

협력 빔포밍의 군사적 효용성 및 동기화 기술 동향 연구

오세명
국방과학연구소

Study on the Defense Utility and the Current Synchronization Techniques of Collaborative Beamforming

Semyoung Oh
Agency of Defense Development

요약 초소형 센서는 높은 휴대성과 효율성으로 인해 국방 및 민간 분야에서 다양한 용도로 사용되고 있다. 하지만, 공간적 제약을 최소화하고 사용자 편의성을 높이고자 배터리 등의 제한된 동력원을 탑재하여 장거리 및 고속 데이터 통신에 적합하지 않다. 다행히, 협력 빔포밍을 통해 이러한 문제를 해결할 수 있다. 해당 기술은 주변 센서와의 데이터 공유와 위상 동기화를 유도하여 수신기 혹은 데이터 허브가 위치한 목표 방향으로 고이득 지향성 빔을 형성할 수 있다. 이를 통해 장거리 및 고속 통신 제약을 해소할 수 있으며, 초소형 센서의 활용성 또한 개선할 수 있다. 하지만, 이러한 이점에도 불구하고, 국내에서는 협력 빔포밍과 핵심 기술인 동기화 관련 연구가 전무한 실정이다. 따라서, 본 논문은 국방분야에서 협력 빔포밍의 효용성을 먼저 분석하고자 한다. 나아가, 폐 루프 및 개방 루프와 같은 동기화 기술의 최신 동향을 살펴볼 것이며, 이를 통해 협력 빔포밍의 연구 필요성 판단과 연구 소요 기간 단축에 이바지하고자 한다.

Abstract Small sensors have been widely used for various purposes in defense and commercial areas due to their portability and affordability. However, their limited battery-based energy resources restrict long-range and high-speed data transmission. Fortunately, this problem can be solved by cooperative beamforming, which can form a high-gain directional beam in the desired direction of a receiver or data hub by data sharing and phase synchronization with surrounding sensors. Furthermore, this technique can overcome the long-distance and high-speed communication limitations of small sensors and improve their usability. Nevertheless, no domestic study has addressed the topic of collaborative beamforming. This study explores the potential of collaborative beamforming in defense applications and reviews its current synchronization methods, such as closed or open loops. In addition, it provides research targets and outlines the need to develop collaborative beamforming.

Keywords : Small Sensors, Collaborative Beamforming, Wireless Communications, Radar, Synchronization

1. 서론

최근 반도체 소형화 및 패키징 기술의 발전으로 민간 및 국방 분야에서 초소형 센서 (예, IoT 단말 장비 및 드론)가 활발히 활용되고 있다. 예를 들어, 민간 분야에서는 온도, 습도 및 조도 등을 모니터링하는 스마트 홈 센

서, 그리고 맞춤형 헬스 케어 서비스를 위한 생체 신호 수집용 웨어러블 센서가 사용되고 있다[1-3]. 또한, 국방 분야에서는 레이더 및 광학 센서를 장착한 소형 무인 경계 시스템이 부대 감시 임무에 투입되고 있으며, 치장물자 보관 시설의 항온·항습 유지를 목적으로 지능형 온·습도 센서 또한 설치 및 운용되고 있다. 그 외에도, 고

*Corresponding Author : Semyoung Oh(Agency of Defense Development)

email: add187sm@add.re.kr

Received December 4, 2023

Accepted March 8, 2024

Revised January 2, 2024

Published March 31, 2024

화질 카메라를 탑재한 초소형 드론으로 야외 훈련 상황을 촬영하여 훈련 효율을 개선하고 있다[4-6].

일반적으로 초소형 센서 장치는 정보 수집 능력과 공간 활용도를 높이기 위해 배터리를 동력원으로 사용하고 있으며, WiFi 혹은 Bluetooth 등으로 수집 정보를 지구국으로 전송한다. 하지만, 이러한 무선 통신은 많은 전력 소모를 요하므로, 통신 빈도 증가 시 센서의 동작 수명이 단축될 수 있다[7,8].

Ochiai 팀이 제안한 협력 빔포밍은 군집을 이룬 여러 개의 센서 장치로부터 고 지향성 빔을 합성, 센서의 개수에 비례하여 송신 전력을 향상시킬 수 있다[9]. 따라서, 초소형 센서에 협력 빔포밍 기술을 접목할 경우, 통신으로 인한 에너지 소모를 대폭 감소시킬 수 있을 뿐만 아니라 제한된 에너지원으로 장거리 통신 또한 가능해진다.

본 논문은 협력 빔포밍의 군사적 활용 가능성을 검토하고, 그 필요성을 제시한다. 또한, 동작 원리와 핵심 기술인 동기화에 대해 살펴보고, 이를 통해 향후 국내 협력 빔포밍 연구·개발에 기초 자료로 활용하고자 한다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서, 협력 빔포밍의 군사적 효용성과 잠재력을 살펴보고, 3장에서는 동작 원리와 동기화의 필요성에 대해 알아본다. 또한, 4장에서는 동기화 기술 동향을 살펴보고, 5장에서는 논문을 마무리하고자 한다.

2. 협력 빔포밍의 군사적 활용 가능성

2.1 미래보병체계

지상 전투 병력의 생존성 및 전투력 개선을 위한 미래 보병체계에 협력 빔포밍을 활용할 수 있다. 현재, 미 육군은 통신, 반도체 및 재료 분야의 최첨단 기술이 접목된 미래보병체계를 연구하고 있으며[10], 주요 과제 중 하나로 수집된 생체 신호(예: 심박, 체온, 영양 상태, 근육 피로도 등)를 중앙처리장치로 일괄 전송할 수 있는 통합 네트워크 시스템을 개발하고 있다. 해당 시스템은 사용자의 활동성 개선을 위해 무선 통신 환경을 기반으로 하고 있으며 100 mAh 이하의 소형 배터리를 탑재하고 있다. 하지만, 편의를 위한 물리적 제약과 무선 통신의 높은 에너지 소모율은 센서의 동작 수명을 단축시킬 수 있으며, 미래보병체계의 오작동으로 이어질 수 있다. 이러한 문제를 협력 빔포밍을 통해 해결할 수 있다. 예를 들어, 센서와 중앙처리장치간 고이득 통신 채널을 형성하여, 통신으로 인한 소모 전력을 크게 감소시킬 수 있으며, 필요

시 대용량 생체 신호를 중앙처리장치에 고속으로 전송할 수 있다 (Fig. 1(a)).

2.2 정찰용 초소형 드론(무선 통신/레이더)

2022년 4월 발발한 우크라이나 전쟁을 기점으로 무인기의 활용 양상이 크게 변화하고 있다. 실제로, RQ-1 프레데터와 같은 대형 무인기 보다는 소형 드론 (예, FLIR 시스템의 블랙호넷)의 작전 투입 빈도가 증가하고 있는 추세다. 그 이유는, 대형 무인기의 높은 레이더 피탐 가능성과 아음속 이하의 지속 비행 능력으로 인해 제공권이 확보되지 않을 경우 작전 수행이 제한되며, 피격 시 큰 경제적 손실이 발생할 수 있기 때문이다. 반면, 소형 드론은 저렴한 가격으로 대량 운용이 가능하며, 높은 생존성으로 적 중심에 침투, 주요 군사 정보를 수집할 수 있다. 또한 근접 촬영으로 고해상도 영상 정보를 획득할 수 있어, 효과적인 작전 결집에 기여할 수 있다[11].

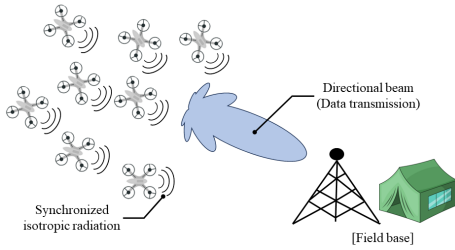
하지만, 소형 드론은 내연기관이 아닌 배터리를 주요 동력원으로 사용한다. 따라서, 안정적인 공중 기동력 유지를 위해서는 전력 소모를 최소화하여야 하며, 대표적인 방법 중 하나가 장거리 통신 제한이다. 하지만, 이는 작전 가능 범위를 한정 지어, 정찰 자산으로서의 가치를 감소시킬 수 있다.

다행히, 군집 (Swarming) 형태로 운영되는 드론의 경우, 협력 빔포밍을 통해 장거리 통신이 가능하며 (Fig. 1(b)), 구체적인 방법은 다음과 같다. 첫 번째, 정보 취득 시 관련 데이터를 아군 지휘소에 직접 전송하지 않고 주변 드론들에게 공유한다. 두 번째, 드론들에 의해 생성된 지향성 빔을 통해 공유된 데이터를 지휘소에 전송하며, 이를 통해 드론의 개수에 비례하여 통신 도달 범위를 확장할 수 있다. 실제로, 미 해군 및 공군에서도 이러한 기술적 이점에 착안하여 드론용 협력 빔포밍 기술을 활발히 연구하고 있다[12-14].

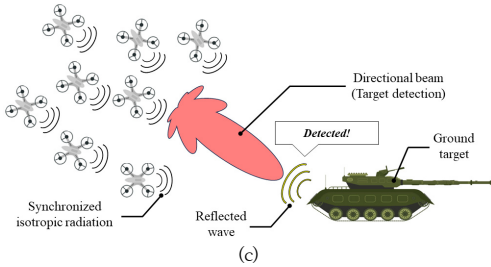
최근, 드론 탑재형 지상 레이더가 개발되고 있으며 [15], 지표면의 높은 클러스터 (Cluster)를 극복하기 위한 송신 출력 증폭 기술 또한 연구되고 있다. 하지만, 드론의 작은 크기와 제한된 전력원으로 인해 난항을 겪는 중이며, 이러한 문제를 협력 빔포밍을 통해 해결할 수 있다. 여러 개의 드론에서 방사된 동(同) 위상 레이더파를 합성하여 대형 개구면 (Aperture) 레이더와 같이 고 지향성 빔을 목표물 방향으로 형성할 수 있으며, 이를 통해 신호대잡음비 (Signal-to-Noise Ratio, SNR) 증폭과 탐지 성능 개선을 이룰 수 있다 (Fig. 1(c)).



(a)



(b)



(c)

Fig. 1. Applications of collaborative beamforming in the area of military, wireless communications, and radar

3. 협력 빔포밍 원리 및 동기화 필요성

협력 빔포밍은 Fig. 2와 같이 다수의 센서 노드에서 방사되는 전자파를 합성하여 지향성을 높이는 기술로, 기존의 빔포밍과 그 원리가 유사하다. 하지만, 방사 노드의 위치가 규칙적이지 않아 Eq. 1와 같이 확률적 빔 패턴을 가지게 된다.

$$F(\phi, \theta | \bar{r}, \bar{\psi}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e^{j \frac{2\pi}{\lambda} d_i(\phi, \theta)} e^{j\psi_i} \quad (1)$$

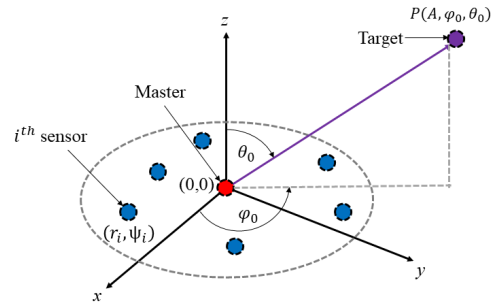


Fig. 2. Topology of collaborative beamforming [16]

여기서, $F(\phi, \theta | \bar{r}, \bar{\psi})$ 는 배열 요소 (Array Factor, AF), $d_i(\phi, \theta) = \sqrt{A^2 + r_i^2 - 2r_i A \cos(\phi - \psi_i) \sin\theta}$ 는 목표 노드 $P(A, \phi_0, \theta_0)$ 와 i^{th} 센서 노드간의 거리, (r_i, ψ_i) 는 i^{th} 센서 노드의 좌표, $\bar{r} = [r_1, r_2, \dots, r_N]$ 와 $\bar{\psi} = [\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_N]$ 는 좌표 벡터, 그리고 N은 센서 노드의 개수이다.

Eq. 1을 통해 $d_i(\theta, \phi)$ 에 따라 목표 노드에서의 AF 크기가 불확실한 것을 알 수 있으며, 이러한 문제는 폐 루프 (Closed loop) 혹은 개방 루프 (Open loop) 동기화로 ψ_i 를 조정하여 해결할 수 있다. 폐 루프 방식의 경우, 목표 노드의 정확한 위치를 알고 있는 경우 사용할 수 있으며, 개방 루프 방식은 각 노드의 상대적 위치를 알고 있을 때 사용할 수 있다. Eq. 2와 Eq. 3은 폐 루프 및 개방 루프의 ψ_i 이며, ψ_i 조정으로 도출되는 빔 패턴은 Eq. 4 및 5와 같다.

$$\Psi_{i,c} = -\frac{2\pi}{\lambda} d_i(\phi_0, \theta_0) \quad (2)$$

Table 1. Types and causes of the phase offsets

Type	Cause
Phase ($\Delta\psi_i$)	<ul style="list-style-type: none"> • By wireless channel fading • By inaccurate reference position of the target or master nodes
Frequency (Δf_i)	<ul style="list-style-type: none"> • By oscillator offsets among sensor nodes
Time (Δt_i)	<ul style="list-style-type: none"> • By inaccurate reference time

$$\Psi_{i,o} = -\frac{2\pi}{\lambda} r_i \cos(\psi_i - \phi_0) \sin \theta_0 \quad (3)$$

$$F_C = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e^{\frac{j2\pi r_i [\cos(\phi - \psi_i) \sin \theta + \cos(\phi_0 - \psi_i) \sin \theta_0]}{\lambda}} \quad (4)$$

$$F_O = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e^{\frac{j2\pi r_i [\sin \theta \cos(\psi_i - \phi) + \cos(\phi_0 - \psi_i) \sin \theta_0]}{\lambda}} \quad (5)$$

Eq. 4 및 5에서 확인할 수 있다시피, 목표 혹은 센서 노드의 위치 정보를 기반으로 동기화가 이루어질 시 목표 노드 방향에서 AF 크기를 1로 유지할 수 있어, 군 작전과 같이 척박한 환경에서도 협력 빔포밍을 안정적으로 구현할 수 있다. 하지만, Table 1에 기술된 위상 (Phase), 주파수 (Frequency), 그리고 시간 (Time) 오차 (Offset)가 발생하여 Eq. 6와 같이 중첩 신호의 크기가 감소할 수 있으므로 동기화 중 이들을 보정 해주어야 한다.

$$r(t) = \sum_{i=1}^N e^{j2\pi(f_c + \Delta f_i)(t + \Delta t_i)(\psi_i + \Delta \psi_i)} \quad (6)$$

4. 협력 빔포밍 동기화 기술 동향

본 장에서는 협력 빔포밍의 핵심 기술인 페 루프 및 개방 루프 동기화의 기술 동향을 살펴본다.

4.1 페 루프 동기화

4.1.1 순환 비트 피드백 동기화

최초로 개발된 순환 비트 피드백 기술은 1BF (One-Bit Feedback)[17]로, 목표 노드로부터 수신된 1비트 크기의 피드백 정보로 동기화를 이루는 방식이다 (Fig. 3(a)). 구체적으로, 센서 노드는 협력 빔포밍을 통해 테스트 신호를 목표 노드에 전송하며, 목표 노드는 수신된 테스트 신호의 RSS (Received Signal Strength)를 측정하여 앞의 시간 슬롯보다 증가하면 1, 감소하거나 동일할 경우 0인 결정 비트를 발송한다. 마지막으로, 센서 노드는 결정 비트가 0일 경우 무작위 혹은 기계학습된 방법으로 ψ_i 를 조정한다. 1BF의 세부 절차는 Table 2와 같다. 1BF 뿐만 아니라 동기화 정확도 개선을 위한 2BF (Two-Bit Feedback)[18] 기법과 높은 속도로 수렴되는 노드 선택 기법[19] 또한 연구되었다.

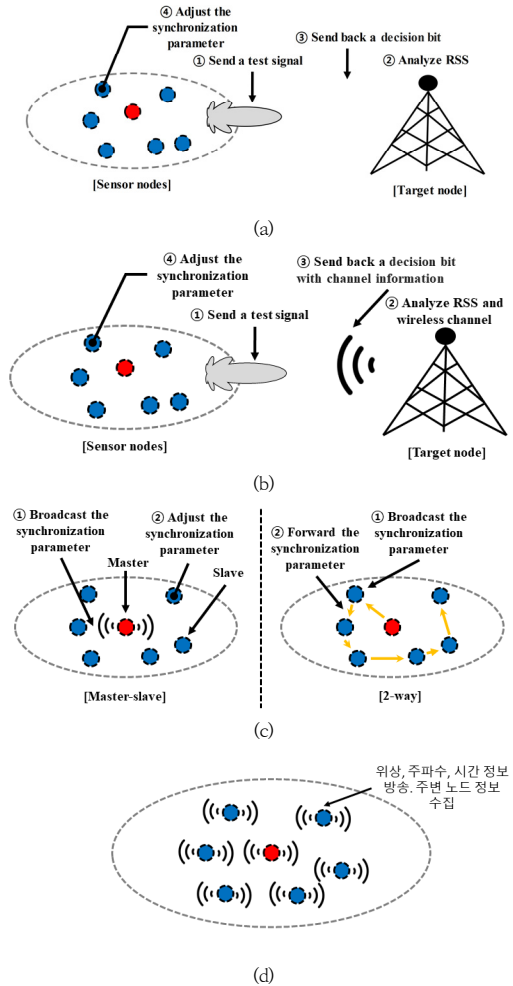


Fig. 3. Operating principles of the synchronization techniques: (a) iterative bit feedback, (b) rich feedback, (c) intra-communication, and (d) blind

Table 2. Procedure of the '1BF' synchronization

Procedure	Content
① Perturb	• Each sensor node defaults the synchronization parameter.
② Send	• The sensor nodes send a test signal to the target node
③ Analyze	• The target node analyzes RSS.
④ Broadcast	• The target node broadcast back a decision bit.
⑤ Adjust	• Each sensor node adjust its synchronization parameter.
⑥ Repeat	• Repeat from ② to ⑤ until satisfying the predetermined RSS.

4.1.2 심층 피드백 동기화

심층 피드백 동기화는 결정 비트에 무선 채널 정보 (예, 무선 채널에 의한 위상 왜곡 정도)를 추가하는 방식으로 (Fig. 3(b)), 순환 비트 피드백 동기화 보다 수렴 속도가 빠르며, 정확도 또한 높다[20]. 하지만, 피드백 데이터의 크기가 증가하여 통신 지연 등의 문제가 발생할 수 있으며, 이를 해결하고자, 센서 노드들을 두 그룹으로 나눈 후 그룹 간 위상 오차만을 최소화하는 기술 또한 제시되었다[21]. 그 외에도, 동기화 중 발생하는 위상 및 주파수 오차를 실시간 추적하기 위한 칼만 필터 (Kalman Filter) 기반 동기화 기술도 개발되었다[22].

4.2 개방루프 동기화

전파 감쇄 혹은 방해 등의 이유로 목표 노드와 통신을 할 수 없는 상황에 놓일 수 있다. 이러한 경우, 동기화에 필요한 피드백을 목표 노드로부터 제공 받을 수 없으므로, 센서 노드 자체적으로 동기화를 실시 해야 한다. 본 절에서는 대표적인 개방루프 방식인 내부 통신 및 맹목적 동기화에 대해 살펴 보고자 한다.

4.2.1 내부 통신 동기화

내부 통신 동기화는 목표 노드와의 통신이 제한되는 경우 가장 적합한 방식이다. 각 센서 노드는 서로 간의 통신을 통해 동기화를 실시하며, Master-slave[23,24]와 Two-way[25]가 대표적인 방식이다 (Fig. 3(c)).

Master-slave의 경우 마스터 노드가 자신의 ψ_i 를 방송하면, 다른 노드들은 이를 기준으로 동시다발적으로 동기화를 수행한다. 반면, Two-way 방식은 마스터 노드에서 시작하여 ψ_i 를 차례대로 전달하며 동기화를 실시한다. 따라서, 지속적인 오차 보정이 가능하므로 정확도가 높으나, 주변 노드와의 1:1 통신으로 인한 오버헤드 및 통신 지연 등이 발생할 수 있다. 따라서, 센서 노드의 개수가 많은 경우, Two-way 방식보다는 Master-slave 방식이 적합하다.

4.2.2 맹목적 동기화

맹목적 동기화는 통신 오버헤드가 발생하지 않고, 구조가 단순하다. 그 이유는 목표 노드로부터의 피드백이나 내부 통신 없이 동기화가 가능하기 때문이다. 가장 대표적인 알고리즘은 OF (Zero Feedback)[26]이다 (Fig. 3(d)). OF에서 각 센서 노드는 자신의 ψ_i 를 맹목적으로 방송함과 동시에 주변 노드의 ψ_j 를 수집 및 분석한다. 이

를 통해 확률적으로 계산에 기반한 동기화를 수행한다. 하지만, 부정확한 ψ_j 에 의해 정확도가 떨어지며, ψ_i 연산을 위한 많은 전력 소모를 필요로 한다. 따라서, OF는 낮은 데이터율이 요구되는 비상용 통신으로만 사용할 수 있다[26]. 4장에서 언급한 동기화 기술별 성능 비교는 Table 3에서 확인할 수 있다.

Table 3. Performance comparison of synchronization techniques.

	Iterative	Rich	Intra-comm	Blind
Accuracy	③	④	②	①
Speed	②	③	④	①
Overhead	③	④	②	①
Latency	③	④	②	①

5. 결론

협력 빔포밍은 초소형 센서의 효용성과 범용성을 높일 수 있는 기술이다. 예를 들어, 웨어러블 센서의 경우 무선 통신 효율을 개선하여 미래보병체계의 작전 지속성을 늘릴 수 있고, 드론체계의 경우 장거리 통신을 통해 작전 범위를 확장하고 고속 통신으로 정보의 질을 향상시킬 수 있다. 하지만, 이를 위해서는 안정적인 동기화가 필요하나 센서의 위치가 이동할 경우 그 과정이 쉽지 않다. 따라서, 관련 연구가 활발히 진행 중이나, 국내의 경우 협력 빔포밍 연구 자체가 전무한 실정이며, 이로 인해 미래전의 핵심 전력으로 예상되는 미래보병체계와 드론체계의 기술 경쟁에서 뒤질 수 있다. 따라서, 국내에서도 협력 빔포밍 연구가 즉각 시작되어야 하며, 본 논문을 연구의 필요성 판단과 연구 소요 시간 단축을 위한 참고 자료로 활용하였으면 한다.

References

[1] J.-H. Lee, H.-W. Kim, and D.-H. Kim, "Implementation of a smart home IoT system based on Bluetooth controlled by users", *Digital Contents Journal*, vol.22, no.2 pp.331-338, Feb. 2021.
DOI: <https://doi.org/10.9728/dcs.2021.22.2.331>

[2] J.-Y. Shim and H.-G. Seo, "Remote medical smart healthcare system for multi-biosignal measurement based on IoT", *Journal of Information Technology*

- Convergence*, vol.11, no.10 pp.53-611, Oct. 2020.
DOI: <https://doi.org/10.15207/JKCS.2020.11.10.053>
- [3] H. Kim et. al, "A Study on the Application of IoT in Defense", *Proceedings of the Korean Society of Broadcast Engineers Conference*, Korean Institute of Broadcast and Media Engineers, Seoul, South Korea, pp.38-40, Nov. 2017.
- [4] L. Mishra and S. Varma, "Internet of Things for military applications", *2020 7th International Conference on Computing for Sustainable Global Development*, INDIACom, New Delhi, India, Mar. 2020.
DOI: <https://doi.org/10.23919/INDIACom49435.2020.9083730>
- [5] Y. Kwon, et al, "A Study on the Military Applicability of Smart Dust (SMART DUST) Based on IoT", *Defense and Technology No. 489*, Defense Industry Association, South Korea, pp. 154-163, Aug. 2020.
- [6] J. A. Yang, K. Su. Jeon, J. W. Lee, S. H. Kim, "Analysis of domestic and foreign military UAV development trends and suggestions for countermeasures against North Korea UAVs", *Journal of Information Technology Convergence*, vol.11, no.12 pp.97-105, Dec. 2021.
DOI: <https://doi.org/10.22156/CS4SMB.2021.11.12.097>
- [7] V. Shakhov, "On a new type of attack in wireless sensor networks: Depletion of battery", *2016 11th International Forum on Strategic Technology*, IEEE, Novosibirsk, Russia, Jun. 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1109/IFOST.2016.7884162>
- [8] J. Baliga et. al, "Energy consumption in wired and wireless access networks", *IEEE Communications Magazine*, vol.49, no.6 pp.70-77, Jun. 2011.
DOI: <https://doi.org/10.1109/MCOM.2011.5783987>
- [9] H. Ochiai et. al., "Collaborative beamforming in ad hoc networks", *Information Theory Workshop*, IEEE, TX, USA, Oct. 2004.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ITW.2004.1405336>
- [10] I. Kim, "Combat experiment plan for future infantry battalion weapon systems: focusing on the future soldier system concept", Report about Military Experiments, Korea Institute of Strategic Studies, pp. 7-50, Nov. 2002.
- [11] S. Moon, J. Jeon, and Y. Kim, "Swarm reconnaissance drone system for efficient object detection", *Journal of KIISE*, vol.49, no.9 pp.715-726, 2022.
DOI: <https://doi.org/10.5626/IJK.2022.49.9.715>
- [12] I. Kocaman, "*Distributed beamforming in a swarm UAV network*", Master's thesis, Naval Postgraduate School, pp.24-27.
- [13] Y. Nijssure et al., "WSN-UAV monitoring system with collaborative beamforming and ADS-B based multilateration", *Vehicular Technology Conference*, IEEE, Nanjing, China, May 2016.
DOI: <https://doi.org/10.1109/VTCSpring.2016.7504535>
- [14] J. Keller, "Air Force looks to Intelligent Automation for tactical beamforming antennas in future swarming drones", Available From: <https://www.militaryaerospace.com/uncrewed/article/14033583/swarming-drones-antennas-tactical-beamforming> (accessed Dec. 27, 2023)
- [15] I. Hwang et. al., "Design and implementation of an X-Band low-profile active electronically scanned array for airborne radar", *Journal of Korean Institute of Electromagnetic Engineering and Science*, vol.34, no.8 pp.127-143, Feb. 2021.
DOI: <https://doi.org/10.5515/KJKIEES.2021.32.2.127>
- [16] H. Ochiai, P. Mitran, H. V. Poor, and V. Tarokh, "Collaborative beamforming for distributed wireless ad hoc sensor networks", *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol.53, no.11 pp.4110-4124, Nov. 2005.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TSP.2005.857028>
- [17] R. Mudumbai, J. Hespanha, U. Madhow, and G. Barriac, "Scalable feedback control for distributed beamforming in sensor networks", *Proceedings. International Symposium on Information Theory*, IEEE, SA, Australia, Oct. 2005.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ISIT.2005.1523309>
- [18] I. Thibault, G. E. Corazza, and L. Deambrogio, "Random, deterministic, and hybrid algorithms for distributed beamforming", *Advanced Satellite Multimedia Systems Conference*, IEEE, Cagliari, Italy, pp.221-225, Sep. 2010.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ASMS-SPSC.2010.5586901>
- [19] M.-O. Pun, D. R. Brown, III, and H. V. Poor, "Opportunistic collaborative beamforming with one-bit feedback", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol.8, no.5, pp.2629-2641, May 2009.
DOI: <https://doi.org/10.1109/TWC.2009.080512>
- [20] W. Tushar et. al., "Distributed transmit beamforming: Phase convergence improvement using enhanced one-bit feedback", *Wireless Communications and Networking Conference*, IEEE, Paris, France, Apr. 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1109/WCNC.2012.6214424>
- [21] P. Jeevan, S. Pollin, A. Bahai, and P. P. Varaiya, "Pairwise algorithm for distributed transmit beamforming", *International Conference on Communications*, IEEE, Beijing, China, May 2008.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ICC.2008.797>
- [22] R. Mudumbai, U. Madhow, R. Brown, and P. Bidigare, "DSP-centric algorithms for distributed transmit beamforming", *Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers*, IEEE, CA, USA, Nov. 2011.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ACSSC.2011.6189962>
- [23] F. Quitin, M. M. Ur Rahman, R. Mudumbai, and U. Madhow, "Distributed beamforming with software-defined radios: Frequency synchronization and digital feedback", *Global Communications Conference*, IEEE, CA, USA, Dec. 2012.
DOI: <https://doi.org/10.1109/GLOCOM.2012.6503876>
- [24] M. M. Rahman, H. E. Baidoo-Williams, R. Mudumbai, and S. Dasgupta, "Fully wireless implementation of distributed beamforming on a software-defined radio platform", *International Conference on Information Processing in Sensor Networks*, IEEE, Beijing, China, Apr. 2012.

DOI: <https://doi.org/10.1109/IPSIN.2012.6920945>

- [25] R. D. Preuss and D. R. Brown, "Retrodirective distributed transmit beamforming with two-way source synchronization", *Annual Conference on Information Sciences and Systems*, IEEE, NJ, USA, Mar. 2010.
DOI: <https://doi.org/10.1109/CISS.2010.5464801>
- [26] A. Bletsas, A. Lippman, and J. N. Sahalos, "Simple, zero-feedback, collaborative beamforming for emergency radio", *International Symposium on Wireless Communication Systems*, IEEE, Siena, Italy, Sep. 2009.
DOI: <https://doi.org/10.1109/ISWCS.2009.5285299>

오 세 명(Semyoung Oh)

[정회원]



- 2007년 3월 : 공군사관학교 전산 공학과 (공학사)
- 2011년 5월 : 위스컨신 대학교 전기컴퓨터공학과 (공학석사)
- 2007년 3월 ~ 2021년 4월 : 대한민국 공군 근무

- 2020년 9월 ~ 2023년 12월 : Texas A&M 대학교 전기 컴퓨터공학과 (공학박사)
- 2024년 3월 ~ 현재 : 국방과학연구소 연구원

〈관심분야〉

안테나, 빔포밍, 레이더, 무선통신 등