

지향성 빔 기반 무선 센서의 협력 빔포밍

오 세 명*

Cooperative Beamforming for Wireless Sensors with Directional Beams

Semyoung Oh*

요 약

지향성 빔 기반 협력 빔포밍 기술을 제안하였으며, 빔패턴 특성과 부엽 억제 성능을 분석하였다. 기존의 등방성 전파를 방사하는 경우와 달리, 목표 노드 방향으로의 평균 전력을 개선하였으나, 빔폭이 증가하고, 부엽 또한 악화되었다. 다행히도, 빔폭을 제어함으로써 효과적인 부엽 제어가 가능하였다.

Key Words : Wireless Sensor, Cooperative Beamforming, Beampattern, Beamwidth, Sidelobe, Sidelobe Suppression

ABSTRACT

We propose a cooperative beamforming technique with directional beams and analyze its beampattern characteristics and sidelobe suppression performance. Compared to the conventional case where electromagnetic waves are radiated isotropically, the proposed system improves the average power in the target node direction, but the beamwidth and sidelobes also increase. Fortunately, we also show that beamwidth control enables effective sidelobe suppression.

I. 서 론

최근, IOT (Internet of Things) 기기의 발전 및 보급과 더불어 무선 센서 또한 다양한 분야에서 활용되고 있다^[1]. 하지만, 한정된 에너지원으로 장시간 및 장거리 통신이 제한되며^[2], 이러한 문제를 해결하고자 협력 빔포밍이 제안되었다^[3]. 해당 기술은 클러스터 (cluster) 형태로 모여 있는 무선 센서에 적용할 수 있으며, 위상 (phase) 동기화 (synchronized) 후 데이터 신호 동시 방사로 목표 방향에 보강 간섭을 일으킬 수 있다. 결과적으로, 기지국 혹은 중계 장치 방향으로 지향성 빔을 형성하여 전송 신호 크기 증가 및 통신으로 인한 에너지 소모를 감소할 수 있다.

한편, 협력 빔포밍의 빔패턴 (beampattern)은 무선 센서들의 위치에 따라 달라지며, 균일 (uniform) 혹은 정규 (normal) 분포로 산란되어 있는 센서 클러스터의 빔폭 (beamwidth), 부엽 (sidelobe) 및 지향성 (directivity) 등에 대한 연구가 이루어졌다^[3,4]. 하지만, 기존 연구에서는 무선 센서에 등방성 안테나 (isotropic antenna)가 탑재된 경우만을 고려하였다.

지향성 안테나 (directional antenna) 및 배열 안테나 (array antenna) 소형화 기술 발전을 고려^[5,6], 본 논문에서는 지향성 빔을 생성할 수 있는 무선 센서들의 협력 빔포밍 빔패턴 특성을 연구하고자 한다. 클러스터 내 센서들이 정규 분포에 따라 분산되어 있는 경우를 가정하며^[7,8], 시뮬레이션을 통해 평균 전력, 빔폭 및 부엽을 분석한다. 추가적으로, 기존의 위상 제어방식^[9]과 비교하여 지향성 빔 기반 협력 빔포밍의 부엽 억제 능력을 살펴볼 것이다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 시스템 모델을 단순화하고 빔패턴 특성을 집중적으로 살펴보기 위해 다음과 같이 가정한다. 첫 번째, 각 센서 노드는 경로 손실 및 다중 경로 페이딩 등이 없는 이상적인 무선 채널에서 동작하며, 목표 노드와 충분히 이격되어 원거리(far-field) 방사 조건이 성립되고, 나아가 센서 노드간 완벽한 (fully) 동기화가 이루어져 있다. 또한, N 개의 센서 노드는 그림 1과 같이 지향성이 M 이며 빔폭이 m/π 인 지향성 혹은 배열 안테나를 탑재하고 있으며, 모든 센서 노드의 빔 중심선은 목표 노드를 향하고 있다. 추가적으로 센서 및 목표 노

* First Author : (ORCID:0000-0001-7773-4123) Agency for Defense Development, add187sm@add.re.kr, 정회원
 논문번호 : 202311-142-E-LU, Received November 13, 2023; Revised November 29, 2023; Accepted November 29, 2023

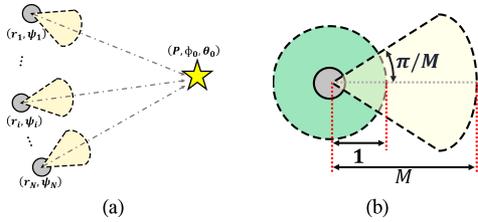


그림 1. 시스템 개념도 (a) 센서 (원) 및 목표 노드 (별). (b) 등방성 (점선 원) 및 지향성 (점선 부채꼴) 방사 패턴
Fig. 1. System illustration. (a) Sensor (circle) and target (star) nodes. (b) Isotropic (dot-line circle) and direction (dot-line sector) radiation patterns

드는 구좌표계 (spherical coordinates)인 (r_i, ψ_i) 와 (P, ϕ_0, θ_0) 에 위치하고 있다. 이러한 조건에서 센서 노드에 의해 형성되는 원거리 array factor는 아래와 같이 정의될 수 있다.

$$A(\phi, \theta | \bar{r}, \bar{\psi}) = \frac{M}{N} \Pi \left(\frac{M\phi}{\pi} \right) \sum_{i=1}^N e^{j \frac{2\pi}{\lambda} [d_i(\phi, \theta) - d_i(\phi_0, \theta_0)]}$$

$$\approx \frac{M}{N} \Pi \left(\frac{M\phi}{\pi} \right) \sum_{i=1}^N e^{j \frac{2\pi}{\lambda} r_i \sin \theta \cos(\theta_0 - \psi_i)}$$

$$\times e^{-j \frac{2\pi}{\lambda} r_i \sin \theta \cos(\phi - \psi_i)}$$
(1)

위의 식에서 $\bar{r} = [r_1, r_2, \dots, r_N] \in [0, R]^N$ 와 $\bar{\psi} = [\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_N] \in [-\pi, \pi]^N$ 는 센서 노드의 위치 벡터이며, $\Pi(M\phi/\pi)$ 는 빔패턴을 표현하는 펄스함수이고 $d_i(\phi, \theta) \approx A - r_i \sin \theta \cos(\phi - \psi_i)$ 은 원거리 조건에서의 i^{th} 센서 노드와 지점 (P, ϕ, θ) 와의 기하학적 거리이다. 만약, 모든 노드가 (x, y) 평면 내 존재 ($\theta_0 = \pi/2$)하고 목표 노드가 $\phi_0 = 0$ 에 있다면 수식 (1)은 수식 (2)와 같이 단순화될 수 있다.

$$A(\phi | \bar{r}, \bar{\psi}) = \frac{M}{N} \Pi \left(\frac{M\phi}{\pi} \right) \sum_{i=1}^N e^{-j4\pi \tilde{r}_i \sin(\tilde{\psi}_i) \sin(\frac{\phi}{2})}$$

$$= \frac{M}{N} \Pi \left(\frac{M\phi}{\pi} \right) \sum_{i=1}^N e^{-j4\pi z_i \sin(\frac{\phi}{2})}$$
(2)

수식 (2)에서 $\tilde{r}_i = r_i/\lambda$, $\tilde{\psi}_i = \psi_i - \pi/2$ 및 $z_i = \tilde{r}_i \sin \tilde{\psi}_i$ 로 정의되며, r_i 및 ψ_i 가 각각 레일리 (Rayleigh: $f_{r_i}(r) = r/\sigma_0^2$, $0 \leq r \leq R$) 및 균일 (uniform: $f_{\psi_i}(\psi) = 1/(2\pi)$, $-\pi \leq \phi < \pi$) 분포를 따를 경우 z_i 는 평균이 0이고 표준편차가 $\sigma^2 = \sigma_0^2/\lambda^2$ 인

정규 분포 변수가 된다.

수식 (2)의 켈레 복소수 곱으로 빔패턴은 $\bar{z} = [z_1, z_2, \dots, z_N] \in [-R, R]^N$ 및 $\beta = 4\pi \sin(\phi/2)$ 와 더불어 수식 (3)과 같이 유도된다.

$$P(\phi | \bar{z}) = A(\phi | \bar{z}) A^*(\phi | \bar{z})$$

$$= \frac{M^2}{N} \Pi^2 \left(\frac{M\phi}{\pi} \right)$$

$$\times \left(1 + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N e^{-j\beta z_i} \sum_{j \neq i, j=1}^N e^{-j\beta z_j} \right)$$
(3)

III. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션 결과의 신뢰성을 높이기 위해 $S = 10^6$ 개의 샘플을 생성했으며, 각 샘플은 정규 분포를 따르는 N 개의 센서 노드 좌표로 구성되어 있다. $P_{av}(\phi) = E_z[P(\phi | \bar{z})]$ 을 이용하여 샘플들의 원거리 빔패턴을 평균하면 그림 2(a)와 같이 도식화되며, 각 센서의 빔 지향성, 즉 M 이 증가할수록 목표 노드 방향 ($\phi = \phi_0$)에서의 평균 전력, $P_{av}(\phi_0)$ 이 향상된 것을 확인할 수 있다. 하지만, 이러한 이점과 더불어 그림 2(b)와 같이 주엽 (main lobe) 주변으로 부엽 또한 증가하였다.

그림 2의 빔패턴 특성을 살펴보기 위해 $P_{av}(\phi_0)$, $\Delta\phi_{3dB}$ 및 $\Delta\phi_{sidelobe}$ 을 그림 3에 제시하였다. 여기서, $\Delta\phi_{3dB}$ 은 $P_{av}(\phi_0)/2$ 가 되는 3dB 빔폭이며 $\Delta\phi_{sidelobe}$ 는 $10\log(P_{av}(\phi_0)/M) + 3$ 에서의 방위각과 180° 의 차인 3dB 부엽 범위각 (sidelobe range angle)이다. 그림 3(a)은 $P_{av}(\phi_0)$ 를 보여주고 있으며, M 에 따라 증가하는 것을 확인할 수 있다. 하지만, N 이 증가할수록 이러한 추세는 감소하며, 이는 수식 (3)과 같이 $P_{av}(\phi_0)$ 의

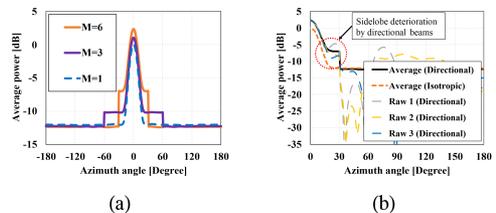


그림 2. (a) 지향성 빔 기반 협력 빔포밍 평균 빔패턴 ($N = 16, \sigma = 1$). (b) 주엽 (지향성, 등방성) 및 샘플 (지향성) 빔패턴 비교
Fig. 2. (a) Average beam patterns of the cooperative beamforming with directional beams ($N = 16, \sigma = 1$). (b) Comparison between the average (directional, isotropic) and sample (directional) beam patterns

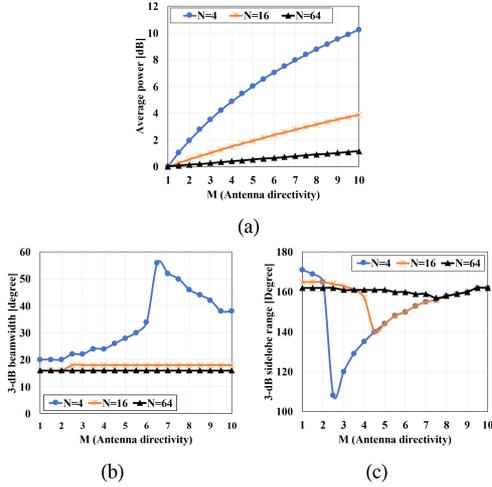


그림 3. N 및 M에 대한 빔패턴 특성. (a) $P_{av}(\phi_0)$, (b) $\Delta\phi_{3dB}$ 및 (c) $\Delta\phi_{sidelobe}$
 Fig. 3. Beam pattern characteristics with various N and M. (a) $P_{av}(\phi_0)$, (b) $\Delta\phi_{3dB}$, and (c) $\Delta\phi_{sidelobe}$

증가가 N에 의해 상쇄되기 때문이다. 그림 3(b)~3(c)는 각각 $\Delta\phi_{3dB}$ 와 $\Delta\phi_{sidelobe}$ 를 보여주고 있으며, N=4에서 $\Delta\phi_{3dB}$ 는 증가, $\Delta\phi_{sidelobe}$ 는 감소한다. 하지만, M이 증가할수록 그 경향성이 반대되며, 이러한 현상의 이유는 다음과 같다. M값이 작을 때에는 폭이 넓은 센서 노드들의 빔이 협력 빔포밍 주엽의 빔폭을 방위각 방향으로 넓히고 그 주변으로 부엽을 생성하나, M이 증가할수록 센서 노드의 빔폭이 좁아져 주엽과 중첩, 빔패턴에 미치는 영향이 감소하기 때문이다. 추가적으로, N이 증가할수록 $\Delta\phi_{3dB}$ 및 $\Delta\phi_{sidelobe}$ 는 M과 낮은 연관성을 보이며, 이는 N값이 클 경우 센서 노드의 개수와 분포가 협력 빔포밍의 빔패턴 형상에 결정적인 영향을 미치기 때문이다.

IV. 부엽 억제 성능

앞서 살펴봤듯이 지향성 빔 기반 협력 빔포밍의 단점은 주엽 주변의 부엽 증가이다. 하지만, 각 센서 노드의 빔폭 ($\Omega_i = \pi/m_i$)을 각개 조정하여 이를 억제할 수 있으며, 그림 4에서 희망 방위각 (예: 간섭 예상 방향)인 $\phi = \pi/9$ 에서의 부엽 개선 (-11.34 dB)을 통해 그 성능을 확인할 수 있다. 참고로, 그림 4의 평균 빔패턴은 $m_i \in [1, 3, 6]$ 를 이용하여 총 5,000개의 빔폭 벡터 ($\bar{\Omega}_i = [\Omega_1, \Omega_2, \dots, \Omega_N]$)를 조합하고, 기설정된 임계값 (threshold)인 -15 dB 보다 부엽이 감소한 조합의

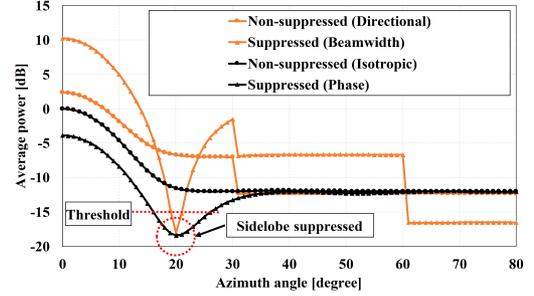


그림 4. 빔폭 및 위상 제어를 통한 부엽 억제 ($S=10^4$, $N=16$, $\sigma=1$).
 Fig. 4. Sidelobe suppression with beamwidth and phase adjustment ($S=10^4$, $N=16$, $\sigma=1$).

빔패턴 평균이다.

부엽 억제 과정은 $P_{av}(\phi_0)$ 의 감소를 동반할 수 있으며, 기존의 위상 제어 방식은 이를 방지하기 위해 탐색 해상도를 높여야 한다. 반면, 빔폭 제어 방식의 경우 부엽 제어 중에도 각 센서 노드의 빔이 $\phi = \phi_0$ 를 지속적으로 지향하고 있다. 따라서, 탐색 해상도 증가 없이, 부엽 억제와 최대 전력 유지를 동시에 달성할 수 있다. 그림 4는 위상 제어를 통한 부엽 억제 결과 또한 보여주고 있으며(점선-원: 부엽 억제 전, 점선-삼각형: 부엽 억제 후), 각 센서 노드는 $[0, 2\pi/3, 4\pi/3]$ 중 하나를 위상 제어 값으로 선택하여, 빔폭 제어 방식과 동일한 탐색 해상도를 가진다. 그림에서 볼 수 있듯이, 부엽 억제 수준은 비슷하나 $P_{av}(\phi_0)$ 가 -5 dB 정도 감소한 것을 확인할 수 있다. 추가적으로, 빔폭 제어 방식은 부엽 억제 과정을 10,000개의 샘플 중 6,218번 성공하였으나, 위상 제어 방식은 1,038번 성공하였다. 이러한 결과는 낮은 탐색 해상도에서 빔폭 제어 방식이 부엽 억제 요구 성능을 만족시킬 가능성이 더 높으며, 이는 빠른 수렴 속도로 최적의 빔폭 제어 조합을 찾을 수 있다는 것을 의미한다.

V. 결론

본 논문에서는 지향성 빔 기반 협력 빔포밍의 빔패턴 특성을 살펴보았다. 그 결과 빔 지향성 증가에 따라 빔폭과 부엽이 증가 추세를 보이다 다시 감소한 것을 확인하였으며, 그 이유는 센서 노드의 빔폭이 감소함에 따라 협력 빔포밍의 주엽에 중첩될 가능성이 증가하기 때문이다. 나아가, 각 센서 노드의 빔폭 조절을 통해 낮은 탐색 해상도에서도 최대 전력 유지와 부엽 억제를 동시에 달성할 수 있는 것 또한 확인하였다.

References

- [1] M. A. Jamshed, et al., "Challenges, applications, and future of wireless sensors in Internet of Things: A review," *IEEE Sens. J.*, vol. 22, no. 6, pp. 5482-5494, Jan. 2022. (<https://doi.org/10.1109/JSEN.2022.3148128>)
- [2] K. B. A. Bakar, et al., "A review on the immediate advancement of the Internet of Things in wireless telecommunications," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 21020-21048, Feb. 2023. (<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2023.3250466>)
- [3] H. Ochiai, P. Mitran, H. V. Poor, and V. Tarokh, "Collaborative beamforming for distributed wireless ad hoc sensor networks," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 53, no. 11, pp. 4110-4124, Nov. 2005. (<https://doi.org/10.1109/TSP.2005.857028>)
- [4] M. F. A. Ahmed and S. A. Vorobyov, "Collaborative beamforming for wireless sensor networks with Gaussian distributed sensor nodes," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 8, no. 2, pp. 638-643, Feb. 2009. (<https://doi.org/10.1109/TWC.2009.071339>)
- [5] P. R. Gautam, et al., "Design of directional antennas for wireless sensor networks and the Internet of Things experiments," *IEEE Sens. Lett.*, vol. 6, no. 9, Sep. 2022. (<https://doi.org/10.1109/LSSENS.2022.3202919>)
- [6] A. Meredov, K. Klionovski, and A. Shamim, "Screen-printed, flexible, parasitic beam-switching millimeter-wave antenna array for wearable applications," *IEEE Open J. Antennas Propag.*, vol. 1, pp. 2-10, Nov. 2019. (<https://doi.org/10.1109/OJAP.2019.2955507>)
- [7] K. Chakrabarty and S. S. Iyengar, "Scalable infrastructure for distributed sensor networks," *Springer-London*, 2005. (<https://doi.org/10.1007/1-84628-213-6>)
- [8] D.-Y. Kim, et al., "A sensor node deployment method based on environmental factors influencing sensor capabilities," *J. KICS*, vol. 33, no. 10, pp. 894-903, Oct. 2008. (<https://doi.org/10.7840/kics.2023.48.9.1079>)
- [9] B. B. Haro, S. Zazo, and D. P. Palomar, "Energy efficient collaborative beamforming in wireless sensor networks," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 62, no. 2, pp. 496-510, Jan. 2014. (<https://doi.org/10.1109/TSP.2013.2288080>)