

# 충전 시간 감소를 위한 낮은 복잡도의 다중 사용자 에너지 빔포밍

강진호\*

## Multi-User Energy Beamforming with Low-Complexity to Reduce Charging Time

Jinho Kang\*

### 요약

최근 IoT 장치들의 배터리를 무선으로 충전하는 RF 기반의 무선 에너지 전송에 관한 연구가 큰 주목을 받고 있다. 본 논문에서는 사용자들이 충전 해야 하는 에너지양에 따라 네트워크의 전체 사용자가 모두 충전하는데 걸리는 시간을 저감할 수 있는 낮은 복잡도의 다중 사용자 에너지 빔포밍을 제안한다.

**Key Words :** Wireless energy transfer, Energy Beamforming, Low complexity

### ABSTRACT

Recently, RF-based wireless energy transfer (WET) that wirelessly charges the batteries of IoT devices has been great attention. In this paper, we propose low-complexity multi-user energy beamforming that can reduce the overall charging time for all users of the network according to the amount of energy to be charged.

### 1. 서론

최근 테블릿과 같은 IoT (Internet of Things) 장치들

이 급격히 증가함에 따라 IoT 장치들의 배터리를 충전할 수 있는 RF (Radio frequency) 기반의 무선 에너지 충전에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다<sup>[1-4]</sup>. 기존 충전방식과는 달리 유선 충전 장치를 설치하거나 주기적인 배터리 교체가 불필요하여, 충전 수요가 급증하는 네트워크의 운용 수월성을 증진할 수 있다. 하지만, RF 기반의 무선 에너지 전송은 정류화 과정에서의 손실과 전송 거리에 따른 전파 감쇠로 수신기에서 충전되는 에너지양이 작다는 한계점이 있다. 추가적인 송신 전력 증가나 밴드 폭 할당 없이 이러한 한계점을 극복할 수 있는 기술로서 에너지 빔포밍 기술이 주목받고 있다<sup>[1-4]</sup>. 실시간 채널 상태 정보를 기반으로 사용자들의 수신 전력의 합 또는 수신 전력의 공평성 (Fairness) 을 최대화하는 에너지 빔포밍이 연구되었으며<sup>[1]</sup>, 실시간 채널 상태 정보뿐만 아니라 사용자들의 에너지 요구량까지 동시에 고려함으로써 충전 시간을 최소화하는 에너지 빔포밍이 제안되었다<sup>[2]</sup>. 이를 확장한 연구로, 저전력 IoT 시스템을 위해 계산 복잡도를 저감할 수 있도록 채널 통계만을 활용하여 수신 전력의 공평성을 최대화하거나 충전 시간을 최소화하는 에너지 빔포밍이 제안되었다<sup>[3,4]</sup>. 하지만, 채널 상태 정보와 충전해야 하는 에너지 양이 주어졌을 때, 충전 시간을 최소화할 수 있는 낮은 복잡도의 에너지 빔포밍 연구는 미비한 실정이다.

본 논문은 사용자들이 충전해야 하는 에너지양에 따라 네트워크의 전체 사용자가 모두 충전하는데 걸리는 시간을 감소할 수 있는 낮은 복잡도의 에너지 빔포밍을 새롭게 제안하고 그 성능을 분석한다. 수학적 분석을 기반으로 weighted-sum maximum ratio transmission (MRT) 형태의 낮은 복잡도를 갖는 closed-form 형식의 에너지 빔포밍 기법을 새롭게 제안한다.

### II. 시스템 모델 및 문제 정의

본 논문에서는  $U$ 명의 사용자들이  $M$  개 안테나로 구성된 에너지 송신기로부터 에너지 빔포밍을 통해 에너지를 전달받는 단일 셀 시스템을 고려한다. 에너지 전송 신호를  $d_n$  ( $n \in \{1, \dots, N_b\}$ ), 다중 안테나에 의한 전송 신호  $d_n$ 의 빔포밍 벡터를  $\mathbf{v}_n \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 로 정의하

\* This work was supported in part by the National Research Foundation of Korea(NRF) grant funded by the Korea government(MSIT) (RS-2023-00214142), and in part by the MSIT(Ministry of Science and ICT), Korea, under the ICAN(ICT Challenge and Advanced Network of HRD) program(IITP-2023-RS-2022-00156409) supervised by the IITP(Institute of Information & Communications Technology Planning & Evaluation).

\* First and Corresponding Author : (ORCID:0000-0003-2513-3304) Department of Electronic Engineering, Gyeongsang National University, jinhokang@gnu.ac.kr, 조교수, 정회원

논문번호 : 202311-135-B-LU, Received November 8, 2023; Revised December 2, 2023; Accepted December 2, 2023

면, 송신 신호는  $\mathbf{x} = \sum_{n=1}^{N_b} \mathbf{v}_n d_n$  이다.  $N_b (\leq M)$  를 에너지 빔의 개수로 표현하면, 송신 신호의 공분산 행렬은  $\mathbf{S} = \sum_{n=1}^{N_b} \mathbf{v}_n \mathbf{v}_n^H \in \mathbb{H}^+$  로 정의된다.  $N_b$  는 공분산 행렬의 계수 (rank)를 의미하며,  $\mathbb{H}^+$  는 positive semidefinite (PSD) 행렬을 나타낸다<sup>1,2</sup>.

$\mathbf{h}_u \in \mathbb{C}^{M \times 1}$  ( $u \in \mathbf{U} = \{1, \dots, U\}$ )를 에너지 송신기와  $u$  번째 사용자 간의 다중 안테나 채널이라 하면, 충전 시간  $\tau_u$  동안  $u$  번째 사용자가 수확하는 에너지양  $Q_u$  는 아래와 같다<sup>1,2</sup>.

$$Q_u = \eta_u \tau_u \text{Tr}(\mathbf{G}_u \mathbf{S}) \quad (1)$$

위 식에서  $\eta_u (\in (0, 1])$ 는  $u$  번째 사용자의 에너지 하베스팅 효율이며,  $\mathbf{G}_u = \mathbf{h}_u \mathbf{h}_u^H$ ,  $\text{Tr}(\cdot)$  는 대각합 (Trace)을 나타낸다. 일반성을 잃지 않고, 본 연구에서는  $\eta_1 = \dots = \eta_U = 1$ 로 가정한다<sup>2,4</sup>.

각 사용자가 충전해야 하는 에너지양이  $Q_u^{\text{Target}}$  ( $\forall \mathbf{U}$ ) 로 주어졌을 때, 식 (1)로부터 각 사용자의 충전 시간은  $\tau_u = Q_u^{\text{Target}} / \text{Tr}(\mathbf{G}_u \mathbf{S})$  이다. 따라서, 네트워크의 전체 사용자가 모두 충전하는데 걸리는 시간은  $\max(\tau_1, \dots, \tau_U)$  이다. 사용자가 충전해야 하는 에너지양을 고려함으로써 전체 네트워크의 충전 시간을 최소화 하는 에너지 빔포밍이 제안되었으며, 아래의 문제를 통해 최적의 에너지 빔포밍을 도출할 수 있다<sup>2,4</sup>.

$$\begin{aligned} \text{P1: minimize} \quad & \max_{\mathbf{S}}(\tau_1, \dots, \tau_U) \\ \text{subject to} \quad & \tau_u = \frac{Q_u^{\text{Target}}}{\text{Tr}(\mathbf{G}_u \mathbf{S})}, \forall \mathbf{U}, \\ & \text{Tr}(\mathbf{S}) \leq P, \mathbf{S} \in \mathbb{H}^+ \end{aligned}$$

위 문제에서  $P$ 는 송신 전력이다. 문제 P1은 볼록 최적화 문제이며, SDP (Semidefinite programming) solver를 통해 해결할 수 있다. 한편, 위 문제에서 SDP solver는  $O((\max(U+1, M)^4 \sqrt{M} \log(1/\epsilon)))$  ( $\epsilon$ : 정확도)의 계산 복잡도를 요구한다<sup>2</sup>. 따라서, 최근 큰 주목을 받는 Massive MIMO 시스템이나 Massive IoT 환경에서는 계산 복잡도가 매우 크게 증가하는 한계점을 갖는다<sup>5</sup>. 이러한 이유로, 본 논문에서는 수학적 분석을 기반으로 낮은 복잡도를 갖는 closed-form 형식의 에너지 빔포밍 기법을 다음과 같이 제안한다.

### III. 충전 시간 감소를 위한 낮은 복잡도의 다중 사용자 에너지 빔포밍

단일 사용자의 경우 ( $U=1$ ) 기지국과 사용자 간의 채널 벡터를  $\mathbf{h}$ 로 표현하면, 사용자의 충전 시간을 최소화 하는 에너지 빔포밍은 maximum ratio transmission (MRT)이며, 공분산 행렬은 아래와 같이 주어진다.

$$\mathbf{S} = P \tilde{\mathbf{h}} \tilde{\mathbf{h}}^H \quad (2)$$

위 식에서  $\tilde{\mathbf{h}} = \frac{\mathbf{h}}{\|\mathbf{h}\|}$ 이며, 채널 방향을 의미한다

<sup>5</sup>. 본 논문에서는 네트워크의 모든 사용자를 고려한 weighted-sum MRT 형태의 에너지 빔포밍을 고려하며, 이때의 공분산 행렬을 아래와 같이 구성한다.

$$\mathbf{S} = P \sum_{j=1}^U \alpha_j \tilde{\mathbf{h}}_j \tilde{\mathbf{h}}_j^H \quad (3)$$

위 식에서  $\tilde{\mathbf{h}}_j = \frac{\mathbf{h}_j}{\|\mathbf{h}_j\|}$  이고,  $[\alpha_j]_{j=1}^U$ 는 각 사용자

에 해당하는 MRT 빔포밍의 가중치를 나타낸다. 사용자들이 충전해야 하는 에너지양과 채널에 따라  $[\alpha_j]_{j=1}^U$ 를 아래와 같이 도출한다. 또한, (3)에서 도출한 공분산 행렬이 항상 PSD행렬이 되도록  $\alpha_j \geq 0$  을 만족하도록 설계한다. 식 (3)의 에너지 빔포밍으로 전송 시 단위 시간, 즉 1초 동안  $u$  번째 사용자가 수확하는 에너지양은 수식 (4)와 같다.

$$\begin{aligned} \text{Tr}(\mathbf{G}_u \mathbf{S}) &= \text{Tr}\left(\mathbf{h}_u \mathbf{h}_u^H \left[ \sum_{j=1}^U \alpha_j \tilde{\mathbf{h}}_j \tilde{\mathbf{h}}_j^H \right]\right) \\ &= \alpha_u \|\mathbf{h}_u\|^2 + \sum_{j \neq u} \alpha_j \left| \mathbf{h}_u^H \tilde{\mathbf{h}}_j \right|^2 \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)에서 첫 번째 항은  $u$  번째 사용자의 MRT 빔포밍으로부터 수확하는 에너지양이며, 두 번째 항은 다른 네트워크의 사용자들, 즉  $j \neq u$ 의 사용자들의 MRT 빔포밍으로부터 수확하는 에너지양이다. 한편, 정보 전송에서는 두 번째 항이 다른 사용자로부터 발생하는 간섭으로 작용하며 통신 성능의 하락을 초래하는 요소이므로 제거 대상이다. 반면, 에너지 전송에서는  $u$  번째 사용자의 에너지를 제공해주는 이점이 있다.

모든 사용자가 수확하는 에너지 양을 다음과 같이  $\mathbf{Q} = [Q_1, Q_2, \dots, Q_U]^T$ 로 정의하면, 식 (4)로부터 아래의

식 (5)를 얻을 수 있다.

$$\mathbf{Q} = \Psi \alpha \quad (5)$$

위 식에서  $\Psi$ 와  $\alpha$ 는 아래와 같이 정의된다.

$$\Psi = \begin{bmatrix} \|\mathbf{h}_1\|^2 & \mathbf{h}_1^H \tilde{\mathbf{h}}_2 & \dots & \mathbf{h}_1^H \tilde{\mathbf{h}}_U \\ \mathbf{h}_2^H \tilde{\mathbf{h}}_1 & \|\mathbf{h}_2\|^2 & \dots & \mathbf{h}_2^H \tilde{\mathbf{h}}_U \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{h}_U^H \tilde{\mathbf{h}}_1 & \mathbf{h}_U^H \tilde{\mathbf{h}}_2 & \dots & \|\mathbf{h}_U\|^2 \end{bmatrix}, \alpha = \begin{bmatrix} \alpha_1 \\ \alpha_2 \\ \vdots \\ \alpha_U \end{bmatrix} \quad (5)$$

모든 사용자가 목표하는 에너지 양 벡터를 다음과 같이  $\mathbf{Q}^{\text{Target}} = [Q_1^{\text{Target}}, Q_2^{\text{Target}}, \dots, Q_U^{\text{Target}}]^T$ 로 정의하면, 가중치 벡터  $\alpha$ 는  $\mathbf{Q}^{\text{Target}}$ 을 달성할 수 있도록 아래의 문제를 해결함으로써 도출한다.

$$\text{P2: minimize}_{\alpha} \quad \|\Psi \alpha - \mathbf{Q}^{\text{Target}}\|$$

문제 P2의 최적의 해는 closed-form 형식으로 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$\alpha^* = \begin{cases} \Psi^{-1} \mathbf{Q}^{\text{Target}}, & \text{if } \text{rank}(\Psi) = U, \\ \Gamma \Lambda^{-1} \mathbf{V}^T \mathbf{Q}^{\text{Target}}, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (6)$$

위 식에서  $\Psi = \Gamma \Lambda \mathbf{V}^T$ 는 특이값 분해로부터 얻을 수 있다. 식 (6)으로부터 얻은  $\alpha^*$ 를 바탕으로 식 (3)의 공분산 행렬을 구성 시 항상 PSD 행렬을 만족할 수 있도록  $\alpha^*$ 를 아래와 같이 구성한다.

$$\alpha_j^* = \begin{cases} 0, & \text{if } \alpha_j^* < 0, \\ \alpha_j^*, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (7)$$

결과적으로, 송신 전력을  $P$ 를 만족할 수 있도록 공분산 행렬을 아래와 같이 제안한다.

$$\mathbf{S}_1^{\text{Prop}} = \frac{P \sum_{j=1}^U \alpha_j^* \tilde{\mathbf{h}}_j \tilde{\mathbf{h}}_j^H}{\text{Tr}(\sum_{j=1}^U \alpha_j^* \tilde{\mathbf{h}}_j \tilde{\mathbf{h}}_j^H)} \quad (8)$$

이에 더불어, 식 (8)로부터 구성하는 에너지 빔포밍보다 도출 과정에서 계산 복잡도를 더 줄일 수 있는

에너지 빔포밍을 수학적 분석을 기반으로 추가적으로 다음과 같이 제시한다. 식 (4)를 통해  $u$ 번째 사용자가 수확하는 전력량의 하한을 도출하면 아래와 같다.

$$\begin{aligned} \text{Tr}(\mathbf{G}_u \mathbf{S}) &= \alpha_u \|\mathbf{h}_u\|^2 + \sum_{j \neq u} \alpha_j |\mathbf{h}_u^H \tilde{\mathbf{h}}_j|^2 \\ &\geq \alpha_u \|\mathbf{h}_u\|^2 \end{aligned} \quad (9)$$

$u$ 번째 사용자가 수확하는 전력량의 하한, 즉 식 (9)를 식 (5)에 적용할 수 있다. 이때,  $\Psi$ 는 아래와 같은 대각행렬이 된다.

$$\Psi = \text{diag}(\|\mathbf{h}_1\|^2, \|\mathbf{h}_2\|^2, \dots, \|\mathbf{h}_U\|^2) \quad (10)$$

식 (10)을 통해 식 (6)을 구성하면, 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$\alpha_j^{\star, \text{LB}} = \frac{Q_j^{\text{Target}}}{\|\mathbf{h}_j\|^2} \geq 0 \quad (11)$$

결과적으로, 송신 전력을  $P$ 를 만족할 수 있도록 공분산 행렬을 아래와 같이 얻을 수 있다.

$$\mathbf{S}_2^{\text{Prop}} = \frac{P \sum_{j=1}^U \alpha_j^{\star, \text{LB}} \tilde{\mathbf{h}}_j \tilde{\mathbf{h}}_j^H}{\text{Tr}(\sum_{j=1}^U \alpha_j^{\star, \text{LB}} \tilde{\mathbf{h}}_j \tilde{\mathbf{h}}_j^H)} \quad (12)$$

#### IV. 모의실험

모의실험을 통해 본 논문에서 제안하는 에너지 빔포밍의 성능을 분석한다. 성능 평가를 위한 기법들로 i) 문제 P1으로부터 얻은 충전 시간을 최소화하는 최적의 에너지 빔포밍, ii) 사용자들이 요구하는 에너지량을 고려하지 않은 max-min 에너지 빔포밍<sup>[1]</sup>, iii) 수식 (8)로부터 얻는 본 논문에서 제안하는 낮은 복잡도의 에너지 빔포밍 #1, iv) 수식 (12)로부터 얻는 본 논문에서 제안하는 낮은 복잡도의 에너지 빔포밍 #2을 고려한다. 각 사용자의 채널은 레일리 (Rayleigh) 페이딩 채널<sup>[5]</sup>을 고려하였으며, 각 사용자의 에너지 요구량은 [1, 100]J 범위에서 균일 분포로 랜덤하게 설정하였다.

그림 1과 2는 사용자 수가 10명일 때 안테나 수에 따른 평균 충전 시간과 이에 해당하는 평균 계산 실행 (Computation execution) 시간을 나타낸다. 또한, 그림 1에서는 평균 충전 시간의 표준 편차에 대한 오차 막대

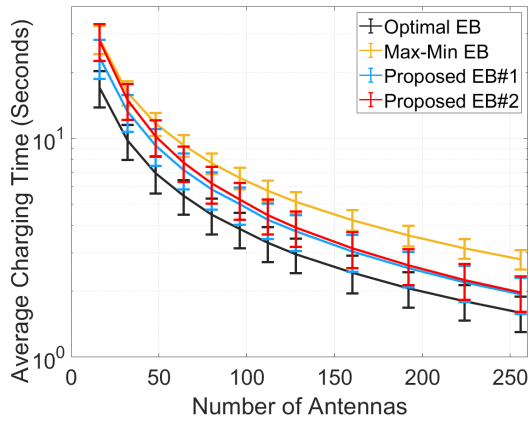


그림 1. 평균 충전 시간  
Fig. 1. Average charging time

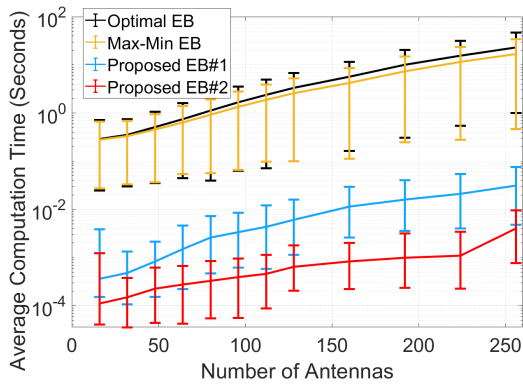


그림 2. 평균 계산 실행 시간  
Fig. 2. Average computation execution time

를 그림 2에서는 평균 계산 실행 시간의 최댓값과 최솟값에 대한 오차 막대를 표시하였다. 문제 P1으로부터 얻은 최적의 에너지 빔포밍이 충전 시간이 가장 작은 반면, 평균 계산 실행 시간이 가장 크음을 알 수 있다. 본 논문에서 제안하는 에너지 빔포밍 기법들의 경우 평균 계산 실행 시간을 매우 크게 감소시키며, 최적의 충전 시간을 근접하게 따라감을 알 수 있다. 또한, max-min 에너지 빔포밍보다 계산 복잡도를 매우 크게 줄이는 반면, 더 우수한 평균 충전 시간을 달성함을 알 수 있다. 수식 (12)로부터 얻은 제안하는 에너지 빔포밍 기법의 경우 계산 복잡도가 가장 작으며, 안테나 수가 증가할수록 수식 (8)로부터 얻은 에너지 빔포밍과 유사한 평균 충전 시간을 달성함을 알 수 있다. 다만, 안테나 수가 200~260개의 범위에서 계산 실행 시간의 기울기가 급격히 변함을 알 수 있으며, 안테나 수와 사용자 수 증가에 따른 계산 복잡도 성능의 수학적 분석 및 복잡도 저감 기법을 향후 연구로 고려하고자 한다.

## V. 결론

본 논문에서는 에너지 요구량에 따른 전체 충전 시간을 감소할 수 있는 저 복잡도의 에너지 빔포밍 기법 두 가지를 새롭게 제안하였다. 기존 기법 대비 평균 충전 시간과 계산 복잡도를 매우 크게 감소시킴을 확인하였으며, 안테나 수가 증가할수록 그 격차는 더욱 증가함을 확인하였다.

## References

- [1] A. Thudugalage, S. Atapattu, and J. Evans, "Beamformer design for wireless energy transfer with fairness," in *Proc. IEEE ICC*, pp. 1-6, Kuala Lumpur, Malaysia, May 2016. (<https://doi.org/10.1109/ICC.2016.7511170>)
- [2] J. Kang J. Choi, and W. Choi, "Multi-user energy beamforming for different energy requests," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 10, no. 8, pp. 1687-1691, Aug. 2021. (<https://doi.org/10.1109/LWC.2021.3077411>)
- [3] O. L. A. López, F. A. Monteiro, H. Alves, R. Zhang, and M. Latva-Aho, "A low-complexity beamforming design for multiuser wireless energy transfer," *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 10, no. 1, pp. 58-62, Jan. 2021. (<https://doi.org/10.1109/LWC.2020.3020576>)
- [4] J. Kang, "Channel statistics based wireless energy transfer with energy demand in rician fading channel," *J. KICS*, vol. 48, no. 9, pp. 1075-1078, Sep. 2023. (<https://doi.org/10.7840/kics.2023.48.9.1075>)
- [5] J. Kang and W. Choi, "Novel codebook design for channel state information quantization in MIMO rician fading channels with limited feedback," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 69, pp. 2858-2872, May 2021. (<https://doi.org/10.1109/TSP.2021.3077807>)