

# 지향성 빔 기반 협력 빔포밍의 부엽 감소를 위한 노드 선택 기법

오세명

Texas A&M 대학교 전기컴퓨터공학과

## Node Selection Technique for Sidelobe Reduction in Cooperative Beamforming with Directional Beams

Semyoung Oh

Department of Electrical & Computer Engineering, Texas A&M University

**요약** 무선 네트워크 분야에서 협력 빔포밍은 군집 센서와 목표 노드 간의 데이터 전송 효율을 크게 높일 수 있는 획기적인 기술로 주목받고 있다. 기존의 협력 빔포밍 연구들은 각 센서가 등방성 방향으로 전파를 방사하는 경우를 가정하였으나, 본 논문에서는 지향성 빔을 방사하며 조사 방향이 일정하지 않은 경우를 연구하였다. 모의 실험 결과, 목표 노드 방향으로 전력이 감소하였으며, 부엽 또한 상당히 증가한 것을 확인할 수 있었다. 특히, 부엽은 재밍과 같은 신호 간섭의 취약점이 될 수 있으므로, 부엽 증가의 원인이 되는 미정렬 지향성 빔을 등방성 방사패턴으로 대체하는 노드 선택 알고리즘을 개발하였다. 또한, 최적 노드 조합을 효율적으로 탐색하기 위해 분할 정복 기법을 활용했으며, 최적화 과정 중 발생할 수 있는 목표 전력 감소를 예방하기 위해 임계값 또한 설정하였다. 그 결과, 낮은 시간 복잡도에도 불구하고 목표 전력은 유지하며 부엽은 효과적으로 억제할 수 있었다.

**Abstract** In the realm of wireless networks, cooperative beamforming is viewed as a promising means of enhancing the range of data transmission between clustered sensors and a target node. Previous research studies have assumed that each sensor has an isotropic radiation pattern, whereas we investigated a scenario where it utilizes an arbitrarily-headed directional beam. Our simulations revealed that it not only reduces power concentration towards the target node but also introduces elevated sidelobes. Recognizing that sidelobes can be exploited for signal interference like jamming, we developed a node selection algorithm that replaces misaligned directional beams with isotropic radiation patterns. The divide-and-conquer technique was implemented to search for the optimal node combination, and a threshold power was established to prevent the target power from diminishing during the optimization process.

**Keywords** : Remote Sensor, Cooperative Beamforming, Isotropic Radiation, Directional Beam, Sidelobe, Node Selection, Divide and Conquer

### 1. 서론

무선 센서(Remote Sensor)는 민간 및 국방 분야에서 정보 수집을 목적으로 활용되고 있으며[1-3], 공간적 효율성을 위해 배터리를 전력원으로 사용하고 있다[4]. 하

지만, 물리적 크기의 한계로 고용량 배터리 탑재가 어려우며, 이는 장거리 무선통신의 제한으로 이어질 수 있다[5].

데이터 라우팅(Routing)을 통해 센서의 통신 거리를 어느 정도 개선할 수 있으나 지연(Latency)으로 인해 실시간 통신에는 적합하지 않다[6-8]. 따라서, 대체 기술들이

\*Corresponding Author : Semyoung Oh(Texas A&M Univ.)

email: semyoung.oh.air@tamu.edu

Received December 27, 2023

Accepted February 6, 2024

Revised January 24, 2024

Published February 29, 2024

연구되었으며, 그 중 하나가 협력 빔포밍(Cooperative Beamforming, CB)이다. CB는 군집(Cluster) 형태를 이룬 센서 노드들의 협력을 통해 지향성 빔을 합성하고 이를 통해 원거리에 있는 목표 노드(Target Node)에 데이터 신호를 전송할 수 있는 기술이다[9]. 비록 동기화 및 정보 공유 과정 간 통신 오버헤드(Overhead)가 발생할 수 있지만, 각 센서의 큰 에너지 소비 없이 데이터 전송 거리를 확장할 수 있다는 점에서 해당 단점이 상쇄된다[10].

한편, 통상적인 빔포밍의 경우 각 방사 소자(Radiating Element)의 위치가 고정적인 반면, CB의 경우 센서 노드의 위치가 불규칙하여 빔 패턴의 특성이 일정치 않다. 따라서, 센서 노드들이 확률적 분포 형태로 퍼져 있을 때의 빔 패턴이 연구되었으며, 그 결과 부엽(Sidelobe)이 분포 형태에 따라 크게 달라진다는 점이 밝혀졌다[11-13]. 하지만, 이러한 연구들은 Fig. 1(a)와 같이 각 센서 노드로부터 등방성 전파가 방사되는 경우를 가정하였으며, RF(Radio Frequency) 소형화 기술의 급속한 발전 속도를 고려[14,15], Fig. 1(b) 및 1(c)와 같이 지향성 빔이 방사되는 경우 또한 고려할 필요가 있다. 나아가, 소형 센서는 빔 조향 장치 탑재가 제한되므로, 각 센서에서 방사된 지향성 빔이 임의의 방향으로 지향하는 경우를 연구하는 것 또한 의의가 있다.

앞서 언급한 바와 같이, CB의 부엽은 센서 노드의 위치 분포에 따라 달라지며, 임의의 방향으로 지향성 빔을 조사할 경우 이러한 문제는 더욱 심각해진다. 따라서, 신호 간섭이 예상되는 방향에서는 부엽을 효과적으로 억제할 수 있어야 하며, 각 센서 노드의 위상이나 출력을 제어함으로써 가능하다[16]. 하지만, 최적의 위상 혹은 출력 조합을 찾는 과정은 탐색 해상도에 비례하는 높은 시간 복잡도를 요구하고, 이를 해결하기 위해 유전(Generic) 최적화 알고리즘 등을 활용할 수 있으나[17,18], 낮은 연산 능력을 가진 소형 무선 센서에는 이 또한 적합하지 않다.

본 논문에서는 지향성 빔을 탑재한 무선 센서들의 CB 빔 패턴 특성을 먼저 분석하였다. 나아가 낮은 시간 복잡도  $O(n \log n)$ 로도 부엽을 효과적으로 억제할 수 있는 분할 정복(Divide and Conquer) 기반 노드 선택 알고리즘을 설계하였고, 그 성능을 모의 실험을 통해 검증하였다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. 2장에서는 지향성 빔 기반 CB의 시스템 모델과 빔 패턴 특성에 대한 모의 실험 결과를 살펴볼 것이며, 3장에서는 부엽 감소를 위한 노드 선택 알고리즘의 필요성과 성능을 알아볼 것이

다. 그리고 4장에서는 본 논문을 마무리 한다.

## 2. 지향성 빔 기반 CB 빔 패턴 특성

본 장에서는 빔 패턴 연구에 유용한 전력 패턴을 먼저 유도하고, 이를 통해 목표 노드에서의 수신 전력인 목표 전력(Target Power), 3-dB 빔폭(3-dB Beamwidth) 그리고 3-dB 부엽 영역(3-dB Sidelobe Region)을 살펴볼 것이다.

### 2.1 시스템 모델

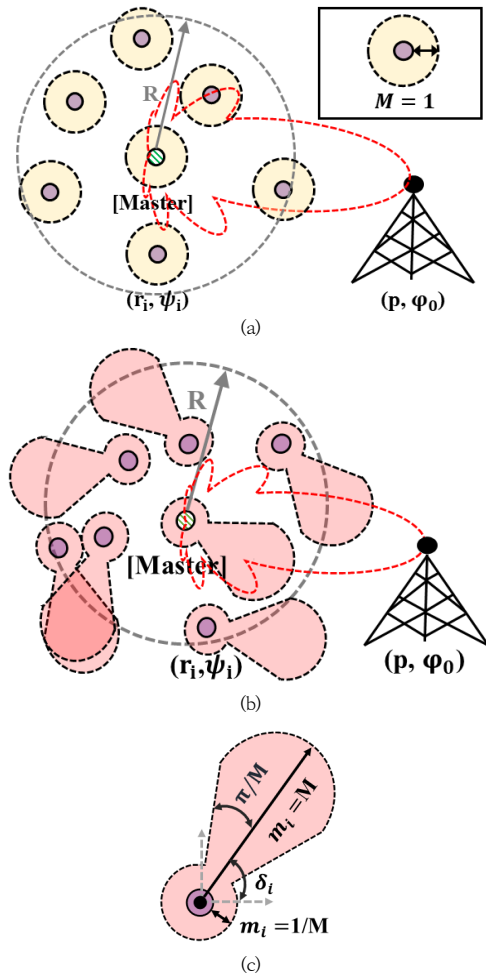


Fig. 1. CB over sensor nodes with (a) isotropic radiation or (b) directional radiation. (c) Concept illustration of the directional beam.

지향성 안테나를 탑재한 무선 센서 노드  $N$ 개가 반경이  $R$ 인 클러스터 내에 위치할 경우, 원거리 배열 인자 (Array Factor, AF)는 Eq. 1과 같다.

$$F(\phi | \bar{r}, \bar{\psi}, \bar{\delta}) = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N m_i e^{\frac{j2\pi[d_i(\phi) - d_i(\phi_0)]}{\lambda}} \\ \approx \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N m_i e^{\frac{j2\pi r_i [\cos \psi_i - \cos(\phi - \psi_i)]}{\lambda}} \quad (1)$$

여기서,  $\phi$ 는 방위각(Azimuth Angle),  $(r_i, \psi_i)$ 는  $i^{\text{th}}$  센서 노드의 좌표,  $\bar{r} = [r_1, r_2, \dots, r_N] \in [0, R]^N$ 와  $\bar{\psi} = [\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_N] \in [-\pi, \pi]^N$ 는 위치 벡터,  $\lambda$ 는 운용 주파수의 파장(wavelength),  $d_i(\phi)$ 는  $(r_i, \psi_i)$ 와 목표 노드  $(p, \phi_0)$ 간의 거리,  $m_i$ 는 지향각 벡터인  $\bar{\delta} = [\delta_1, \delta_2, \dots, \delta_N] \in [-\pi, \pi]^N$ 와 함께 다음과 같이 정의되는  $i^{\text{th}}$  노드 빔의 지향성을 의미한다.

$$m_i = \begin{cases} M & -\pi/M + \delta_i \leq \phi \leq \delta_i + \pi/M \\ 1/M & \text{elsewhere} \end{cases}$$

참고로, 본 논문에서는 분석의 편의를 위해 모든 노드들이  $x-y$  평면 내에 위치하고, 각 센서 노드는 폐 루프 (Closed Loop) 방식으로 동기화되었으며, 이상적인 무선 채널 하에 놓여 있다고 가정하였다.

Eq. 1에서 정의된 AF의 켈레 복소수 곱(Complex Conjugate Product)을 통해 전력 패턴을 Eq. 2와 같이 유도된다.

$$P \approx \begin{cases} \left(\frac{M}{N}\right)^2 \sum_{i=1}^N \sum_{i'=1}^N e^{-T_{i,i'}}, & \delta_l \leq \phi \leq \delta_u \\ \frac{1}{(NM)^2} \sum_{i=1}^N \sum_{i'=1}^N e^{-T_{i,i'}}, & (\phi < \delta_l) \wedge (\phi > \delta_u) \\ \sum_{i=1}^N \sum_{i'=1}^N m_i m_{i'} e^{-T_{i,i'}}, & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (2)$$

여기서,  $P = P(\phi | \bar{r}, \bar{\psi}, \bar{\delta})$ ,  $\delta_l = \delta_{i,l}, \delta_{i',l}$ ,  $\delta_u = \delta_{i,u}, \delta_{i',u}$ ,  $\delta_{i,l} = -\frac{\pi}{M} + \delta_i$ ,  $\delta_{i,u} = \frac{\pi}{M} + \delta_i$  그리고  $\Gamma_{i,i'} = \frac{j4\pi}{\lambda} \sin\left(\frac{\phi}{2}\right)(\alpha_i - \alpha_{i'})$ ,  $\alpha_i = r_i \sin\left(\psi_i - \frac{\phi}{2}\right)$ 와 같이 정의된다.

Table 1. Ratio of the directional beams not aligned to the target node.

M	2	3	4	5	6	7	8	9	10
Rate [%]	49	67	75	80	84	86	88	89	90

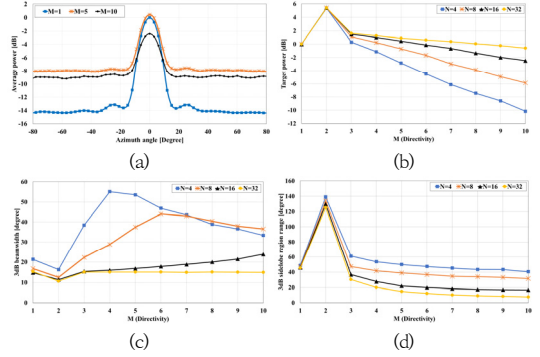


Fig. 2. (a) Average beampatterns of the CB with directional beams:  $N=16$  and  $R=5\lambda$ . (b)  $P_{av}(\phi_0)$ , (c)  $\Delta\phi_{av}^b$  and (d)  $\Delta\phi_{av}^s$ .

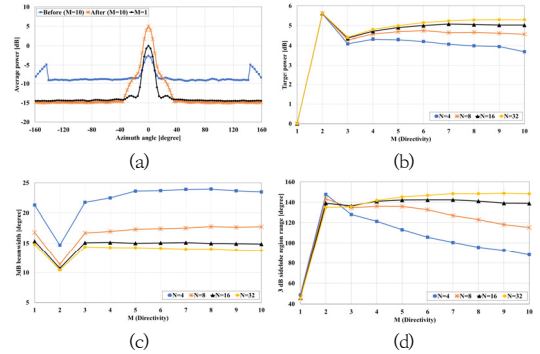


Fig. 3. (a) Average beampatterns before and after the radiation-pattern replacement:  $N=16$  and  $R=5\lambda$ . (b)  $P_{av}(\phi_0)$ , (c)  $\Delta\phi_{av}^b$  and (d)  $\Delta\phi_{av}^s$ .

## 2.2 모의 실험을 통한 빔 패턴 특성 분석

빔 패턴 특성 분석을 위해 총  $10^6$ 개의 샘플을 형성하였으며, 각 샘플의 무선 센서 노드 위치와 빔 지향각은 아래와 같은 균일 분포를 따른다고 가정하였다.

$$f_{r_i}(r) = \frac{2r}{R^2}, 0 < r \leq R$$

$$f_{\psi_i}(\psi) = \frac{1}{2\pi}, -\pi \leq \psi < \pi$$

$$f_{\delta}(\delta) = \frac{1}{2\pi}, -\pi \leq \delta < \pi$$

Fig. 2(a)는 이러한 샘플들의 평균 빔 패턴을 보여주고 있으며,  $M=5$ 에서 목표 전력이 미약하게 증가한 것을 확인할 수 있다. 이는, 지향성 빔에 의해 목표 노드 방향으로 에너지를 집중할 수 있기 때문이다. 하지만,  $M=10$ 에서는 오히려 목표 전력이 대폭 감소하였으며, 나아가  $M=5$  및  $M=10$  모두 부엽이 증가하였다. 이는 Table 1과 같이  $M$ 이 증가할수록 목표 노드 방향으로 정렬된 지향성 빔의 비율이 감소하기 때문이다. Fig. 2(b-d)는  $M$ 에 따른 평균 목표 전력  $P_{av}(\phi_0)$ , 3-dB 평균 빔폭  $\Delta\phi^{b_{av}}$  그리고 평균 3-dB 부엽 영역  $\Delta\phi^{s_{av}}$ 을 도시하고 있다. 여기서,  $\Delta\phi^{b_{av}}$ 는  $\phi_0$ 와 전력이 절반으로 감소하는  $\phi_b$  사이의 방위각 그리고  $\Delta\phi^{s_{av}}$ 는  $10\log(P(\phi_0)/N)+3$ 을 만족하는  $\phi_s$ 와  $\pi$ 사이의 방위각을 의미한다[11].

Fig. 2(b)에서는, Fig. 2(a)와 같이  $M$ 이 증가할수록  $P_{av}(\phi_0)$ 가 감소하는 것을 살펴볼 수 있으며, Fig. 2(c)의  $\Delta\phi^{b_{av}}$ 는 언덕 형태의 곡선을 보여주고 있다. 이는, 낮은  $M$ 에서는 센서 노드의 지향성 빔들이 CB의 주엽(Mainlobe)과 교차(Overlap)될 가능성이 높으나 반대의 경우 주엽으로부터 이격된 지향성 빔의 비율이 증가하기 때문이다. 달리 말해, 지향성 빔이 첨예할수록 부엽 영역에 놓일 가능성이 높으며, 이는 Fig. 2(d)의  $\Delta\phi^{s_{av}}$ 의 감소를 통해 확인할 수 있다. 추가적으로, Fig. 2(b-d)에 걸쳐  $M=2$ 에서 마루(Peak) 혹은 골(Valley)이 관찰되며, 이는 지향성 빔이 50%의 확률로 목표 노드를 조사하기 때문이다.

### 3. 노드 선택 알고리즘 설계 및 검증

#### 3.1 노드 선택 알고리즘 설계

2장의 연구 결과를 통해, 목표 노드 방향으로 정렬되어 있지 않는 지향성 빔은 CB 부엽 증가의 원인이 된다는 것을 확인할 수 있었다. 따라서, 이들을 등방성 방사 패턴으로 대체할 경우, 부엽 감소가 가능하다는 것 또한 예측할 수 있으며, 그 결과는 Fig. 3에서 확인할 수 있다. 방사 패턴 대체 후 모든 센서 노드들이 CB에 관여할 수 있으므로,  $P_{av}(\phi_0)$ 가 증가한 것을 확인할 수 있으며, 모든 지향성 빔이 목표 노드 방향으로 정렬되어 있으므로

$M=2$  이후로는  $\Delta\phi^{b_{av}}$ 가 일정한 것 또한 살펴볼 수 있다. 또한, 기대한 것과 같이 부엽이 감소하여  $\Delta\phi^{s_{av}}$ 가 상당히 증가한 것을 확인할 수 있다.

이러한 방사 패턴 대체는 기본적으로 GPS(Global Positioning System)와 자이로스코프(Gyroscope)로부터 획득한 위치 정보를 활용, 미정렬 지향성 빔을 방사하는 센서 노드를 직접 식별 함으로써 간단히 이루어질 수 있다. 하지만, 실내 혹은 산악 지역과 같이 GPS 신호가 제한되는 환경에서는 부엽 감소로 이어지는 센서 노드 조합을 간접적으로 발굴하는 노드 선택 알고리즘이 적합하다.

$$\begin{aligned} \bar{\sigma}_0 &= \operatorname{argmin} P(\phi_f, \bar{\sigma} \mid \bar{r}, \bar{\psi}, \bar{\delta}) \\ P(\phi_f, \bar{\sigma} \mid \bar{r}, \bar{\psi}, \bar{\delta}) &\geq \mu_t \end{aligned} \quad (3)$$

여기서, 방사 패턴 대체를 위해 각 센서 노드는 등방성 및 지향성 안테나를 모두 탑재하였다고 가정하였으며, 각  $\bar{\sigma} = [\sigma_1, \sigma_2, \dots, \sigma_M] \in \{0, 1\}^N$ 는 탐색 상태 벡터(Search State Vector),  $\bar{\sigma}_0$ 는 최종 탐색 상태 벡터,  $\mu_t = \beta P(\phi_0, \bar{\sigma} \mid \bar{r}, \bar{\psi}, \bar{\delta})$ 는 부엽 최소화 과정 중 목표 전력에 임계 값 이하로 감소하는 것을 방지하기 위한 것이며,  $\beta$ 는  $\mu_t$ 의 제어율이다. 또한,  $P(\phi, \bar{\sigma} \mid \bar{r}, \bar{\psi}, \bar{\delta})$ 는  $\Omega_{i,i'} = \sigma_i \sigma_{i'} e^{-\Gamma_{i,i'}}$ 와 함께 Eq. 4와 같이 정의된다.

$$P \simeq \begin{cases} \left(\frac{M}{N}\right)^2 \sum_{i=1}^N \sum_{i'=1}^N \Omega_{i,i'}, & \delta_l \leq \phi \leq \delta_u \\ \frac{1}{(NM)^2} \sum_{i=1}^N \sum_{i'=1}^N \Omega_{i,i'}, & (\phi < \delta_l) \wedge (\phi > \delta_u) \\ \sum_{i=1}^N \sum_{i'=1}^N m_i m_{i'} \Omega_{i,i'}, & \text{elsewhere} \end{cases} \quad (4)$$

Eq. 3에서 최적의 조합 해를 찾기 위해서는 완전 탐색(Exhaustive Search) 기법을 이용할 수 있다. 하지만, 센서 노드의 개수가 증가할수록 시간 복잡도가  $O(2^N)$ 으로 증가하는 치명적인 단점이 있다. 또한, 메타 휴리스틱 최적화를 대안으로 활용할 수 있으나 무선 센서의 낮은 메모리 용량과 클럭 속도로 인해 이 또한 제한된다. 따라서, 본 논문에서는 탐색 성능과 효율성 모두를 위한 분할 정복 기반 노드 선택 알고리즘을 제안하였다. Algorithm 1에서 확인할 수 있다시피, 제안된 알고리즘

의 시간 복잡도는  $O(N \log N)$ 이며, 방사 패턴을 대체하기 위해 N-bit 크기의 테스트 신호만 방송(Broadcast)하면 되므로, 에너지면에서 효율적이다.

**Algorithm 1:** The proposed node selection algorithm.

```

1   $P(\phi_0, \bar{\sigma}) := P(\phi_0, \bar{\sigma} \mid \bar{r}, \bar{\psi}, \bar{\delta})$ 
2  Init:  $\beta \in [0.1, \dots, 1]$ ,  $f_{\sigma_i}(\sigma) = \left(\frac{1}{2}\right)^\sigma \left(\frac{1}{2}\right)^{1-\sigma}$ 
3  Input:  $\beta, \bar{\sigma}$ 
4  Output:  $P(\phi_0, \bar{\sigma}_0)$ ,  $P(\phi_f, \bar{\sigma}_0)$ 
5  Divide ( $\bar{\sigma}$ , start, end)
6  if start < end
7   $mid = \lfloor (start + end) / 2 \rfloor$ 
8  Divide ( $\bar{\sigma}$ , start, mid)
9  Divide ( $\bar{\sigma}$ , mid+1, end)
10 Conquer ( $\bar{\sigma}$ , start, end, mid)
11 Conquer ( $\bar{\sigma}$ , start, end, mid)
12  $s_1 = mid - start + 1$ 
13  $s_2 = end - mid$ 
14  $\bar{l} = [0, 0, \dots, 0]^{s_1+1}$ ,  $\bar{\gamma} = [0, 0, \dots, 0]^{s_2+1}$ 
15 for  $i=1$  to  $s_1$ 
16  $l_i = \sigma_{(start+i-1)}$ 
17 for  $i=1$  to  $s_2$ 
18  $\gamma_j = \sigma_{(mid+1)}$ 
19  $l_{s_1+1} = \gamma_{s_2+1} = \infty$ 
20 for  $k=start$  to end
21 if  $P(\phi_f, \bar{\sigma}) \mid_{\sigma_k=l_i} < P(\phi_f, \bar{\sigma}) \mid_{\sigma_k=\gamma_j}$ 
22 and  $P(\phi_f, \bar{\sigma}) \mid_{\sigma_k=l_i} \geq \beta P(\phi_0, \bar{\sigma})$ 
23  $\sigma_k = l_i$ ,  $i = i + 1$ 
24 else if  $P(\phi_f, \bar{\sigma}) \mid_{\sigma_k=l_i} \geq P(\phi_f, \bar{\sigma}) \mid_{\sigma_k=\gamma_j}$ 
25 and  $P(\phi_f, \bar{\sigma}) \mid_{\sigma_k=l_i} \geq \beta P(\phi_0, \bar{\sigma})$ 
26  $\sigma_k = \gamma_j$ ,  $j = j + 1$ 

```

Fig. 4는 노드 선택 알고리즘의 모의 실험 결과를 보여주고 있다. Fig. 4(a)에서는 첫 번째 부엽(First Sidelobe)이 효과적으로 억제된 것을 확인할 수 있다. 하지만,  $M$ 이 작을수록 부엽 억제 능력이 감소하였으며, 이는, 빔이 좁아질수록 더 많은 탐색 횟수가 필요하기 때문이다. Fig. 4(b)는 알고리즘에 의한 목표 전력  $P_{av}(\phi_0)$ 의 변화를 보여주고 있으며, 사전에 설정한 임계 값에 의해 부엽이 효과적으로 억제되었음에도 불구하고 목표 전력 손실이 발생하지 않은 것을 확인할 수 있다.

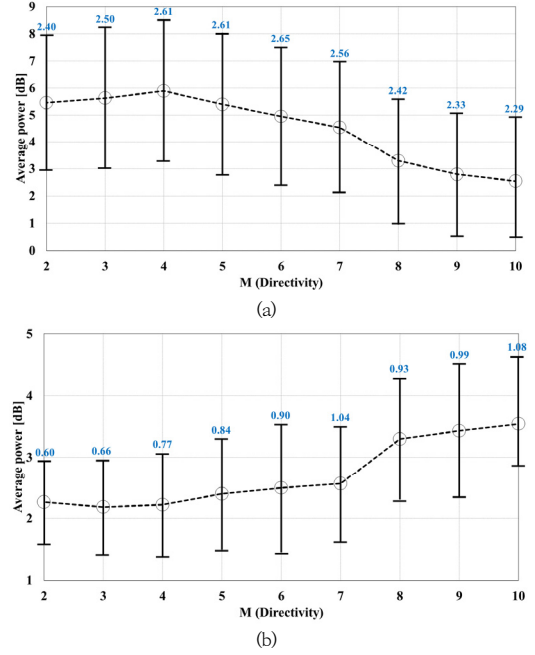


Fig. 4. (a) Average improvement on the first sidelobe peak power  $[P_{av}(\phi_f) - P_{av}(\phi_f, \bar{\sigma}_0)]$  and (b) target power  $[P_{av}(\phi_0, \bar{\sigma}_0) - \mu_t]$  at  $\beta = 0.5$ :  $N = 16$  and  $R = 5\lambda$ .

본 논문에서는 노드 선택 기법의 성능 분석을 이론적으로 수행하였으나, 구현 가능성에 대해서는 검증하지 않았다. 다만, 핵심 기법인 분할 정복의 성능과 실현 가능성이 다양한 저전력 임베디드 환경에서 검증되었으므로[19,20], 제안된 알고리즘 또한 연산 능력이 제한된 소형 센서에서 충분히 구현이 가능할 것으로 기대된다.

## 4. 결론

본 논문에서는 지향성 빔을 방사하는 무선 센서들의 협력 빔포밍을 연구하였으며, 소형 센서의 경우 빔 조향 장치 탑재가 제한된다는 점을 고려, 빔들이 임의의 방향으로 조사하는 경우를 가정하였다. 그 결과 목표 출력이 감소하고 부엽이 증가하는 현상이 관찰되었으며, 이는 목표 노드를 향하지 않는 지향성 빔에 기인한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 해당 빔들을 등방성 방사 패턴으로 대체하는 노드 선택 방법을 제안하였으며, 해당 알고리즘의 효율성 개선을 위해 분할 정복 기법을 접목하였

다. 또한, 예기치 못한 목표 출력 감소를 방지하기 위해 임계값을 설정하였다. 그 결과, 낮은 시간 복잡도에도 불구하고, 목표 전력의 손실 없이 효과적으로 부엽을 억제할 수 있었다.

제안된 노드 선택 알고리즘은 부엽 억제만을 목표로 하였다. 하지만, 앞서 살펴봤듯이 빔의 무작위 지향성은 목표 전력 감소라는 문제점 또한 초래하므로, 목표 전력 개선과 부엽 억제를 동시에 달성할 수 있는 다변수 노드 선택 알고리즘을 향후 개발할 예정이다.

본 논문의 연구 결과는 지향성 혹은 배열 안테나를 탑재한 무선 센서를 위한 협력 빔포밍 기술 개발의 기초 자료로 활용될 수 있을 것으로 사료된다.

## References

- [1] M. Ayaz et al., "Wireless sensor 's civil applications, prototypes, and future integration possibilities: a review", *IEEE Sensors Journal*, vol.18, no.1, pp.4-30, Jan. 2018.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/JSEN.2017.2766364>
- [2] I. Kahraman, A. Kose, M. Koca, and E. Anarim, "Age of information in Internet of Things: a survey", *IEEE Internet of Things Journal*, Oct. 2023.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2023.3324879>
- [3] Z. Wei et. al, "Integrated sensing and communication signals toward 5G-A and 6G: a survey", *IEEE Internet of Things Journal*, vol.10, no.13, pp.11068-11092, Jan. 2023.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/JIOT.2023.3235618>
- [4] S. Dey, S. Mohon, P. Pisu, and B. Ayalew, "Sensor fault detection, isolation, and estimation in lithium-ion batteries", *IEEE Transactions on Control Systems Technology*, vol.24, no.6, pp.2141-2149, Mar. 2016.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/TCST.2016.2538200>
- [5] A. Tripathi et al., "Coverage and connectivity in WSNs: a survey, research issues and challenges", *IEEE Access*, vol.6, pp.26971-26992, Jun. 2018.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2833632>
- [6] N. A. Pantazis, S. A. Nikolidakis, and D. D. Vergados, "Energy-efficient routing protocols in wireless sensor networks: a survey", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol.15, no.2, pp.551-591, Jul. 2012.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/SURV.2012.062612.00084>
- [7] S. Khisa and S. Moh, "Survey on recent advancements in energy-Efficient routing protocols for underwater wireless sensor networks", *IEEE Access*, vol.9, pp.55045-55062, Apr. 2021.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3071490>
- [8] U. Uyoata, J. Mwangama, and R. Adeogun, "Relaying in the Internet of Things (IoT): a survey", *IEEE Access*, vol.9, pp.132675-132704, Sep. 2021.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2021.3112940>
- [9] L. Berbakov et al., "Collaborative data transmission in wireless sensor networks", *IEEE Access*, vol.8, pp.39647-39658, Feb. 2020.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2020.2975834>
- [10] Suhanya Jayaprakasam, Sharul Kamal Abdul Rahim, and Chee Yen Leow, "Distributed and collaborative beamforming in wireless sensor networks: classifications, trends, and research directions", *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol.19, no.4, pp.2092-2116, Jun. 2017.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/COMST.2017.2720690>
- [11] 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, Oct. 2005.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/TSP.2005.857028>
- [12] M. F. A. Ahmed and S. A. Vorobyov, "Collaborative beamforming for wireless sensor networks with Gaussian distributed sensor nodes", *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol.8, no.2, pp.4110-4124, Feb. 2009.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/TWC.2009.071339>
- [13] J. Huang, P. Wang, and Q. Wan, "Collaborative beamforming for wireless sensor networks with arbitrary distributed sensors", *IEEE Communications Letters*, vol.16, no.7, pp.1118-1120, May. 2012.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/LCOMM.2012.050912.120370>
- [14] R. Karim, A. Iftikhar, B. Ijaz, and I. B. Mabrouk, "The potentials, challenges, and future directions of on-chip-antennas for emerging wireless applications—a comprehensive survey", *IEEE Access*, vol.7, pp.173897-173934, Dec. 2019.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2957073>
- [15] X. Shen et al., "A Miniaturized microstrip antenna array at 5G millimeter-wave band", *IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters*, vol.18, no.8, pp.1671-1675, Jul. 2019.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/LAWP.2019.2927460>
- [16] K. Zarifi, S. Affes, and A. Ghayeb, "Collaborative null-steering beamforming for uniformly distributed wireless sensor network", *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol.58, no.3, pp.1889-1903, Nov. 2009.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/TSP.2009.2036476>
- [17] S. Jayaprakasam et al., "Multiobjective beampattern optimization in collaborative beamforming via NSGA-II with selective distance", *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, vol.65, no.5, pp.2348-2357, Mar. 2017.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/TAP.2017.2684187>
- [18] G. Sun et al., "Energy Efficient Collaborative Beamforming for Reducing Sidelobe in Wireless Sensor Networks", *IEEE Transactions on Mobile Computing*, vol.20, no.3, pp.965-982, Nov. 2019.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/TMC.2019.2955948>

- [19] N. Trung, N. Hung and P. L. Nguyen, "Network lifetime maximization for full area coverage in wireless sensor networks", in *Proc. 25<sup>th</sup> Asia-Pacific Conference on Communications*, pp.431-436, Nov. 2019.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/APCC47188.2019.9026510>
- [20] P.-Q. Huang, Y. Wang and K. Wang, "A divide-and-conquer bilevel optimization algorithm for jointly pricing computing resources and energy in wireless powered MEC", *IEEE Transactions on Cybernetics*, vol.52, no.11, pp.965-982, Nov. 2022.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/TCYB.2021.3103840>

---

오 세 명(Semyoung Oh)

[정회원]



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

- 2020년 9월 ~ 2023년 12월 : Texas A&M 대학교 전기컴퓨터공학과 (공학박사)

<관심분야>

안테나, 빔포밍, 레이더, 무선통신 등