

비선형 에너지 하베스터 인지 다중안테나 무선충전통신

루이지 칸토스*, 김 윤 희^o

Multi-Antenna Wireless Powered Communications with Non-Linear Energy Harvesters

Cantos Sanchez Luigi Renato*,
Yun Hee Kim^o

요 약

본 논문은 다중 디바이스 다중안테나 무선충전통신에서 공정성을 최대화 하는 빔포밍 및 시간할당 최적화를 고려한다. 최적화 시 실제적인 에너지 하베스터의 비선형성을 구간별 비선형 함수를 모델링하여 해를 구하고, 이를 활용하여 기존의 이상적인 에너지 하베스팅 환경 대비 실제적인 에너지 하베스팅 환경에서 얻을 수 있는 최적 성능을 살펴본다.

Key Words : Beamforming, energy harvesting, multiple antennas, non-linearity, wireless powered communication

ABSTRACT

This paper considers beamforming and time optimization for multi-device multi-antenna wireless powered communication toward maximum fairness. A non-linear property of an energy harvester (EH) is modeled by a piecewise linear model in the optimization problem. The solutions reveal the performance gap between the systems optimized with a practical nonlinear EH and an ideal linear EH.

I. 서 론

최근 크기와 배터리 용량에 대한 제한 없이 사물인터넷 통신이 가능하게 하는 무선충전통신 기법이 활발하게 연구되고 있다.^[1-3] 무선충전통신은 디바이스가 무선 신호로부터 에너지를 하베스팅하여 정보를 전송하는 방법으로, 데이터 수집을 위해 보통 하향링크 무선전력전송과 상향링크 무선정보전송으로 이루어진다. 무선충전통신은 전력과 정보 전송 방향이 서로 다르다는 점에서 같은 방향으로 전송하는 동시무선정보 전력전송과는 차별이 있다.

무선충전통신에 대한 많은 연구들은 대부분 에너지 하베스터가 (EH) 선형 특성을 지닌다고 가정하였다.^[1,2] 그러나 기존 연구 결과를 실제 성능과 비교하면 비선형 특성을 보이는 EH로 인해 성능 차이가 발생한다. 이에 실제적인 EH 모형을 반영한 연구가 발표되고 있으나 주로 무선정보전력동시전송 방식에서 연구되었고, 다중안테나 무선충전통신에 대해서는 디바이스가 하나일 때 에너지 빔포밍의 비선형 EH 성능을 분석한 연구외^[3], 다중 디바이스를 시분할다중접속으로 지원할 때 합 전송률과 최소 전송률을 최대화 하는 빔포밍 및 자원할당 방식만이 연구되었다.^[4]

본 논문에서는 최적화가 어려운 공간분할다중접속 기반 다중안테나 무선충전통신에서 비선형 EH를 고려한 공정성을 최대화 하는 빔포밍과 시간할당 방법을 제안한다.

II. 시스템 모형

그림 1(a)와 같이 안테나 수가 M 인 HAP (hybrid access point)와 안테나 수가 하나인 K 디바이스 $\{D_k\}_{k=1}^K$ 로 구성된 무선충전통신 시스템을 고려한다. HAP과 D_k 사이의 채널은 가역성을 띠고 벡터 $\mathbf{h}_k \sim CN(\mathbf{0}, \omega_k \mathbf{I}_M)$ 으로 모델링한다. 여기서 $CN(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma})$ 은 평균이 $\boldsymbol{\mu}$ 이고 공분산행렬이 $\boldsymbol{\Sigma}$ 인 복소정규 분포를 뜻한다. 정보 수집을 위한 무선충전통신은 그림 1(b)와 같이 시간 비율이 τ 과 $1-\tau$ 로 ($0 < \tau < 1$) 서로 다른 무선전력전송과 (WPT) 무선정보전송의 (WIT) 두 단계로 이루어진다.

* 이 논문은 2018년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임 (No. NRF-2018R1D1A1B07045515).

^o First Author : (ORCID:0000-0001-5954-1061)Kyung Hee University, Department of Electronic Engineering, lrcantos@khu.ac.kr, 학생회원

^o Corresponding Author : (ORCID:0000-0003-1013-7046)Kyung Hee University, Department of Electronic Engineering, yheekim@khu.ac.kr, 종신회원

논문번호 : 201811-361-A-LU, Received November 12, 2018; Revised November 26, 2018; Accepted November 26, 2018

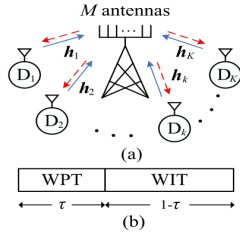


그림 1. 다중안테나 무선충전통신: (a)시스템 모형 (b) 프로토콜.
 Fig. 1. Multi-antenna wireless powered communication: (a) System model (b) Protocol.

WPT 단계에서 HAP은 송신 전력 P_T 를 에너지 빔포밍 벡터 $\mathbf{w} \in C^M$ 로 모든 디바이스에 동시에 전송한다. 이 때 D_k 가 하베스팅한 에너지는

$$E_k = \tau \Phi_k(|\mathbf{h}_k^T \mathbf{w}|^2) \quad (1)$$

이고, $\Phi_k(x)$ 는 입력 전력이 x 일 때 D_k 의 EH 출력 함수이다. 구간별 선형모형을^[3] 적용하면

$$\Phi_k(x) = \min(\eta_k[x - P_{o,k}]_+, P_{\max,k}) \quad (2)$$

이고, $\eta_k, P_{\max,k}, P_{o,k}$ 는 D_k 의 EH 회로의 효율, 서 η 는 에너지 수확 효율이다.

WIT 단계에서는 각 디바이스 D_k 가 송신 전력 $p_k = E_k/(1-\tau)$ 로 정보 심볼 x_k 를 동시에 전송한다. 이에 따른 길이가 M 인 HAP 수신 벡터는

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{P}^{1/2}\mathbf{x} + \mathbf{n} \quad (3)$$

이다. 여기서 $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_K]^T$ 는 송신 심볼 벡터, $\mathbf{P} = \text{diag}(p_1, p_2, \dots, p_K)$ 는 대각원소가 송신전력인 대각행렬, $\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2, \dots, \mathbf{h}_K]$ 는 다중 디바이스 채널행렬, $\mathbf{n} \sim CN(0, \sigma^2 \mathbf{I}_M)$ 은 분산이 σ^2 인 잡음 벡터이다. HAP은 수신 신호 (3)에 ZF (zero-forcing) 빔포밍 행렬 $\mathbf{B}^H = (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H$ 를 적용하여 정보 심볼벡터 $\hat{\mathbf{x}}$ 을 복호한다. 심볼 x_k 를 복호할 때 수신 신호대잡음비는

$$\gamma_k = \frac{p_k}{\sigma^2 [\mathbf{B}^H \mathbf{B}]_{k,k}} = \lambda_k \Phi_k(|\mathbf{h}_k^T \mathbf{w}|^2) \frac{\tau}{1-\tau}. \quad (4)$$

이고, 여기서 $1/\lambda_k = \sigma^2 [\mathbf{B}^H \mathbf{B}]_{k,k} = \sigma^2 [(\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1}]_{k,k}$ 이고 $[\cdot]_{k,k}$ 는 행렬의 (k, k) 째 원소이다.

이를 통해 D_k 가 전달 가능한 정보 전송률은

$$R_k(\mathbf{w}, \tau) = (1-\tau) \log_2 \left(1 + \frac{\tau}{1-\tau} \tilde{\gamma}_k(\mathbf{w}) \right) \quad (5)$$

이며, 여기서 $\tilde{\gamma}_k(\mathbf{w}) = \lambda_k \Phi_k(|\mathbf{h}_k^T \mathbf{w}|^2)$ 이다.

III. 비선형 에너지 하베스터 인지 에너지 빔포밍

본 논문은 모든 디바이스에 공정성을 최대로 보장하도록 시스템 내 최소 전송률을 최대로 하는 에너지 빔포밍 \mathbf{w} 와 시간할당 τ 를 최적화하는 문제

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{w}, \tau} \{ & \min_{1 \leq k \leq K} R_k(\mathbf{w}, \tau) \} \\ \text{s.t. } & 0 < \tau < 1, \|\mathbf{w}\|^2 \leq P_T \end{aligned} \quad (6)$$

를 고려한다. 이 문제는 시간할당 τ 를 고정하면 다음 \mathbf{w} 를 최적화하고, 이 최적 해 $\mathbf{w}^\dagger(\tau)$ 를 써서 시간할당 τ 를 최적화하는 두 단계 방법으로 풀 수 있다.

첫 단계의 τ 를 고정하고 $R_k(\mathbf{w}, \tau)$ 의 최솟값을 최적화하는 에너지 빔포밍 문제는 식 (5)에 의해

$$\max_{\mathbf{w}: \|\mathbf{w}\|^2 \leq P_T} \left\{ \min_{1 \leq k \leq K} \lambda_k \Phi_k(|\mathbf{h}_k^T \mathbf{w}|^2) \right\} \quad (7)$$

와 동등하다. 식 (7)은 시간할당과 무관하므로 최적해는 $\mathbf{w}^\dagger = \mathbf{w}^\dagger(\tau)$ 와 같이 시간할당과 무관하며, 최적 값 $\tilde{\gamma}^\dagger = \min_{1 \leq k \leq K} \tilde{\gamma}_k(\mathbf{w}^\dagger)$ 을 제공한다. 이를 이용한 두 번째 시간할당 문제는 다음과 같다.

$$\max_{0 < \tau < 1} (1-\tau) \log_2 \left(1 + \frac{\tau}{1-\tau} \tilde{\gamma}^\dagger \right). \quad (8)$$

식 (8)은 볼록 (convex) 최적화 문제이므로 기존의 최적화 프로그램으로 쉽게 풀 수 있다. 반면 에너지 빔포밍 문제 (7)의 해를 얻는 방법은 쉽지 않으므로 다음의 방법을 제안한다.

식 (7)에서 비선형 함수 Φ_k 는 감소하지 않는 함수이므로 $\Phi_k(|\mathbf{h}_k^T \mathbf{w}|^2)$ 를 크게 하려면 $|\mathbf{h}_k^T \mathbf{w}|^2$ 를 크게 해야 한다. 이렇게 여러 디바이스에 대해 $|\mathbf{h}_k^T \mathbf{w}|^2$ 를 최대로 하려면 에너지 빔포밍 벡터 \mathbf{w} 는 채널행렬 $\mathbf{H}^* = [\mathbf{h}_1^*, \mathbf{h}_2^*, \dots, \mathbf{h}_K^*]$ 의 열 공간에 존재해야 한다. 이에 에너지 빔포밍 벡터를 $r = \text{rank}(\mathbf{H})$ 개의 열 공간 기저 벡터의 선형 결합으로 나타내면, \mathbf{w} 대신 선형 결합 가

중 벡터 $\mathbf{a} \in \mathcal{C}^r$ 를 최적화하면 된다. 즉, $\mathbf{w} = \mathbf{U}_r^* \mathbf{a}$ 이고 \mathbf{U}_r 는 크기가 $M \times r$ 로 \mathbf{H} 의 고윳값 분해 $\mathbf{H} = \mathbf{U}\Sigma\mathbf{V}^H$ 의 왼쪽 행렬에서 0이 아닌 고윳값에 곱해지는 열벡터로 구성된다. 식 (7)을 $\mathbf{a} \in \mathcal{C}^r$ 를 최적화하는 문제로 다시 쓰면 $\mathbf{U}_r^H \mathbf{U}_r = \mathbf{I}_r$ 에 의해

$$\max_{\mathbf{a}} \|\mathbf{a}\|^2 \leq P_T \left\{ \min_{1 \leq k \leq K} \lambda_k \Phi_k(\tilde{\mathbf{h}}_k^T \mathbf{a}^2) \right\} \quad (9)$$

이고, 여기서 $\tilde{\mathbf{h}}_k^T = \mathbf{h}_k^T \mathbf{U}_r^T$ 이다. 식 (9)는 새로운 변수 $t > 0$ 를 도입하고 식 (2)를 대입하면 다음의 등가 문제로 다시 변환된다.

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{a}, t} & t \\ \text{s.t.} & \lambda_k \eta_k |\tilde{\mathbf{h}}_k^T \mathbf{a}^2| \geq t + \eta_k P_{o,k}, \forall k \\ & \lambda_k P_{\max,k} \geq t, \forall k \\ & \|\mathbf{a}\|^2 \leq P_T \end{aligned} \quad (10)$$

식 (10)은 $\lambda_k \eta_k |\tilde{\mathbf{h}}_k^T \mathbf{a}^2| \geq t + \eta_k P_{o,k}$ 에 의해 블록 최적화 문제가 아니므로 $K \times K$ 행렬 $\mathbf{A} = \mathbf{a}\mathbf{a}^H$ 를 정의하여

$$\begin{aligned} \max_{\mathbf{A}, t} & t \\ \text{s.t.} & \lambda_k \eta_k \text{tr}(\mathbf{A} \tilde{\mathbf{h}}_k \tilde{\mathbf{h}}_k^T) \geq t + \eta_k P_{o,k}, \lambda_k P_{\max,k} \geq t, \forall k \\ & \text{tr}(\mathbf{A}) \leq P_T, \text{rank}(\mathbf{A}) = 1 \end{aligned} \quad (11)$$

으로 변형한다. 여기서 $\text{rank}(\mathbf{A}) = 1$ 을 제외한 모든 제한 식은 변수 (\mathbf{A}, t) 에 대해 선형이므로 제한 식은 모두 볼록이다. 이에 문제 (11)은 SDR (semidefinite relaxation) 방법으로 풀 수 있다.

IV. 성능 결과 및 결론

본 논문에서는 $\eta_k = 0.2$, $P_{\max,k} = 9.08 \mu\text{W}$, $P_{o,k} = 1 \mu\text{W}$ 인 비선형 에너지 하베스터를¹⁵⁾ 사용하고 디바이스 수가 $K=4$ 인 무선충전통신 시스템의 성능을 평가하였다. HAP 송신 전력과 잡음 전력은 각각 $P_T = 1 \text{ W}$, $\sigma^2 = -110 \text{ dBm}$, 거리 d_k 에서 경로손실은 $\omega_k = 0.001 d_k^{2.5}$ 이다.

그림 2는 거리 $d_k = 7.5 \text{ m}$ 또는 15 m 에서 안테나 수(M)에 따른, 그림 3은 안테나 수가 $M=8$ 일 때 거리에 d_k 에 따른 최대-최소 전송률 성능을 보인 것이다. 그림에서 비선형 (선형) EH에서의 최적 해를 비선형 EH에 적용한 ‘Linear/Linear’와 (‘Linear/Nonlinear’), 선형 (비선형) EH에서의 최적 해를 선형

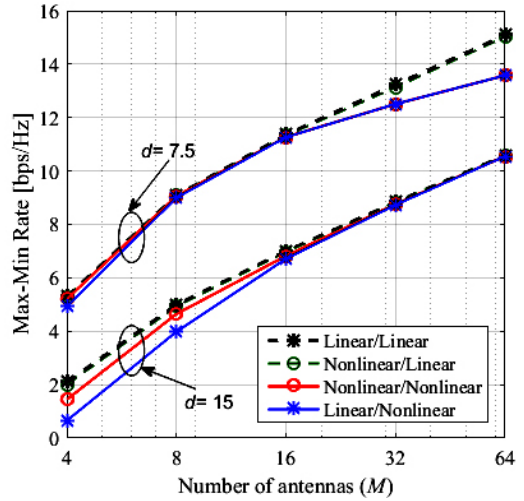


그림 2. 디바이스 수가 $K=4$ 일 때 고정 거리에서 안테나 수 M 에 따른 최대-최소 전송률.
Fig. 2. Max-min rate of $K=4$ devices at the fixed distance as M varies.

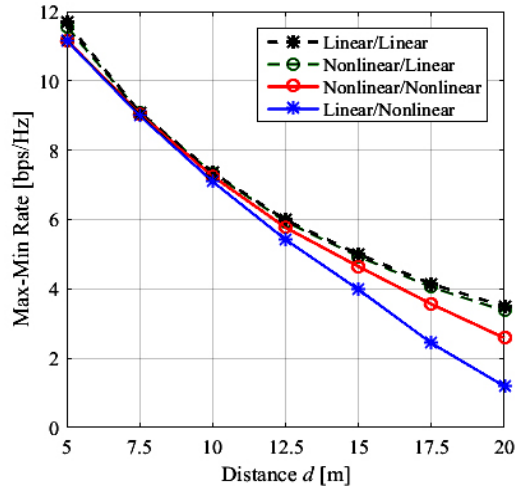


그림 3. 안테나 수가 $M=8$ 이고 디바이스 수가 $K=4$ 일 때 거리 $d_k = d$ 에 따른 최대-최소 전송률.
Fig. 3. Max-min rate as $d_k = d$ varies when $M=8$ and $K=4$.

EH에 적용한 ‘Linear/Linear’와 (‘Nonlinear/Linear’) 를 함께 보였다. 실제 EH의 최적 성능은 (‘Nonlinear/Nonlinear’) 이상적인 EH의 최적 성능보다 (‘Linear/Linear’) 비선형성이 나타나는 구간에서 (안테나 수가 크고 거리가 가까운 경우 또는 안테나 수가 적고 거리가 먼 경우) 성능이 나빠진다. 비선형 EH에서의 최적 해를 선형 EH로 적용하면 성능 저하가 거의 없으나, 선형 EH에서의 최적 해를 비선형 EH에 적용하면 수신 전력이 낮을 때 성능 차이가 커진다. 그러므로 EH

의 비선형성 모형을 반영하여 시스템을 최적화하여야 한다.

References

- [1] D. Niyato, et al., "Wireless powered communication networks: research directions and technological approaches," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 24, no. 6, pp. 88-97, Dec. 2017.
- [2] G. Sacarello and Y. H. Kim, "Resource allocation for wirelessly powered multi-way massive antenna relaying," *J. Korean Inst. Commun. Soc.*, vol. 43, no. 4, pp. 681-684, Apr. 2018.
- [3] R. Morsi, et al., "On the performance of wireless powered communication with non-linear energy harvesting," *IEEE SPAWC*, Jul. 2017.
- [4] E. Boshkovska, et al., "Robust resource allocation for MIMO wireless powered communication networks based on a non-linear EH model," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 65, no. 5, pp. 1984-1999, May 2017.
- [5] M. Stoopman, et al., "A self-calibrating RF energy harvester generating 1V at -26.3 dBm," in *Symp. VLSI Circuits*, pp. C226-C227, Jun. 2013.