

무선 충전 다방향 거대 안테나 릴레이 전송을 위한 자원 할당

사카레로 헤라르도*, 김 윤 희°

Resource Allocation for Wirelessly Powered Multi-Way Massive Antenna Relaying

Gerardo Scarello*, Yun Hee Kim°

요 약

본 논문은 디바이스 무선충전과 디바이스 정보 공유를 지원하는 메시브 안테나 릴레이 시스템과 무선 충전 다방향 릴레이 프로토콜을 고려한다. 디바이스 정보를 공정하게 공유하기 위한 자원 할당 문제를 수립하고, 최적해와 복잡도를 낮춘 준최적 해를 제안하여 성능을 비교한다. 안테나 수가 증가하면 준최적 해의 성능이 최적 해와 비슷해지므로 준최적 해를 적용하여 복잡도를 낮출 수 있다.

Key Words : Energy harvesting, massive antennas, multi-way relaying, resource allocation

ABSTRACT

This paper considers a massive antenna relay system and a wirelessly powered multi-way relaying protocol to power devices remotely and to share their information. For a resource allocation problem to share the information with fairness, we provide the optimal solution and suboptimal solutions with low complexity. The results show that the performance with suboptimal solutions get close to that with the optimal solution as the number of antennas increases.

I. 서 론

최근 사물인터넷 서비스가 증가하면서 배터리 없는 통신을 가능하게 하기 위해 무선으로 에너지를 하베스팅하여 통신을 수행하도록 하는 연구가 활발히 진행되고 있다^[1]. 이 때 메시브 안테나와 릴레이를 도입하여 정보와 에너지 전송 효율을 높이고 전송 거리를 넓힐 수 있음을 보였^[2].

한편 최근에 들어 디바이스 정보를 중앙 장치에서 모두 수집하는 대신 분산 처리를 위해 디바이스들이 정보를 공유할 필요성이 대두되면서 다방향 릴레이 프로토콜에 관심이 증가하고 있다^[3]. 다방향 릴레이 프로토콜은 릴레이가 다중접속을 받은 디바이스 정보들을 방송 단계에서 서로 다른 디바이스로 전송하여 정보를 공유하도록 하는데, 메시브 안테나 다방향 릴레이 프로토콜에 무선 에너지 전송을 접목한 연구가 이미 진행되었으나^[4], 디바이스가 아닌 메시브 안테나 릴레이가 에너지를 수확하고 동일한 전력과 시간 할당을 고려하였다.

본 논문에서는 기존 연구와^[4] 다르게 메시브 안테나 릴레이로부터 디바이스가 에너지를 수확하는 다방향 릴레이 시스템을 고려하고, 기존의 빔포밍 기법을 적용하지만 공정성을 고려하는 전력과 시간할당의 최적화 방법을 제안한다.

II. 시스템 모형

본 논문에서는 그림 1(a)와 같이 M 안테나 릴레이와 K 디바이스로 구성된 다방향 릴레이 시스템을 고려한다. 릴레이와 디바이스 D_k 사이의 채널은 $h_k \sim CN(\mathbf{0}, \omega_k \mathbf{I}_M)$ 이며, 여기서 $CN(\boldsymbol{\mu}, \boldsymbol{\Sigma})$ 은 평균이 $\boldsymbol{\mu}$ 이고 공분산행렬이 $\boldsymbol{\Sigma}$ 인 복소정규분포를 가리킨다. 디바이스 충전과 정보 공유를 위한 무선충전 다방향 릴레이 프로토콜은 그림 1(b)와 같이 길이가 $\{\tau_i\}_{i=0}^K$ 인 총 $K+1$ 시간슬롯으로 구성된다. 슬롯 0은 무선전력전송 (WPT), 슬롯 1은 다중접속 (MAC), 나머지 $K-1$ 슬롯은 모든 심볼을 디바이스에게 순환 전송하는 방송 (BC) 단계로 전송 특성에 의해 시간을

* 이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No.NRF-2015R1A2A2A01005390).

• First Author : (ORCID:0000-0002-7210-5413) Kyung Hee University, Department of Electronic Engineering, gsacarello@khu.ac.kr, 학생회원

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

논문번호 : KICS2018-03-068, Received May 26, 2018; Revised April 9, 2018; Accepted April 9, 2018

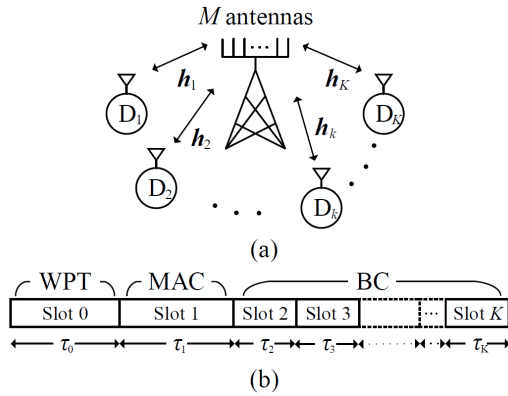


그림 1. 무선충전 다방향 릴레이 시스템: (a)시스템 모형 (b) 프로토콜.
 Fig. 1. Wireless powered multi-way relaying system: (a) System model (b) Protocol.

$\tau_2 = \tau_3 = \dots = \tau_K$ 으로 같게 둔다.

WPT 슬롯에서는 릴레이가 정합 에너지 빔포밍 벡터 $\mathbf{w} = \sum_{k=1}^K \xi_k \mathbf{h}_k^* / \|\mathbf{h}_k^*\|$ 으로 송신전력 P_H 를 전송한다 [2]. 여기서 ξ_k 는 음이 아닌 디바이스에 대한 전력할당인수로 총합이 1이다. 본 논문은 $M \gg K$ 인 메시브 안테나 환경을 고려한다. 이 때 D_k 가 수확한 에너지는 $E_k = \tau_0 \eta P_H M \omega_k \xi_k$ 로 쓸 수 있고 여기서 η 는 에너지 수확 효율이다.

MAC 슬롯에서 각 D_k 는 송신전력 $P_k = E_k / \tau_1$ 로 심볼 x_k 를 동시에 전송한다. 릴레이 수신 신호는

$$\mathbf{y}_1 = \mathbf{H} \mathbf{P}_D^{1/2} \mathbf{x} + \mathbf{n}_1 \quad (1)$$

이며, $\mathbf{x} = [x_1, x_2, \dots, x_K]^T$, $\mathbf{P}_D = \text{diag}(P_1, P_2, \dots, P_K)$, $\mathbf{H} = [\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2, \dots, \mathbf{h}_K] \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \mathbf{\Omega})$ 는 채널 행렬, $\mathbf{n}_1 \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \sigma_{mac}^2 \mathbf{I}_M)$ 은 릴레이 잡음벡터이다. 여기서 $\mathbf{\Omega} = \text{diag}(\omega_1, \omega_2, \dots, \omega_K)$ 는 각 채널의 경로손실로 구성된 대각행렬이다. 수신 신호 (1)에 ZF (zero-forcing) 수신 빔포밍 행렬 $\mathbf{\Phi}_{rx}^H = (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \mathbf{H}^H$ 를 적용하여 심볼을 $\hat{\mathbf{x}}$ 로 복호한다. 복호 시 D_k 가 보낸 심볼의 수신 신호 대잡음비는 다음과 같다.

$$\gamma_{1,k} = \frac{P_k}{\sigma_1^2 [\mathbf{\Phi}_{rx}^H \mathbf{\Phi}_{rx}]_{k,k}} = \frac{P_H}{\sigma_{mac}^2} \frac{\eta M \omega_k \xi_k}{[(\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1}]_{k,k}} \frac{\tau_0}{\tau_1} \quad (2)$$

BC 슬롯 i ($2 \leq i \leq K$)에서 릴레이는 ZF 기반 송신 빔포밍 $\mathbf{\Phi}_{tx} = \mathbf{H}(\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1}$ 으로 복호 심볼 $\hat{\mathbf{x}}$ 의 순

환 $\hat{\mathbf{x}}_i = [\hat{x}_{K+1-i}, \dots, \hat{x}_K, \hat{x}_1, \dots, \hat{x}_{K-i}]^T$ 를 서로 간섭 없이 전송한다. 이 때 각 심볼은 음이 아니고 총 합이 1인 원소로 이루어진 전력할당 $\lambda_i = [\lambda_{i,1}, \lambda_{i,2}, \dots, \lambda_{i,K}]^T$ 으로 전송된다. 이 때 디바이스 수신 신호를 벡터로 나타내면

$$\mathbf{y}_i = \theta_i \sqrt{P_H} \mathbf{H}^T \mathbf{\Phi}_{tx}^* \text{diag}(\lambda_i)^{1/2} \hat{\mathbf{x}}_i + \mathbf{n}_i \quad (3)$$

으로, $1/\theta_i^2 = \text{tr}(\mathbf{\Phi}_{tx}^* \text{diag}(\lambda_i) \mathbf{\Phi}_{tx}^T)$ 는 송신 전력을 P_H 로 맞추는 인자, $\mathbf{n}_i \sim \mathcal{CN}(\mathbf{0}, \sigma_{bc}^2 \mathbf{I}_K)$ 는 디바이스에서의 잡음 벡터로, $\text{tr}()$ 는 대각합이다. 곧 BC 슬롯 i ($2 \leq i \leq K$)에서 x_k 심볼은 $D_{\text{mod}(i+k-1, K)}$ 로 전송되며 해당 수신 신호대잡음비는 다음과 같다.

$$\gamma_{i, \text{mod}(i+k-1, K)} = \frac{P_H \lambda_{i, \text{mod}(i+k-1, K)}}{\sigma_{bc}^2 \text{tr}\{\text{diag}(\lambda_i) (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1}\}} \quad (4)$$

이와 같이 D_k 의 심볼 x_k 는 모든 디바이스로 전송되며, 이 때 모든 디바이스가 수신 가능한 공통 전송률은 $R_{\min, k} = \min_{1 \leq i \leq K} R_{i, \text{mod}(i+k-1, K)}$ 이다. 모든 심볼에 대한 전송 가능 전송률은

$$R_{\min} = \min_{1 \leq k \leq K} R_{\min, k} = \min_{1 \leq k, i \leq K} R_{i, k} \quad (5)$$

으로, 여기서 $R_{i, k} = \tau_i \log_2(1 + \gamma_{i, k})$ 이다.

III. 공정성 기반 전력 및 시간 할당

논문은 모든 디바이스 정보 공유에 공정성을 제공하는 다음의 전력 (ξ, λ_i)과 시간 $\tau = [\tau_0, \tau_1, \tau_2]$ ($\tau_2 = \tau_3 = \dots = \tau_K$) 할당 문제를 고려한다.

$$\begin{aligned} & \max_{\xi, \lambda_i, \tau} \{ \min_{1 \leq k, i \leq K} R_{i, k} \} \\ & \text{s.t. } \tau_0 + \tau_1 + (K-1)\tau_2 = 1, \tau_i \geq 0, i = 0, 1, 2, \\ & \sum_{k=1}^K \xi_k = 1, \sum_{k=1}^K \lambda_{i, k} = 1, \{\xi_k \geq 0\}_{k=1}^K, \{\lambda_{i, k} \geq 0\}_{i, k=1}^K \end{aligned} \quad (6)$$

시간 τ 를 고정하면 최적전력할당은 각 슬롯에서의 전력할당 문제로 분리된다. MAC 슬롯의 최적 전력할당은 식 (2)에서 $\gamma_{1,1} = \gamma_{1,2} = \dots = \gamma_{1,K}$ 를 만드는

$$\xi_k^* = \frac{[(\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1}]_{k,k}}{\omega_k \text{tr}[\mathbf{\Omega}^{-1} (\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1}]} \quad (7)$$

이며, BC 슬롯 i ($2 \leq i \leq K$)에서의 최적전력할당은 식 (3)으로부터 $\lambda_{i,k}^* = 1/K$, $k=1,2,\dots,K$ 이다. 최적전력할당을 적용할 때 MAC과 BC 슬롯 최적 신호대잡음비는 $\tilde{\gamma}_{1,k}^* = \gamma_{mac} \tau_o / \tau_1$ 와 $\tilde{\gamma}_{i,l}^* = \gamma_{bc}$ 이고, 여기서

$$\gamma_{mac} = \frac{\eta M}{tr[(\mathbf{\Omega} \mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1}]} \frac{P_H}{\sigma_{mac}^2}, \quad \gamma_{bc} = \frac{P_H}{\sigma_{bc}^2 tr\{(\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1}\}}. \quad (8)$$

최적전력할당을 적용한 시간할당 문제는 $\tau_2 = (1 - \tau_0 - \tau_1)/(K-1)$ 와 변수 t 를 도입하여

$$\begin{aligned} & \max_{\tau_0, \tau_1} t \\ & \text{s.t. } \tau_0 + \tau_1 < 1, \tau_0, \tau_1 > 0 \\ & \tau_1 C(\gamma_{mac} \tau_0 / \tau_1) \geq t, (1 - \tau_0 - \tau_1) C(\gamma_{bc}) / (K-1) \geq t \end{aligned} \quad (9)$$

로 변환할 수 있다. 여기서 $C(x) = \log_2(1+x)$ 는 오목 함수로 $\tau_1 C(\gamma_{mac} \tau_0 / \tau_1)$ 는 또한 오목함수이므로, 식 (9)은 볼록 최적화 문제이며, 상용 최적화 프로그램으로 풀 수 있다. 한편 이 최적 할당 해는 채널 실현이 바뀔 때마다 구하므로 복잡도가 매우 크다.

이에 본 논문에서는 안테나 수가 증가하면 $(\mathbf{H}^H \mathbf{H})^{-1} \rightarrow \frac{1}{M-K} \mathbf{\Omega}^{-1}$ 임을 이용하여^[2], MAC 전력당에 대해 채널 실현에 상관없는 통계적 전력할당

$$\tilde{\xi}_k^* = \omega_k^{-2} / tr[\mathbf{\Omega}^{-2}], \quad \lambda_k^* = 1/K \quad (10)$$

를 적용할 것을 제안한다. 그 때의 신호대잡음비는

$$\tilde{\gamma}_{mac} = \frac{\eta M(M-K)}{tr[\mathbf{\Omega}^{-2}]} \frac{P_H}{\sigma_{mac}^2}, \quad \tilde{\gamma}_{bc} = \frac{P_H(M-K)}{\sigma_{bc}^2 tr[\mathbf{\Omega}^{-1}]} \quad (11)$$

로 근사화할 수 있으므로, 시간할당문제 (8)에서 γ_{mac} 와 γ_{bc} 대신 $\tilde{\gamma}_{mac}$ 와 $\tilde{\gamma}_{bc}$ 를 적용하여 해를 한 번만 구하는 통계적 시간할당 방법을 제안한다.

IV. 성능 결과 및 결론

성능 도출을 위해 $P_H = 1$ W, $\eta = 0.5$, $\sigma_{bc}^2 = \sigma_{mac}^2 = -110$ dB, 거리 d_k 에서의 경로손실은 $\omega_k = 0.001 d_k^{-3}$, $d_k \in \{2, 4, 6, 8\}$ 로 가정하였다.

그림 2는 디바이스 수가 $K=4$ 일 때 안테나 수 M 에 따른 최대-최소 전송률을 보인다. 여기서 OPA와 OTA는 채널 실현마다 최적의 전력/시간할당,

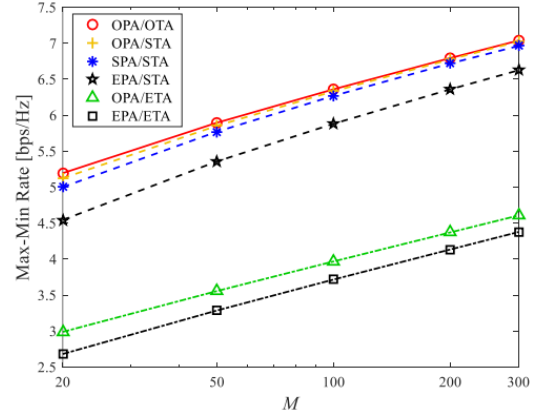


그림 2. $K=4$ 일 때 안테나 수 M 에 따른 최대-최소 전송률. Fig. 2. Max-min rate as M varies when $K=4$.

SPA와 STA는 식 (10)과 (11)를 적용한 통계적 전력/시간할당, EPA와 ETA는 동일 전력/시간할당을 각각 나타낸다. 최적전력할당을 적용하면 통계적 시간할당 (OPA/STA) 성능은 최적시간할당 (OPA/OTA) 성능에 근접하고, 통계적 자원할당을 적용하면 (SPA/STA) 안테나 수가 작을 때 성능 차이가 조금 있으나 안테나 수가 증가함에 따라 최적자원할당 (OPA/OTA) 성능에 근접함을 볼 수 있다.

그림 3은 안테나 수가 $M=100$ 일 때 디바이스 수를 증가시키면서 최대-최소 전송률을 보인다. 디바이스 수가 클 때 SPA/STA 성능 저하가 있지만 OPA/STA와 SPA/STA 성능은 OPA/OTA 성능과 대체로 비슷하다. 이에 최적 기법의 복잡도를 줄이기 위한 방법으로 OPA/STA와 SPA/STA를 적용할 수 있을 것으로 기대된다.

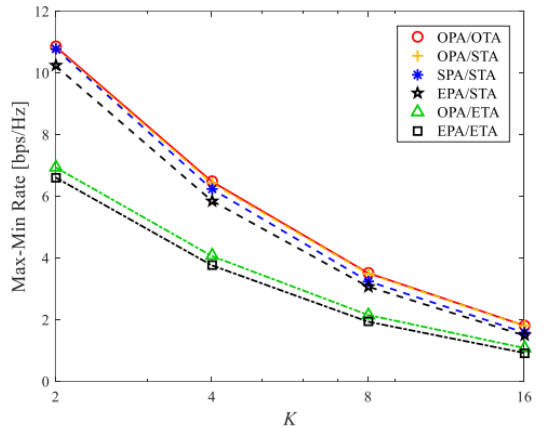


그림 3. $M=100$ 일 때 K 에 따른 최대-최소 전송률. Fig. 3. Max-min rate as K varies when $M=100$.

References

- [1] T. P. Do and Y. H. Kim, "Wireless energy and information transfer for an amplify-and-forward two-way relay network," *J. KICS*, vol. 41, no. 2, pp. 175-177, Feb. 2016.
- [2] G. Sacarello, T. V. Thi Le, and Y. H. Kim, "Resource allocation for wireless powered multi-pair massive antenna relaying with zero forcing beamforming," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 20, no. 11, pp. 2316-2319, Nov. 2016.
- [3] D. P. Kudathanthirige and G. A. A. Baduge, "Multicell multiway massive MIMO relay networks," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 66, no. 8, pp. 6831-6848, Aug. 2017.
- [4] G. Amarasuriya, E. G. Larsson, and H. V. Poor, "Wireless information and power transfer in multiway massive MIMO relay networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 15, no. 6, pp. 3837-3855, Jun. 2016.