

# 충전식과 비충전식 배터리를 동시에 사용하는 복호 후 전송 중계 네트워크를 위한 에너지 수확 시간 최적화 기법

심 영 규\*, 신 원 재<sup>o</sup>

## Optimal Energy Harvesting Time Allocation for Decode-and-Forward Relay Networks with Rechargeable and Non-Rechargeable Batteries

Yeonggyu Shim\*, Wonjae Shin<sup>o</sup>

### 요 약

본 논문은 송신기, 복호 후 전송 중계기, 수신기로 구성되어 있는 무선 중계 네트워크를 고려하였다. 충전식과 비충전식 배터리로 구성되어 있는 중계 네트워크에서는 전송률 증가를 위해 필요한 에너지 수확 시간이 비충전식 배터리에 의해 공급된 전력에 영향을 받는다는 특징이 있다. 이러한 점에 착안하여 비충전식 배터리에 의해 공급된 전력을 고려하여 에너지 수확 시간을 조절함으로써 전송률을 최대화시키는 기법을 제안하였다. 모의실험을 통해 충전식과 비충전식 배터리를 사용하는 기법이 충전식 배터리만 사용하는 기법 보다 성능이 우수한 것을 확인하였다.

**Key Words** : Energy harvesting, Decode-and-forward, Relay, Resource allocation

### ABSTRACT

This paper considers the half-duplex decode-and-forward relay networks with rechargeable and non-rechargeable batteries. The optimal energy

harvesting time allocation scheme for maximizing the achievable rate is proposed. Numerical results show that the achievable rate of the rechargeable and non-rechargeable batteries based scheme is greater than that of the rechargeable battery based scheme.

### 1. 서 론

무선 중계 네트워크에서 중계기가 충전식과 비충전식 배터리로 구성되어 있다면 충전식 배터리는 에너지 수확 시간 슬롯에 에너지를 수확하고 정보 전송 시간 슬롯에 수확한 에너지를 사용하여 전송한다. 또한 비충전식 배터리는 매 전송 시간 슬롯 마다 일정한 전송 전력을 공급한다. 충전식과 비충전식 배터리를 모두 사용하는 중계기는 충전식 배터리만을 사용하는 중계기에 비해서 에너지 수확 시간을 감소시킨다. Time switching-based relaying(TSR) 시스템에서 전체 블록 시간은 에너지 수확(energy harvesting) 시간, 첫 번째 정보 전송(first information transmission) 시간, 두 번째 정보 전송(second information transmission) 시간으로 구분되기 때문에 에너지 수확 시간이 감소되면 정보 전송 시간을 증가시킬 수 있다는 장점이 있다.

복호 후 전송 기법을 사용하고 충전식 배터리만을 고려하는 시스템에서 첫 번째와 두 번째 정보 전송 시간이 동일할 때 에너지 수확 시간 분배 기법이 개발되었다<sup>[1]</sup>. 또한 첫 번째와 두 번째 정보 전송 시간이 동일하지 않은 경우 정보 전송 시간의 비율을 고려하여 에너지 수확 시간을 분배하는 기법이 연구되었다<sup>[2]</sup>. 양방향 중계 시스템에서 아웃티지 확률이 분석되었다<sup>[3]</sup>. 한편 충전식과 비충전식 배터리로 구성된 중계 시스템에서 전송률(achievable rate)을 분석한 연구가 수행되었다<sup>[4]</sup>. 충전식과 비충전식 배터리를 사용하는 중계 시스템에서는 전송률이 충전식 배터리는 물론 비충전식 배터리에 의해 공급된 전력에 영향을 받는다는 특징에 착안하여 에너지 수확 시간을 분배하는 기법을 연구하고자 한다.

\* 이 논문은 부산대학교 기본연구지원사업(2년)에 의하여 연구되었음.

• First Author : (ORCID:0000-0002-3317-028X)Research Institute of Computer, Information and Communication, Pusan National University, ygshim@ieee.org, 정회원

o Corresponding Author : (ORCID:0000-0001-6513-1237)Department of Electronics Engineering, Pusan National University, wjshin@pusan.ac.kr, 종신회원

논문번호 : 201907-125-A-LU, Received July 4, 2019; Revised August 7, 2019; Accepted August 12, 2019

## II. 시스템 모델

본 논문에서는 송신기, 충전식과 비충전식 배터리를 구성된 중계기, 수신기로 이루어져 있는 무선 중계 네트워크를 고려한다. 중계기와 수신기에서 잡음은 평균이 0인 가산성 백색 가우시안 잡음이고 노드들은 채널 상태 정보를 알고 있다고 가정하였다. 그림 1은 TSR 시스템으로 전체 블록 시간은 에너지 수확 시간, 첫 번째 정보 전송 시간, 두 번째 정보 전송 시간으로 구성되어 있다. 전체 블록 시간을  $T$ 라 하고 에너지 수확 시간 대 전체 블록 시간의 비를  $\alpha$ 라 하였다. 첫 번째 정보 전송 시간과 두 번째 정보 전송 시간은 동일하다고 가정하였다.

각 전송 시간 별 세부 동작은 다음과 같다. 첫 번째 전송 시간 슬롯에  $\alpha T$ 동안 중계기가 에너지 수확을 하고 수확된 에너지량은 다음과 같다<sup>[1]</sup>.

$$E_h = (\eta p_s |h_{sr}|^2 / d_{sr}^m) (\alpha T), \quad (1)$$

여기서  $\eta$ 와  $p_s$ 은 각각 에너지 변환 효율 ( $0 < \eta < 1$ )과 송신기의 전송 전력을 의미한다. 또한  $h_{sr}$ ,  $d_{sr}$ ,  $m$ 은 각각 송신기와 중계기 사이의 채널 계수, 송신기와 중계기 사이의 거리, 경로 감쇄 지수를 의미한다. 두 번째 전송 시간 슬롯에는 송신기가  $(1/2)(1-\alpha)T$ 동안 중계기로 신호를 전송한다. 세 번째 전송 시간 슬롯에는 중계기가  $(1/2)(1-\alpha)T$ 동안 복호한 신호를 수신기로 전송하고 충전식 배터리에 의해 공급된 전력은 다음과 같다<sup>[1]</sup>.

$$p_h = (2\eta p_s |h_{sr}|^2 \alpha) / \{d_{sr}^m (1-\alpha)\} \quad (2)$$

중계기는 충전식과 비충전식 배터리에 의해 공급된 전력을 이용하여 복호한 신호를 수신기로 전송한다. 송신기에서 수신기로 전송하는 링크의 전송률은 송신기에서 중계기로 전송하는 링크의 전송률  $R_1$ 과 중계기에서 수신기로 전송하는 링크의 전송률  $R_2$ 의 최솟

값인  $\min(R_1, R_2)$ 이다<sup>[1]</sup>. 전체 블록 시간을 1이라 하면  $R_1$ 과  $R_2$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} R_1 &= (1/2)(1-\alpha)\log_2(1+\gamma_1), \\ R_2 &= (1/2)(1-\alpha)\log_2\{1+\gamma_2+2\gamma_3\alpha/(1-\alpha)\} \end{aligned} \quad (3)$$

$R_1$ 과  $R_2$ 에서  $\gamma_1$ ,  $\gamma_2$ ,  $\gamma_3$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \gamma_1 &= (p_s |h_{sr}|^2) / (d_{sr}^m \sigma_{n,r}^2), \\ \gamma_2 &= (p_0 |h_{rd}|^2) / (d_{rd}^m \sigma_{n,d}^2), \\ \gamma_3 &= (\eta p_s |h_{sr}|^2 |h_{rd}|^2) / (d_{sr}^m d_{rd}^m \sigma_{n,d}^2) \end{aligned} \quad (4)$$

여기서  $p_0$ ,  $h_{rd}$ ,  $d_{rd}$ 은 각각 비충전식 배터리에 의해 공급된 전력(supplied power by non-rechargeable battery), 중계기와 수신기 사이의 채널 계수, 중계기와 수신기 사이의 거리를 의미한다. 또한  $\sigma_{n,r}^2$ 과  $\sigma_{n,d}^2$ 은 각각 중계기에서 잡음의 분산과 수신기에서 잡음의 분산을 의미한다.

## III. 최적 에너지 수확 시간 분배 기법

본 장에서는 전송률을 최대화하는 최적 에너지 수확 시간 분배 기법을 제안한다.  $\alpha$ 를 찾는 최적화 문제는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} &\underset{\alpha}{\text{maximize}} && \min\{f_1(\alpha), f_2(\alpha)\} \\ &\text{subject to} && 0 \leq \alpha < 1 \end{aligned} \quad (5)$$

여기서  $f_1(\alpha)$ 와  $f_2(\alpha)$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} f_1(\alpha) &= (1/2)(1-\alpha)\log_2(1+\gamma_1), \\ f_2(\alpha) &= (1/2)(1-\alpha)\log_2\{1+\gamma_2+2\gamma_3\alpha/(1-\alpha)\} \end{aligned} \quad (6)$$

$\alpha$ 가 증가함에 따라  $f_1(\alpha)$ 은 감소하고  $f_2(\alpha)$ 는 증가하다가 감소하는 함수이다. 두 함수는 한 점에서 만나고 그 점을  $a_1$ 이라 하면 그 값은 다음과 같다.

$$a_1 = (\gamma_1 - \gamma_2) / (\gamma_1 - \gamma_2 + 2\gamma_3) \quad (7)$$

$f_2(\alpha)$ 를 최대화하는  $\alpha$ 를  $a_2$ 라 하면 그 값은 다음과 같다.

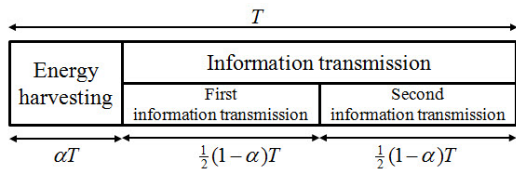


그림 1. TSR 시스템을 위한 전송 프레임 구조  
Fig. 1. Frame structure for the TSR system

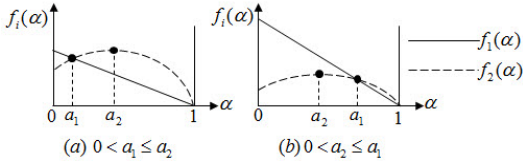


그림 2.  $a_1$ 과  $a_2$ 에 따른  $f_1(\alpha)$ 과  $f_2(\alpha)$   
 Fig. 2.  $f_1(\alpha)$  and  $f_2(\alpha)$  with different  $a_1$  and  $a_2$

$$a_2 = \frac{e^{W\{(2\gamma_3 - \gamma_2 - 1)/e\} + 1} - \gamma_2 - 1}{e^{W\{(2\gamma_3 - \gamma_2 - 1)/e\} + 1} - \gamma_2 - 1 + 2\gamma_3}, \quad (8)$$

여기서  $W(\cdot)$ 은 Lambert's W function이다<sup>5)</sup>.

$a_1$ 과  $a_2$ 가 0보다 큰 경우  $a_1$ 과  $a_2$ 의 관계에 따라서 그림 2와 같이 구분할 수 있다.  $a_1$  또는  $a_2$ 가 0보다 작은 경우  $\min\{f_1(\alpha), f_2(\alpha)\}$ 은 감소하는 함수이므로 최대화하는  $\alpha$ 는 0이다.  $W(c)$ 는  $c \geq -1/e$  일 때 실수 값을 가지므로  $\gamma_3 < \gamma_2$  인 경우  $\alpha$ 는 0으로 설정한다. 따라서 전송률을 최대화하는  $\alpha$ 는 다음과 같다.

$$\alpha^* = \begin{cases} a_1 & \text{for } 0 < a_1 \leq a_2 \\ a_2 & \text{for } 0 < a_2 \leq a_1 \\ 0 & \text{for } a_1 \leq 0 \text{ or } a_2 \leq 0 \text{ or } \gamma_3 < \gamma_2 \end{cases} \quad (9)$$

#### IV. 모의실험 결과

본 장에서는 제안하는 기법(proposed scheme)에 대해서 모의실험을 하였다. 중계기와 수신기에서 잡음의 분산은 같다고 가정하고 그 값을  $\sigma_n^2$ 라고 하였다. 또한 신호 대 잡음 비(SNR, signal-to-noise ratio)는  $p_s/\sigma_n^2$ 라고 하였다.  $p_s = 15$  dBm,  $m = 3$ ,  $|h_{sr}|^2 = |h_{rd}|^2 = 1$ ,  $d_{sr} = 1m$ 라고 하였다.

그림 3은  $\eta = 0.5$ ,  $d_{sr} = 1m$ 일 때 모의 실험한 결과이다. 제안하는 기법의 전송률이 충전식 배터리만을 이용한 기법(rechargeable battery based scheme)의 전송률 보다 우수한 것을 확인하였다.

그림 4는 신호 대 잡음비가 20 dB 일 때 모의 실험한 결과이다. 제안하는 기법이 고정 에너지 수확 시간을 이용한 기법(fixed scheme)보다 전송률이 우수하고  $p_0$ 와  $\eta$ 가 증가할수록  $d_{sr}$ 이 작을수록 전송률이 증가하는 것을 확인하였다.

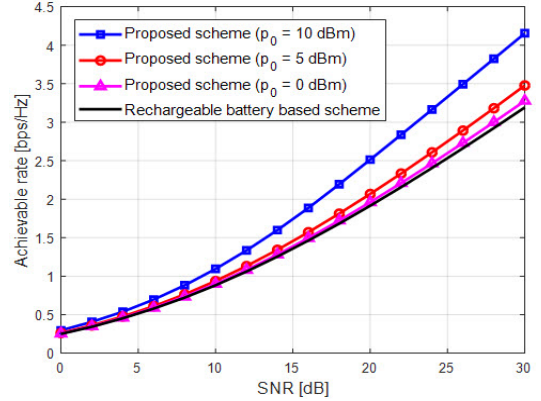


그림 3. 제안하는 기법과 충전식 배터리만을 이용한 기법의 전송률  
 Fig. 3. Achievable rate for proposed and rechargeable battery based schemes

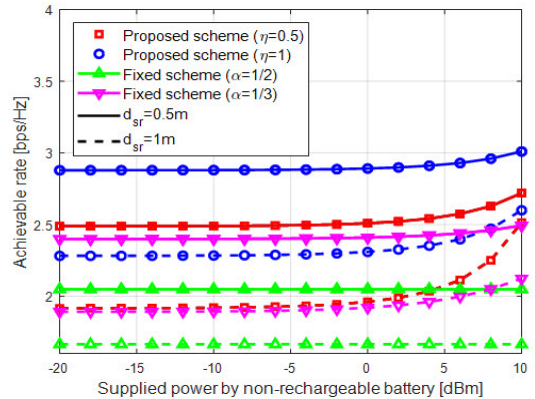


그림 4. 제안하는 기법과 고정 에너지 수확 시간을 이용한 기법의 전송률  
 Fig. 4. Achievable rate for proposed and fixed schemes

#### V. 결론

본 논문에서 제안한 최적 에너지 수확 시간 분배 기법은 닫힌 형태의 에너지 수확 시간을 이용하였기에 복잡도가 낮다는 장점이 있다.

#### References

[1] C. Zhong, H. A. Suraweera, G. Zheng, I. Krikidis, and Z. Zhang, "Wireless information and power transfer with full duplex relaying," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 62, no. 10, pp. 3447-3461, Oct. 2014.

[2] Y. Shim and W. Shin, "An optimal time allocation scheme for energy harvesting in

- decode-and-forward wireless relay networks,”  
*in Proc. JCCI 2019*, Gangneung, Korea, May 2019.
- [3] S. Modem and S. Prakriya, “Optimization of two-way relaying networks with battery-assisted EH relays,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 66, no. 10, pp. 4414-4430, Oct. 2018.
- [4] A. M. Siddiqui, L. Musavian, S. Aïssa, and Q. Ni, “Performance analysis of relaying systems with fixed and energy harvesting batteries,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 66, no. 4, pp. 1386-1398, Apr. 2018.
- [5] R. M. Corless, G. H. Gonnet, D. E. G. Hare, D. J. Jeffrey, and D. E. Knuth, “On the Lambert W function,” *Adv. Comput. Math.*, vol. 5, pp. 329-359, 1996.