

Rician 페이딩 채널에서 에너지 요구량에 따른 채널 통계 기반 무선 에너지 전송

강진호*

Channel Statistics Based Wireless Energy Transfer with Energy Demand in Rician Fading Channel

Jinho Kang*

요약

최근 대량의 IoT (Internet of Things) 장치들에게 에너지를 지속적으로 공급하기 위해 RF 기반의 무선 에너지 전송이 주목받고 있다. 본 논문에서는 Rician 페이딩 채널에서 LoS 성분과 Rician factor만을 활용한 사용자들의 에너지 요구량에 따른 채널 통계기반의 에너지 빔포밍 기법들을 제안한다.

Key Words : Rician fading channel, Wireless energy transfer, Beamforming, Channel statistics

ABSTRACT

Recently, RF (Radio frequency) based wireless energy transfer has attracted attention to continuously provide energy to massive IoT (Internet of Things) devices. This paper proposes channel statistics based energy beamforming schemes with energy demand of users by exploiting only LoS component and Rician factor in Rician fading channel.

I. 서론

최근 무선 네트워크의 발전으로 IoT (Internet of Things) 장치들이 급격히 증가함에 따라 대량의 IoT 장치들에게 에너지를 지속적으로 공급하기 위한 시스템이 주목받고 있다¹⁻³⁾. RF (Radio frequency) 기반의 무선 에너지 전송은 물리적으로 연결된 전력선이나 배터리 교체 없이도 IoT 장치들에게 무선으로 에너지를 공급할 수 있어 핵심 기술로 고려되고 있다¹⁻³⁾. 하지만, 높은 전파 감쇠로 인한 에너지 전송 효율이 낮은 한계점이 있다. 이를 극복하기 위해, 다중 안테나를 활용한 에너지 빔포밍이 제안되었다. 실시간 채널 상태 정보가 주어진 환경에서, 사용자들의 수신 전력의 합을 최대화하거나 수신 전력의 공평성을 최대화하는 빔포밍이 제안되었다¹⁾. 또한, 사용자들이 요구하는 에너지량을 고려하여 전체 충전 시간을 최소화하는 에너지 빔포밍이 제안되었다²⁾.

한편, 다수의 IoT 장치들로부터 실시간으로 채널 상태 정보를 획득하는 것은 저전력 IoT 시스템에서 큰 전력 소모와 높은 복잡도를 발생시킨다³⁾. 이를 극복하기 위해, 채널 통계만을 활용하여 수신 전력의 공평성을 최대화하는 에너지 빔포밍이 제안되었다³⁾. 하지만, 채널 통계만을 활용하고 사용자들이 요구하는 에너지량을 고려함으로써 전체 충전 시간을 감소시키는 채널 통계기반 에너지 빔포밍 연구는 미비한 실정이다.

본 논문에서는 Rician 페이딩 채널 환경에서 사용자들이 요구하는 에너지량을 고려함으로써 전체 충전 시간을 감소시킬 수 있는 채널 통계기반 무선 에너지 전송 기법을 연구하고 그 성능을 분석한다. Rician 페이딩 채널의 채널 통계인 결정론적 LoS (Line-of-Sight) 성분과 Rician factor만을 활용한 사용자들의 에너지 요구량에 따른 에너지 빔포밍 두 가지 기법을 제시한다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 M 개 송신 안테나를 가지는 에너지 송신기가 단일 수신 안테나를 가지는 U 명의 사용자들에게 동시에 에너지를 전송하는 단일 셀 MIMO 하향 링크 시스템을 고려한다. 에너지 송신기에서 전송되는

* 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 : 202210-248-A-LU, Received July 29, 2023; Revised August 7, 2023; Accepted August 7, 2023

빔포밍 벡터는 $\mathbf{v}_n \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ ($n \in \{1, \dots, N_b\}$) 이다. N_b ($\leq M$) 는 에너지 빔의 개수이며, 추후 결정되는 설계 변수이다^{1,2}. 에너지 전송 신호를 d_n 이라 하면, d_n 은 정보를 전달하지 않고 에너지만 전달하므로 평균이 0, 분산이 1인 임의의 분포를 갖는 독립적인 랜덤 수열이다^{1,2}. 따라서, 송신 신호는 $\mathbf{x} = \sum_{n=1}^{N_b} \mathbf{v}_n d_n$ 이며, 공분산

행렬은 $\mathbf{S} = E[\mathbf{x}\mathbf{x}^H] = \sum_{n=1}^{N_b} \mathbf{v}_n \mathbf{v}_n^H$ 로 표현된다. 송신 전력을 P 라 하면, $\text{Tr}(\mathbf{S}) \leq P$ 를 만족해야 한다.

본 논문에서는 Rician 페이딩 채널 환경을 고려하며, 송신기와 사용자 사이의 채널 $\mathbf{h}_u \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ ($u \in \mathcal{U} = \{1, \dots, U\}$)는 아래와 같이 표현된다^{4,5}.

$$\mathbf{h}_u = \sqrt{\frac{K_u}{K_u + 1}} \mathbf{a}_u + \sqrt{\frac{1}{K_u + 1}} \mathbf{h}_u^{NLoS}$$

위 식에서 \mathbf{a}_u 는 결정론적 LoS 성분, $\mathbf{h}_u^{NLoS} \sim CN(0, \mathbf{I}_M)$ 는 랜덤한 NLoS 성분, K_u 는 Rician factor를 나타낸다^{4,5}. 각 사용자의 에너지 하베스팅 효율을 $\eta_u (\in (0, 1])$ 로 나타내면, 충전 시간 τ_u 동안 수확하는 에너지 Q_u 는 다음과 같다^{1,2}.

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

위 식에서 $\mathbf{G}_u = \mathbf{h}_u \mathbf{h}_u^H$, $\text{Tr}(\cdot)$ 는 대각합(Trace)을 나타낸다. 일반성을 잃지 않고 $\eta_1 = \dots = \eta_U = 1$ 로 가정한다.

본 논문에서는 모든 사용자들에게 동시에 에너지를 전달하는 다중 사용자 에너지 빔포밍을 고려한다. 다중 사용자 에너지 빔포밍은 사용자마다 다른 길이의 시간을 할당함으로써 단일 사용자에게 에너지를 전송하는 시간-분할(Time-division) 에너지 빔포밍보다 효율적으로 에너지를 전송할 수 있다. 이는 에너지 전송의 경우 정보 전송과는 다르게 다중 사용자 간 간섭이 없으므로 모든 사용자들의 채널을 고려하여 동시에 에너지를 전송하기 것이 효율적이기 때문이다.

III. Rician 페이딩 채널에서 충전 시간 감소를 위한 채널 통계기반 무선 에너지 전송

많은 수의 사용자들에게 동시에 효율적으로 에너지

를 전달하기 위해 전체 충전 시간을 최소화하는 에너지 빔포밍이 제안되었다². 실시간 채널 상태 정보가 주어졌을 때, 사용자들이 요구하는 에너지량 Q_u 을 고려함으로써 전체 충전 시간을 최소화하는 최적의 에너지 빔포밍은 아래의 문제를 해결함으로써 얻을 수 있다².

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

위 식에서 \mathbb{H}^+ 는 positive semidefinite (PSD) 행렬을 나타낸다. 문제 P1은 볼록 최적화 문제이며 CVX와 같은 SDP (Semidefinite programming) solver를 통해 최적의 해를 얻을 수 있다.

하지만, 대규모 IoT 네트워크에서 실시간 채널 상태 정보를 획득하는 것은 과도한 에너지 소비와 높은 처리 복잡도를 발생시킨다³. 이러한 한계를 극복하기 위해 본 논문에서는 통계적 채널 상태 정보만을 활용한 에너지 빔포밍 기법 두 가지를 다음과 같이 제안하고자 한다.

Rician 페이딩 채널 환경에서 문제 P1에서 실시간 채널 상태 정보와 관련된 성분인 \mathbf{G}_u 의 기댓값 $E[\mathbf{G}_u]$ 을 아래와 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} E[\mathbf{G}_u] &= E[\mathbf{h}_u \mathbf{h}_u^H] \\ &= \frac{K_u}{K_u + 1} \mathbf{a}_u \mathbf{a}_u^H + \frac{1}{K_u + 1} \mathbf{I}_M \\ &= \overline{\mathbf{G}}_u \end{aligned} \tag{2}$$

위 식에서 알 수 있듯이 각 사용자의 통계적 채널 상태 정보 $\overline{\mathbf{G}}_u$ 는 각 사용자의 결정론적 LoS 성분 \mathbf{a}_u 와 Rician factor K_u 로만 구성됨을 알 수 있다. 채널 통계 정보만 주어졌을 때 사용자들이 요구하는 에너지량 Q_u 를 고려하여 전체 충전 시간을 최소화하는 최적의 에너지 빔포밍은 아래의 문제를 해결함으로써 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} P2 : \text{minimize} \quad & \max_{\mathbf{S}_1^{Prop}} (\overline{\tau}_1, \dots, \overline{\tau}_U) \\ \text{subject to} \quad & \overline{\tau}_u = Q_u / \text{Tr}(\overline{\mathbf{G}}_u \mathbf{S}_1^{Prop}), \forall u \in \mathcal{U}, \\ & \text{Tr}(\mathbf{S}_1^{Prop}) \leq P, \mathbf{S}_1^{Prop} \in \mathbb{H}^+ \end{aligned}$$

문제 P1과 마찬가지로 문제 P2의 최적의 해는 SDP solver를 통해 얻을 수 있다.

한편, SDP solver를 통해 P2문제를 해결함으로써 충전 시간 감소를 위한 통계적 채널 상태 정보 기반의

최적의 에너지 빔포밍을 얻을 수 있지만, SDP solver는 $O((\max(U+1, M)^4 \sqrt{M} \log(1/\epsilon)))$ (ϵ : 정확도)의 계산 복잡도를 갖는다²⁾. 따라서, 사용자 수가 많은 massive IoT 환경에서는 복잡도가 더 크게 증가한다.

이를 극복하기 위해, 계산 복잡도를 줄일 수 있는 closed-form 형식의 에너지 빔포밍을 다음과 같이 추가적으로 제시한다. 단일 사용자만 고려했을 경우, 충전 시간을 최소화하는 빔포밍은 maximum ratio transmission (MRT) 이며, 이는 $\bar{\mathbf{G}}_u$ 의 최대 고유값에 해당하는 고유벡터이다. $\tilde{\mathbf{a}}_u = \mathbf{a}_u / \|\mathbf{a}_u\|$, \mathbf{A}_u^\perp 를 $\tilde{\mathbf{a}}_u$ 의 null-space를 형성하는 orthonormal basis로 정의하면, 식 (2)에서 $\bar{\mathbf{G}}_u$ 는 아래와 같다.

$$\bar{\mathbf{G}}_u = \frac{K_u}{K_u+1} \mathbf{a}_u \mathbf{a}_u^H + \frac{1}{K_u+1} [\tilde{\mathbf{a}}_u, \mathbf{A}_u^\perp] [\tilde{\mathbf{a}}_u, \mathbf{A}_u^\perp]^H$$

따라서, $\bar{\mathbf{G}}_u$ 의 최대 고유값은 $\frac{K_u M + 1}{K_u + 1}$ 이며 이에 해당하는 고유벡터는 $\tilde{\mathbf{a}}_u$ 이다. 또한, 이때 사용자의 충전 시간은 $\frac{Q_u (K_u + 1)}{(K_u M + 1)}$ 이 된다. 이를 기반으로 모든 사용자들의 최대 고유값에 해당하는 고유벡터들로 구성된 weighted MRT 에너지 빔포밍을 아래와 같이 제안한다.

$$\bar{\mathbf{S}}^{Weight} = \sum_{u=1}^U \frac{Q_u (K_u + 1)}{(K_u M + 1)} \tilde{\mathbf{a}}_u \tilde{\mathbf{a}}_u^H \quad (3)$$

위 식에서 모든 사용자의 공평성을 고려함으로써 전체 충전 시간을 줄이기 위해 각 사용자의 weight를 $\frac{Q_u (K_u + 1)}{(K_u M + 1)}$ 로 고려하였다. 결과적으로, 송신 전력 P 를 만족하는 weighted MRT 에너지 빔포밍은 아래와 같다.

$$\mathbf{S}_2^{Prop} = \frac{P \bar{\mathbf{S}}^{Weight}}{\text{Tr}(\bar{\mathbf{S}}^{Weight})} \quad (4)$$

IV. 모의실험 및 결론

모의실험에서는 4개의 안테나를 갖는 에너지 송신기가 단일 수신 안테나를 갖는 사용자들에게 에너지를 전송하는 시스템을 고려하였다. 송신 전력은 1 W

($P=1$)로 설정하였으며, Rician factor의 변화에 따라 각 기법에 대한 평균 전체 충전 시간 (Average overall charging time) 성능을 분석하였다. 평균 전체 충전 시간은 large-scale 성분 (LoS 성분, Rician factor, 요구하는 에너지량 Q)과 small-scale 성분 (랜덤한 NLoS 성분)의 변화에 따라 평균을 계산함으로써 아래와 같이 정의하였다.

$$\begin{aligned} \tau^{Average} &= \frac{1}{N^{Large}} \sum_{i=1}^{N^{Large}} \frac{1}{N^{Small}} \sum_{j=1}^{N^{Small}} \tau_{\max}^{(i,j)}(K_u^i, \mathbf{a}_u^i, Q_u^i, \mathbf{h}_u^{(i,j)}) \\ &, \forall u \in \mathbf{U} \\ \tau_{\max}^{(i,j)}(K_u^i, \mathbf{a}_u^i, Q_u^i, \mathbf{h}_u^{(i,j)}) &= \max(\tau_1^{(i,j)}, \dots, \tau_U^{(i,j)}), \\ \tau_u^{(i,j)} &= \frac{Q_u^i}{\text{Tr}(\mathbf{G}_u^{(i,j)} \mathbf{S})}, \quad \mathbf{G}_u^{(i,j)} = \mathbf{h}_u^{(i,j)} (\mathbf{h}_u^{(i,j)})^H, \\ \mathbf{h}_u^{(i,j)} &= \sqrt{\frac{K_u^i}{K_u^i+1}} \mathbf{a}_u^i + \sqrt{\frac{1}{K_u^i+1}} \mathbf{h}_u^{NLoS(i,j)} \end{aligned}$$

모의실험에서는 균등 선형 안테나 (Uniform linear array)을 고려하였으며, Rician 채널의 LoS 성분을 구성하기 위해 각 사용자의 방위각을 각각 $[-\pi/2, \pi/2]$ 의 범위에서 랜덤 (균일 분포)하게 설정해주었다^{4,5)}. 또한, 에너지 요구량을 [10, 100]J 범위에서 랜덤 (균일 분포)하게 설정하였다.

성능 평가를 위한 기법들로 i) 문제 P1으로부터 얻은 전체 충전 시간을 최소화하는 실시간 채널 상태 정보 기반의 에너지 빔포밍 (Instant. CSI based EB)²⁾, ii) 시간-분할 에너지 빔포밍 (CS.based Time-Division EB), iii) 사용자들이 요구하는 에너지량을 고려하지 않은 채널 통계 기반의 max-min 에너지 빔포밍 (CS. based max-min EB)¹⁾, iv) 문제 P2로부터 얻는 본 논문에서 제안하는 채널 통계의 에너지 빔포밍 #1, v) 수식 (4)로부터 얻는 본 논문에서 제안하는 채널 통계의 에너지 빔포밍 #2이 고려되었다. 시간-분할 에너지 빔포밍은 각 사용자에게 할당된 시간 동안에 다른 사용자들은 에너지를 전달받지 않는다고 가정한다. 따라서, 전체 충전 시간은 $\tau^{TD} = \sum_{u=1}^U Q_u / \text{Tr}(\mathbf{G}_u \mathbf{S}_u^{TD})$ 이다. 이때, 각 사용자의 충전 시간을 최소화할 수 있는 에너지 빔포밍은 MRT이므로, $\mathbf{S}_u^{TD} = P \tilde{\mathbf{a}}_u \tilde{\mathbf{a}}_u^H$ 이다.

그림 1과 2는 사용자 수가 각각 4명과 8명일 때 Rician factor에 따른 평균 전체 충전 시간을 보여준다. 채널 통계만을 활용한 빔포밍 중 Rician factor가 5~10

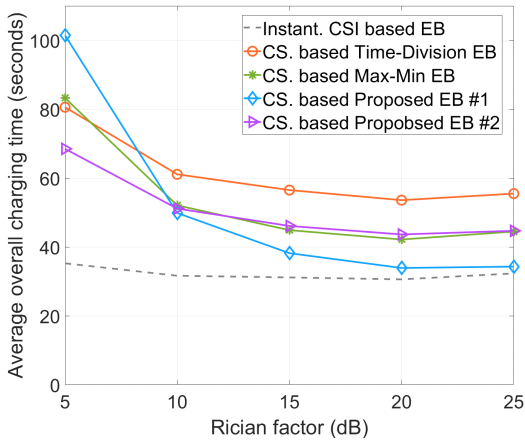


그림 1. 4명의 사용자 일 때 평균 전체 충전 시간
Fig. 1. Average overall charging time with 4 users

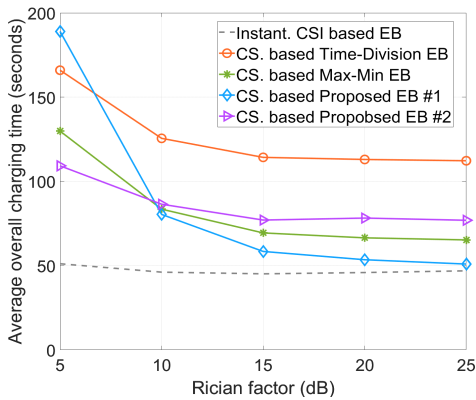


그림 2. 8명의 사용자 일 때 평균 전체 충전 시간
Fig. 2. Average overall charging time with 8 users

dB 영역에서는 본 논문에서 제안한 수식 (4)로부터 얻는 에너지 빔포밍이 전체 충전 시간 측면에서 가장 우수함을 확인할 수 있다. 반면, Rician factor가 10~25 dB 영역에서는 본 논문에서 제안한 문제 P2로부터 에너지 빔포밍이 가장 우수한 성능을 달성함을 확인할 수 있다. 또한, Rician factor가 증가할수록 실시간 채널 상태 기반의 에너지 빔포밍에 근접한 성능을 달성함을 알 수 있다.

본 논문에서는 Rician 페이딩 채널에서 채널 통계인 LoS 성분과 Rician factor만을 활용하여 전체 충전 시간을 줄일 수 있는 에너지 빔포밍 기법을 제안하였다. 사용자들의 에너지 요구량을 고려하지 않는 기존 기법보다 우수한 성능을 달성함을 확인하였으며, Rician factor가 증가할수록 실시간 채널 상태 기반 에너지 빔포밍에 근접한 성능을 달성함을 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 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>)
- [5] J. Kang and W. Choi, "Adaptive feedback for rician fading channel in cooperative massive MIMO systems with limited feedback environment," *J. KICS*, vol. 46, no. 10, pp. 1563-1571, Oct. 2021. (<https://doi.org/10.7840/kics.2021.46.10.1563>)