

증폭-후-전달 양방향 릴레이에서 무선 에너지 정보 전송을 위한 최적 전력 분할

도 푸 틴*, 김 윤 희^o

Optimal Power Splitting for Wireless Energy and Information Transfer in Amplify-and-Forward Two-Way Relaying

Thinh Phu Do*, Yun Hee Kim^o

요 약

본 레터는 증폭-후-전달 양방향 릴레이 네트워크에서 무선 에너지 정보 동시 전송을 고려한다. 릴레이에서 전력 분할로 에너지 수확과 정보 전송을 수행할 때 아웃티지 확률을 최소화 하는 최적 전력 분할 비를 얻고 그 때의 성능 향상을 모의실험으로 보인다.

Key Words : Energy and information transfer, two-way relay, amplify-and-forward, power splitting

ABSTRACT

This letter considers wireless energy and information transfer for an amplify-and-forward two-way relay network. When the relay harvests the energy and transfers the information signal through power splitting, the optimal power splitting minimizing the outage probability is derived explicitly and its gain is confirmed by simulations.

I. 서 론

위험 지역의 센서 네트워크나 인체 통신과 같이 통신 기기의 배터리를 교체하기 어려운 환경에서 배터

리 수명을 늘리는 방법으로 에너지와 정보를 무선으로 동시에 전달하는 방법이 연구되고 있다^[1-3]. 이러한 무선 에너지 정보 동시 전송 방식은 보통 무선 신호의 시간 분할 또는 전력 분할로 구현할 수 있는데^[4], 구현 방법에 따른 에너지 수확과 정보 전송률에 대한 성능 및 최적화 연구가 다양한 통신 방식으로 확장되고 있다.

무선 에너지 정보 전송 방식과 활발히 결합되고 있는 통신 방식이 릴레이 통신이다.^[2] 긴 통신 거리를 짧은 거리로 나누어 신호를 전송하여 전력 소모를 줄이는 릴레이 통신과 결합하면 배터리 수명을 더욱 늘릴 수 있기 때문이다. 먼저 구조가 간단한 단방향 릴레이와의 결합을 시작으로, 복잡하지만 주파수 효율이 좋은 양방향 릴레이 방식과의 결합 연구가 진행되고 있다. 최근에는 증폭-후-전달 양방향 릴레이에서 전력 분할 기반의 무선 에너지와 정보 동시 전송이 고려되고 그 성능이 분석되었다^[3].

본 레터에서는 [3]에서 고려한 증폭-후-전달 양방향 릴레이 시스템에서 채널상태정보에 따라 릴레이가 전력 분할 비를 바꾸는 것을 제안한다. 이 때 아웃티지 확률을 최소화 하도록 최적의 전력분할 비를 단히 식으로 유도하고, 최적 전력 분할 비로 얻는 성능 이득을 모의실험으로 보인다.

II. 시스템 모형

그림 1(a)는 두 통신 노드 S_1 과 S_2 , 릴레이 노드 Q 로 구성된 양방향 릴레이 네트워크를 보인 것이다. 두 노드 사이의 채널은 평탄하고 가역성을 띤다고 가정하고, S_i 와 Q 사이의 채널 응답을 h_i 로 둔다. 통신 노드 S_1 과 S_2 는 그림 1(b)와 같이 다중접속 (multiple access: MAC) 단계와 방송 (broadcasting: BC) 단계로 데이터를 교환하며, 릴레이는 다중접속 단계에서 수신한 신호를 전력 분할하여 에너지를 수확하고 정보 신호를 수신한다.

다중접속 단계에서 S_i 가 전송률이 R_i 인 심볼 x_i 를 전력 P_i 로 송신한다. 이 때 릴레이 수확 에너지는

$$E_H = \eta\theta(P_1|h_1|^2 + P_2|h_2|^2) \quad (1)$$

이고, 정보를 포함한 수신 신호는 다음과 같다.

$$y_Q = \sqrt{(1-\theta)P_1} h_1 x_1 + \sqrt{(1-\theta)P_2} h_2 x_2 + n_Q. \quad (2)$$

* 본 연구는 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원으로 수행되었습니다 (No. NRF-2015R1A2A2A01005390).

^o First Author : Department of Electronics and Radio Engineering, Kyung Hee University, dopthinh@gmail.com, 정희원

^o Corresponding Author : Department of Electronics and Radio Engineering, Kyung Hee University, yheekim@khu.ac.kr, 중신희원
 논문번호 : KICS2016-01-008, Received January 14, 2016; Revised February 4, 2016; Accepted February 4, 2016

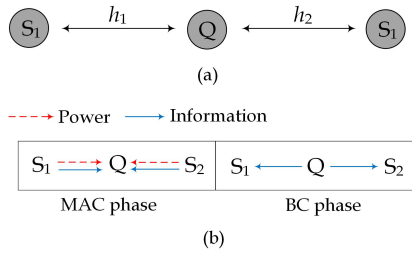


그림 1. (a) 양방향 릴레이 네트워크 (b) 무선 에너지 정보 전송 양방향 릴레이 프로토콜.
Fig. 1 (a) Two-way relay network (b) two-way relay protocol with wireless energy and information transfer.

여기서, θ 는 수신 신호에서 에너지 수확으로의 전력 분할 비, η 는 에너지 수확율, n_Q 는 분산이 σ^2 인 노드 Q에서의 가산 잡음이다. 릴레이 노드는 수확한 에너지를 모두 써서 방송 단계 송신 전력 $P_Q = E_H$ 를 얻고, 송신 전력에 맞춘 증폭 신호 $x_Q = \beta y_Q$ 를 방송 단계에서 전송한다. 여기서 신호 증폭 값은

$$\beta = \sqrt{\frac{P_Q}{(1-\theta)P_1|h_1|^2 + (1-\theta)P_2|h_2|^2 + \sigma^2}} \quad (3)$$

이다. 각 S_j 가 방송 단계 수신 신호 y_{S_j} 로부터 자기간섭을 소거한 뒤의 신호는

$$\tilde{y}_{S_j} = \beta h_j h_i \sqrt{(1-\theta)P_i} x_i + \beta h_j n_Q + n_{S_j} \quad (4)$$

이고, 여기서 n_{S_j} 는 분산이 σ^2 인 노드 S_j 에서의 가산 잡음이고, $(i, j) \in \Omega = \{(1, 2), (2, 1)\}$ 이다.

곧 $S_i \rightarrow Q \rightarrow S_j$ 로 신호 전송에 대한 신호대잡음비는

$$SNR_{i,j} = \frac{\beta^2 |h_1|^2 |h_2|^2 (1-\theta) P_i}{\beta^2 |h_j|^2 \sigma^2 + \sigma^2} = \frac{\theta(1-\theta)}{A_i \theta + B_i} \quad (5)$$

이고, $\gamma_i = P_i |h_i|^2 / \sigma^2$ 를 정의하면 식 (5)에서

$$A_i = \frac{1}{\gamma_i} - \frac{1}{\eta \gamma_i |h_j|^2}, \quad B_i = \frac{1}{\eta \gamma_i |h_j|^2} + \frac{1}{\eta \gamma_i |h_j|^2 (\gamma_1 + \gamma_2)} \quad (6)$$

이다. 그러므로 양방향 릴레이 통신에서 전송률 쌍 (R_1, R_2) 를 지원하지 못 할 아웃티지 확률은

$$P_{out} = \Pr \left[\frac{1}{2} C(SNR_{12}) < R_1 \text{ or } \frac{1}{2} C(SNR_{21}) < R_2 \right] = \Pr [A(\theta) < 1] \quad (7)$$

이므로 여기서 $C(x) = \log_2(1+x)$, $A(\theta) = \min\{A_1(\theta), A_2(\theta)\}$,

$$A_i(\theta) = \frac{SNR_{i,j}}{T_i} = \frac{\theta(1-\theta)}{T_i(A_i \theta + B_i)}, \quad (8)$$

그리고 $T_i = 2^{2R_i} - 1$ 이다.

III. 아웃티지 최적 전력 분할

본 절의 목표는 채널상태정보 (γ_1, γ_2) 를 알고 있을 때 아웃티지 확률을 최소로 하는 최적 전력 분할, 곧

$$\theta^* = \arg \max_{0 \leq \theta \leq 1} A(\theta) \quad (9)$$

를 얻는 것이다. 최적 전력 분할은 다음의 정리 1과 정리 2로 얻을 수 있다.

정리 1: 함수 $A_i(\theta)$, $i=1, 2$, 는 $\theta \in [0, 1]$ 에서 위로 볼록한 함수이고, 최댓값을 제공하는 θ 는 다음과 같다.

$$\theta_i^* = \arg \max_{0 \leq \theta \leq 1} A_i(\theta) = \frac{\sqrt{B_i}}{\sqrt{A_i + B_i} + \sqrt{B_i}}. \quad (10)$$

증명: 먼저 $A_i(\theta)$ 의 1차 및 2차 도함수는

$$A_i'(\theta) = \frac{-A_i \theta^2 - 2B_i \theta + B_i}{(A_i \theta + B_i)^2}, \quad A_i''(\theta) = \frac{-2B_i(B_i + A_i)}{(A_i \theta + B_i)^3} \quad (11)$$

으로, 식 (6)에서 $B_i > 0$, $A_i + B_i > 0$ 이므로, $\theta \in [0, 1]$ 에 대해 $A_i''(\theta) < 0$ 임을 알 수 있다. 그러므로 $A_i(\theta)$ 를 최대로 하는 점, 곧 $A_i'(\theta) = 0$ 인 $\theta \in [0, 1]$ 를 구하면

$$\theta_i^* = \frac{-B_i + \sqrt{B_i^2 + A_i B_i}}{A_i} \quad (12)$$

이고, 이를 정리하면 식 (10)의 오른쪽 식과 같다. □

정리 2: 함수 $A(\theta) = \min\{A_1(\theta), A_2(\theta)\}$ 를 최대로 하는 전력 분할은 $H_1 = T_1 A_1 - T_2 A_2$ 와 $H_2 = T_1(A_1 + B_1) - T_2(A_2 + B_2)$ 의 부호에 따라

$$\theta^* = \begin{cases} \theta_1^*, & \text{if } H_1 \geq 0, H_2 \geq 0, \\ \theta_2^*, & \text{if } H_1 < 0, H_2 < 0, \\ \theta_3^*, & \text{if } H_1 \geq 0, H_2 < 0, \\ \theta_4^*, & \text{if } H_1 < 0, H_2 \geq 0 \end{cases} \quad (13)$$

로 주어진다. 이 때 $\theta_T = -H_1/H_2$ 를 정의하면, 식 (13)의 변수는 다음과 같이 주어진다.

$$\theta_3^* = \begin{cases} \min(\theta_1^*, \theta_T), & \text{if } A_1(\theta_1^-) \geq A_2(\theta_2^+), \\ \max(\theta_2^*, \theta_T), & \text{if } A_1(\theta_1^-) < A_2(\theta_2^+), \end{cases} \quad (14)$$

$$\theta_4^* = \begin{cases} \min(\theta_2^*, \theta_T), & \text{if } A_2(\theta_2^-) \geq A_1(\theta_1^+), \\ \max(\theta_1^*, \theta_T), & \text{if } A_2(\theta_2^-) < A_1(\theta_1^+). \end{cases} \quad (15)$$

증명: 먼저 $H_1 \geq 0$, $H_2 \geq 0$ 이면, $A_1(\theta) \leq A_2(\theta)$ 이므로 $A(\theta) = A_1(\theta)$ 이고 이를 최대로 하는 점은 $\theta^* = \theta_1^*$ 이다. 비슷한 이유로 $H_1 < 0$, $H_2 < 0$ 이면, $\theta^* = \theta_2^*$ 이다. 다음으로 $H_1 \geq 0$, $H_2 < 0$ 또는 $H_1 < 0$, $H_2 \geq 0$ 이면,

$0 \leq \theta \leq 1$ 에서 $\Lambda_1(\theta) = \Lambda_2(\theta)$ 가 되는 교점 $\theta_T = -H_2/H_1$ 이 존재하여 이를 기준으로 $\Lambda(\theta)$ 가 다르게 된다. 만약 $H_1 \geq 0, H_2 < 0$ 이면, $0 \leq \theta \leq \theta_T$ 에서 $\Lambda(\theta) = \Lambda_1(\theta)$ 이므로 최댓값 후보는 $\min(\theta_1^*, \theta_T)$, $\theta_T \leq \theta \leq 1$ 이면 $\Lambda(\theta) = \Lambda_2(\theta)$ 이므로 최댓값 후보는 $\max(\theta_2^*, \theta_T)$ 가 된다. 따라서 $\Lambda(\theta)$ 를 최대화 하는 θ^* 는 식 (14)와 같다. 비슷한 방법으로 $H_1 < 0, H_2 \geq 0$ 일 때의 해는 식 (15)과 같다. \square

IV. 성능 평가 및 결론

제안 방식의 아웃지티 성능은 다음의 조건에서 도출하였다. 송신 전력은 $P_1 = P_2 = P$ 로 동일하고, $\eta = 0.8$ 이며, 세 노드는 한 직선 위에 있다. S_i 와 R 사이의 거리가 d_i 일 때, S_1 과 S_2 사이의 거리는 $d_1 + d_2 = 1$ 로 하여 기준 신호대잡음비 $\bar{\gamma}_T = P/\sigma^2$ 를 정의한다. S_i 와 R 사이의 신호대잡음비는 $\bar{\gamma}_i = \bar{\gamma}_T d_i^{-\nu}$ 이고, 여기서 경로손실 지수는 $\nu = 3$ 이다.

그림 2는 목표 전송률 쌍 (R_1, R_2) 이 대칭인 (1,1) bps/Hz일 때와 비대칭인 (1,3) bps/Hz일 때, $\bar{\gamma}_T$ 에 따른 아웃지티 확률을 보인 것이다. 그림 2(a)와 그림 2(b)는 릴레이 위치 (d_1, d_2) 가 (0.5, 0.5)와 (0.2, 0.8)일 때의 성능이다. 그림에서 'Optimal θ '는 최적 전력 분할, ' $\theta = c$ '는 전력 분할을 상수 c 로 고정할 때의 성능이다. 최적 전력 분할을 적용하면 위치와 전송률에 상관없이 성능이 가장 우수함을 볼 수 있다.

그림 3은 $\bar{\gamma}_T = 40$ dB로 고정했을 때 릴레이 위치 d_1 에 따른 성능을 보인 것이다. 목표 전송률과 릴레이

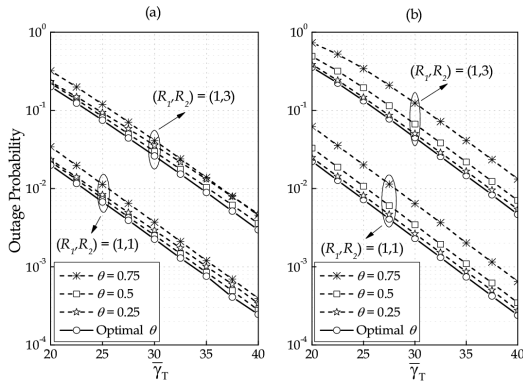


그림 2. 신호대잡음비 $\bar{\gamma}_T$ 에 따른 아웃지티 확률: (a) $(d_1, d_2) = (0.5, 0.5)$ (b) $(d_1, d_2) = (0.2, 0.8)$.

Fig. 2. Outage probability for SNR $\bar{\gamma}_T$: (a) $(d_1, d_2) = (0.5, 0.5)$ (b) $(d_1, d_2) = (0.2, 0.8)$.

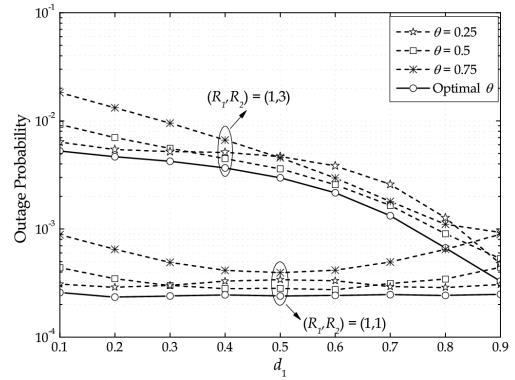


그림 3. 릴레이 위치 d_1 에 따른 아웃지티 확률.
Fig. 3. Outage probability for relay location d_1 .

위치에 상관없이 최적 전력 분할이 가장 좋은 성능을 보인다. 한편 제안하는 최적 전력 분할은 채널상태정보 (γ_1, γ_2)가 필요하나 이 정보는 릴레이에서 추정 가능하므로 실용적으로도 적용할 수 있다.

References

- [1] X. Zhou, R. Zhang, and C. K. Ho, "Wireless information and power transfer: Architecture design and rate-energy tradeoff," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 61, no. 11, pp. 4754-4767, Nov. 2013.
- [2] J. S. Wang, S. Y. Kim, M. A. Jeong, S. R. Lee, and Y. H. Kim, "Rate-aware two-way relaying for low-cost ship-to-ship communications," *J. KICS*, vol. 39C, no. 8, pp. 651-659, Aug. 2014.
- [3] Z. Chen, B. Xia, and H. Liu, "Wireless information and power transfer in two-way amplify-and-forward relaying channels," in *Proc. IEEE Global Conf. Signal Inf. Process.*, pp. 168-172, Atlanta, GA, USA, Dec. 2014.