RAB 알고리즘 적용에 따른 성능 개선 효과를 비교 분석하였다.

I. 서론

최근 들어 군집 드론을 이용하는 분산형 범형성 연구가 활발히 이루어지고 있다[1]. 군집 드론을 통해 상공에서 안테나가 전개되면 지형/지물이나 지구 곡면의 영향을 적게 받아 지상 대비 원거리에 존재하는 신호원에 대한 가시선거리(Line of Sight, LOS) 확보가 용이하다. 또한 개별 드론이 수신한 신호의 범형성을 통한 고이득 신호 수신으로 원거리 저피탐 신호에 대한 고감도 신호 수신이 가능하다. 특히 탐지하고자하는 신호원의 방향과 주파수에 따라 공간적으로 분산된 배열을 최적화하여 유연하게 재배치할 수 있다. 이를 통해 간섭 신호를 효과적으로 억제함으로써 관심 신호 수신을 위한 높은 SINR(Signal to Interference plus Noise Ratio) 확보가 가능하다. 그러나 군집 드론을 이용한 범형성 성능은 개별 드론의 정확한 위치 정보에 크게 의존한다. 그러나 위치 측위 시스템은 현실적으로 오차를 동반하며, 이러한 측위 오차는 배열특성공간(array manifold)의 변화를 유발한다. 더 나아가 물리적으로 떨어져 있는 드론 간 시각 동기 오차로 위상 오차로 인해 범형성을 통한 간섭 신호 억제 능력이 감소하고, 지향 방향 이득이 감쇄되어 결과적으로 SINR 이 저하되는 문제를 야기한다.

MVDR(Minimum Variance Distortionless Response), LCMV(Linearily Constrained Minimum Variance) 등 기존 범형성 알고리즘은 높은 간섭 억제 성능을 갖는 알고리즘으로 잘 알려져 있다. 하지만 관심 신호(SOI)의 방향과 제거하고자하는 간섭 신호의 방향을 방향탐지 알고리즘을 통해서 추정 하여 획득하기에 해당 정보에 불확실성이 존재하는 경우와 측위 오차 등에 의해 안테나의 위치에 오차가 있어 배열특성공간 정보가 불확실한 경우 간섭 신호 억제 능력이 저하되고, 지향 방향 이득이 떨어지는 등 SINR 성능이 열화 된다[2]. 따라서 측위 오차에 따른 범형성 성능 저하를 극복하기 위한 RAB 알고리즘으로 diagonal loading, Worst-case optimization 등 다양한 연구가 수행되었다[2].

본논문에서는 배열특성공간에 오차가 존재하고, 관심 신호(SOI, Signal of Interest)의 방향에 대한 불확실성이 존재하는 환경이 범형성 성능에 미치는 악영향을 분석하고, 이러한 환경에 강건한 RAB(Robust Adaptive Beamforming)알고리즘을 적용할 시, 기대되는 성능 개선 효과를 M&S를 통해 분석하였다.

II. 시스템 모델

측위오차가 반영된 군집 드론의 배치 모델은 다음과 같다. M 대의 드론이 배치되어 있을 때, i 번째 드론의 측위 위치를 $\mathbf{p}_i^0 = [x_i^0 y_i^0 z_i^0]^T$ 라고 하면, 실제 위치는 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{p}_i = \mathbf{p}_i^0 + \Delta \mathbf{p}_i, \Delta \mathbf{p}_i = [\Delta x_i \Delta y_i \Delta z_i]^T$$

여기서 측위오차 $\Delta x_i, \Delta y_i, \Delta z_i \sim \mathcal{N}\left(0, \frac{\sigma_{\Delta p}^2}{2}\right)$ 이다.

드론의 측위 위치 행렬 $\hat{\mathbf{P}} = [\mathbf{p}_1 \mathbf{p}_2 \cdots \mathbf{p}_N]$ 이다.

$L+1$ 개의 서로 다른 입사 방향 (θ_m, ϕ_m) 에서 수신되는 원거리 신호원이 있을 때, 각 신호원 m 에 대한 파수 벡터 \mathbf{k}_m 은 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{k}_m = [\sin(\theta_m) \cos(\phi_m), \cos(\theta_m) \cos(\phi_m), \sin(\phi_m)]^T$$

θ_m, ϕ_m 은 각각 방위각과 고각을 의미한다. 본 논문에서 Array factor는 전방위 0dB를 가정하였다.

수신 신호 모델은 다음과 같이 표현된다.

$$\mathbf{y}(n) = \mathbf{a}_d(\theta_d, \phi_d) s_d(n) + \sum_{i=1}^I \mathbf{a}_i(\theta_i, \phi_i) s_i(n) + \mathbf{n}(n)$$

여기서 $\mathbf{a}_d(\theta_d, \phi_d)$ 는 관심 신호의 어레이 응답이고, $s_d(n)$ 은 관심 신호이며 $s_d(n) \sim \mathcal{CN}(0, \sigma_d^2)$ 이다.

$\mathbf{a}_i(\theta_i, \phi_i)$ 는 i 번째 간섭 신호의 어레이 응답이고, I 개의 간섭 신호가 있다고 가정한다. $s_i(n)$ 은 i 번째 간섭 신호를 의미하며, $s_i(n) \sim i.i.d. \mathcal{CN}(0, \sigma_i^2)$, $s_d(n)$ 와 $s_i(n)$ 은 서로 상관 관계가 없다고 가정한다.

수신 신호의 추정 방위각과 대응되는 측위 오차가 반영된 어레이 응답의 추정치는 다음과 같이 정의된다.

$$(\hat{\theta}_d, \hat{\phi}_d), \hat{\mathbf{a}}_d(\hat{\theta}_d, \hat{\phi}_d, \hat{\mathbf{P}})$$

III. Robust Adaptive Beamforming (RAB) Algorithm

DL(Diagonal Loading)은 방향탐지 오차를 포함한 어레이 응답의 오차에 의한 성능 열화를 최소화하기 위한 RAB(Robust Adaptive Beamforming)기술의 일종이다. 일반적인 DL 알고리즘의 솔루션은 다음과 같이 표현된다[2].

$$\mathbf{w}_{DL} = \frac{(\hat{\mathbf{R}}_y + \rho \mathbf{I})^{-1} \hat{\mathbf{a}}_d}{\hat{\mathbf{a}}_d^H (\hat{\mathbf{R}}_y + \rho \mathbf{I})^{-1} \hat{\mathbf{a}}_d}$$

여기서 ρ 는 diagonal loading factor이다. 측위 오차에 의한 성능 열화를 최소화하기 위해 최적화된 ρ 값을 선정하는 것이 중요하며 HKB1), QC2), SMF3), GLC4) 등 최적의 diagonal loading factor ρ 를 구하기 위한 알고리즘이 꾸준히 연구되었다[2]. 특별 케이스로 $\rho \rightarrow 0$ 일 때, $\mathbf{w}_{DL} = \mathbf{w}_{MVDR}$ (MVDR과 동일한 솔루션)이다. $\rho \rightarrow \infty$ 일 때, $\mathbf{w}_{DL} = \hat{\mathbf{a}}_d / \|\hat{\mathbf{a}}_d\|$ 이며, 간접 제거와 상관 없이 지향 방향 최대 이득을 주는 범형성 결과가 도출된다.

IV. 실험 결과 및 결론

본 논문에서는 성능 지표로 SINR을 통해 범형성 알고리즘의 성능을 비교하였다. SINR은 다음 수식을 통해서 구할 수 있다.

$$SINR = \frac{\sigma_d^2 |\mathbf{w}^H \mathbf{a}_d(\theta_d, \phi_d)|^2}{\mathbf{w}^H \mathbf{R}_{i+n} \mathbf{w}}$$

여기서 \mathbf{R}_{i+n} 은 잡음 및 간접 신호 공분산 행렬을 의미한다.

실험 환경으로 측위 오차 $\sigma_{\Delta p}$ 는 0.1λ , 0.034λ , 0.01λ 를 고려하였다. 관심 신호의 SNR은 0dB, 수신 방향은 $\phi_d=0^\circ$, $\theta_d=-15^\circ$, 간접 신호의 SNR은 20dB, 수신 방향은 $\phi_d=0^\circ$, $\theta_d=20^\circ$ 를 가정하였다. 그림 1,2,3은 범형성 알고리즘에 따른 범파턴을 보여준다. $\sigma_{\Delta p}$ 0.01λ 에서 0.1 까지 증가하더라도, diagonal loading 기법이 적용된 MVDR 알고리즘은 지향 방향 이득을 유지하면서, 간접을 충분히 제거하는 범파턴 성능을 보여준다. 표 1에서와 같이 기준 두 알고리즘은 측위 오차의 분산 값이 증가할수록 급격하게 성능이 열화 되는 것을 관찰할 수 있다. 반면 DL 기법이 적용된 MVDR을 사용 시 측위 오차가 존재하더라도 이를 극복하여 오차가 존재하지 않을 시와 유사한 SINR 성능을 유지하는 것을 M&S를 통해 확인하였다.

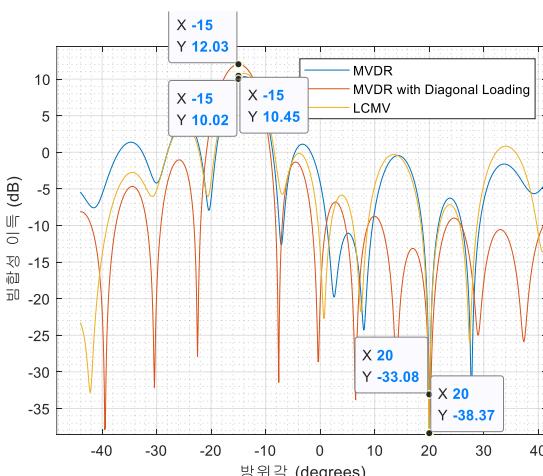


그림 1 범파턴 성능 비교 ($\sigma_{\Delta p} = 0.01\lambda$)

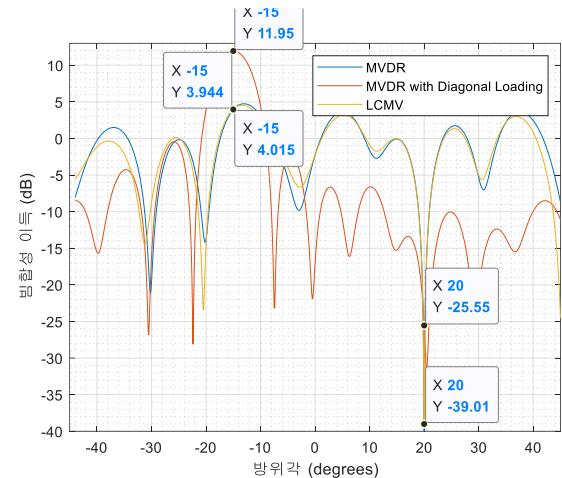


그림 2 범파턴 성능 비교 ($\sigma_{\Delta p} = 0.034\lambda$)

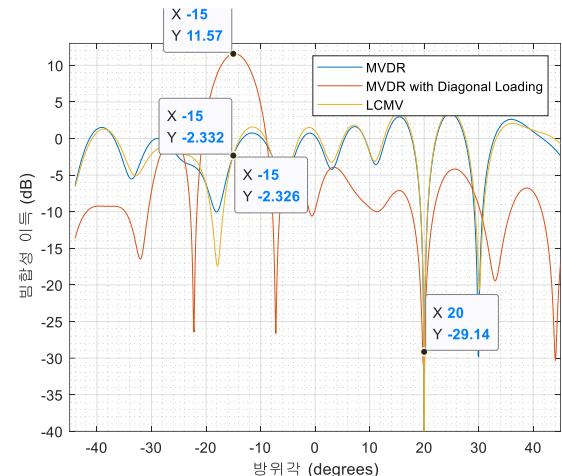


그림 3 범파턴 성능 비교 ($\sigma_{\Delta p} = 0.1\lambda$)

표 1 알고리즘 별 측위 오차에 따른 SINR 성능

측위오차($\sigma_{\Delta p}$)	SINR 성능(dB)		
	DL	MVDR	LCMV
0.01λ	12	10.1	9.54
0.034λ	11.6	4.2	6
0.1λ	11	-2.33	-2.34

ACKNOWLEDGMENT

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

참고 문헌

- [1] 김경민 외, "기체 흔들림에 따른 멀티콥터 기반 분산형 범합성 성능 평가," 한국군사과학기술학회 추계학술대회, pp. 684-685, 2023.
- [2] Y. Ke, C. Zheng, R. Peng, and X. Li, "Robust Adaptive Beamforming Using Noise Reduction Preprocessing-Based Fully Automatic Diagonal Loading and Steering Vector Estimation," IEEE Access, July 11, 2017.