

전송 파워 분할 비율이 전이중 무선 전력 릴레이 노드 처리량에 미치는 영향

문인석, 이원석, 김태준
충북대학교inseok9791@chungbuk.ac.kr, dldnjstjr0224@chungbuk.ac.kr, ktjcc@chungbuk.ac.kr

Effect of Transmission Power Split Ratio on Throughput of Full-duplex Wireless Powered Relay Node

Inseok Moon, Wonseok Lee, Taejoon Kim

Department of Information and Communication Engineering, Chungbuk National Univ.

요 약

본 논문에서는 소스에서 수집된 일정 비율의 에너지를 사용하여 소스에서 목적지로 무선 전력 및 정보를 전달하는 에너지 제한 릴레이 시스템에서 파워 분할에 따른 성능 변화를 제시한다. RF 에너지 축적기술은 최근 부상하고 있는 기술이며 제안하는 릴레이 노드는 WPR (wireless Powered Relaying)로 무선으로 전력을 공급받는다. 릴레이 노드는 효율성을 위해 정보를 전송함과 동시에 에너지를 획득하는 전이중 모드로 작동한다. 논문에서 제시하는 릴레이 시스템은 에너지 신호 전송과 정보 신호를 동시에 송·수신하기 때문에 시간 전환이나 전력 분할이 필요하지 않다. 또한 자체 에너지를 재사용하는 릴레이에서 정보 전송에 사용되는 에너지 일부가 소스에 의해 전송되는 에너지 외에 획득되어 재사용 될 수 있다. 이를 Loop Energy 라 한다. 소스에서 릴레이 노드로 정보 신호를 보낼 때 사용하는 파워의 비율과 소스에서 릴레이 노드로 에너지 신호를 보낼 때 사용하는 파워의 비율을 조절하면 기존 방안에 비해 성능이 개선됨을 보인다.

I. 서론

무선 에너지 전송은 무선으로 전기 에너지를 전송하는 것을 말한다. RF (Radio-Frequency) 신호는 정보 신호 및 에너지를 모두 전달할 수 있다. 하지만 이 경우 전송 거리 및 효율의 한계를 극복해야 하는 과제가 있다. 본 논문에서는 정보 신호를 전송함과 동시에 전력을 축적하는 SWIPT (simultaneous wireless information and power transfer)를 다루고 있다. SWIPT 의 경우 RF 신호가 정보 신호와 에너지를 가지고 있기 때문에 이를 동시에 활용하여 통신하는 방법을 의미한다. 논문 [1]에서는 단순히 1:1 의 비율로 전력을 분할하였다. 즉, 신호의 전력을 동일한 비율로 분할하여 정보 신호 전달과 에너지 축적을 달성하는 방법이다. 이는 제한된 에너지로 정보 신호를 전송하고 전력을 축적해야 한다. 따라서 적절한 비율의 전력 분할을 한다면 최적의 처리량을 구할 수 있을 것이다. 본 논문에서는 전력 분할의 비율이 처리량에 미치는 영향에 대해 살펴볼 것이다.

II. 본론

본 논문의 시스템모델은 그림 1 과 같이 소스, 릴레이, 목적지 3 단계로 구성 되어있다. 릴레이의 경우 MISO (multiple-input-single-output)를 이용한다. 이는 정보 전송을 최대 N 개의 안테나를 사용할 수 있으며, 정보 및 에너지 수신을 위해 하나의 안테나를 활성화 할 수 있다. 각각의 안테나의 위상과 각도를 조절하여 전송할 전력을 분배한다. 수신된 신호는 전력 분할을 통하여 정보 신호 수신과 에너지 축적을 동시에 할 수 있다. 그림 2 에서 T/2 동안 릴레이노드는 정보 신호를 수신하고 다음 T/2

동안 릴레이노드는 목적지로 정보를 보냄과 동시에 에너지를 축적한다. P_s 는 소스에서의 전송 전력을 의미한다. 소스에서 전력 분할을 통해 송신 신호의 전력 δP_s 만큼을 정보 신호를 송신하는데 사용하며, $(1-\delta)P_s$ 만큼을 loop energy 로 에너지를 축적하고 목적지로 정보 신호를 전송하는데 사용된다. 전체 $E = P_s \cdot T$ 로 일정한 값을 유지한다. 따라서 전력 비율(δ)을 조절하면 end-to-end 처리량을 최적화할 수 있다. 이때 $0 \leq \delta \leq 1$ 을 만족하여야 한다.

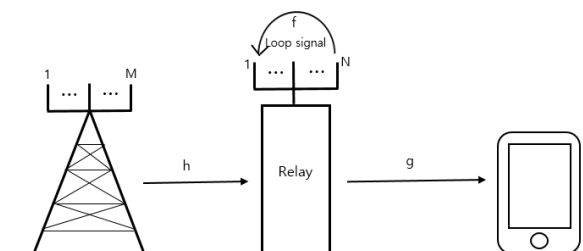


그림 1. 시스템 모델

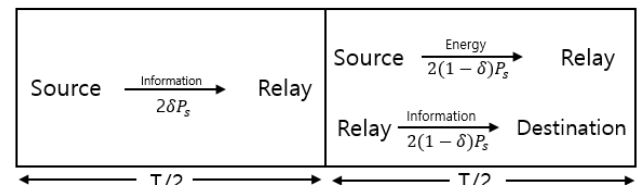


그림 2. 제안하는 full-duplex 프로토콜

γ 는 신호 대 잡음 비(SNR)를 의미한다. γ_d 는 목적지에 서의 SNR 을 의미하며 $\frac{2\delta P_s |h|^2}{\sigma_r^2 + \frac{\sigma_d^2 A}{P_r |g^H v_r|}}$ 로 표현 가능하다. $\gamma_d = \frac{\gamma_1}{1+(1+\gamma_1)/\gamma_2}$ 와 같이 γ_1 과 γ_2 에 관한 식으로 나타낼 수 있다. $\gamma_1 = \frac{2\delta P_s |h|^2}{\sigma_r^2}$, $\gamma_2 = \frac{2(1-\delta)P_s |g^H v_r|^2}{\sigma_d^2}$ 로 정의되며 각각 $1 -$

hop, 2-hop 에서의 SNR 이다. 릴레이노드에서 최적의 빔포밍 벡터는 $\mathbf{v}_r^* = \mathbf{v}^*/\|\mathbf{v}^*\|$ 이다. $\mathbf{v}^* = \alpha_1 e^{j\angle g^H f} \mathbf{g} + \alpha_2 \mathbf{f}$ 로 표현이 가능하다. α_1 과 α_2 는 각각

$$\left. \begin{aligned} \alpha_1 &= \frac{\|h\| \sqrt{2(1+\frac{1}{\gamma_1})(1-\delta)P_s \eta}}{\|g\| \sqrt{\left(1+\frac{1}{\gamma_1}-\eta\|f\|^2 \sin^2 \theta\left(\frac{1}{\delta}-1\right)\right)}} \quad (1) \\ \alpha_2 &= \frac{\eta\|h\| \sqrt{\frac{2(1+\frac{1}{\gamma_1})(1-\delta)^2}{\delta} P_s}}{1+\frac{1}{\gamma_1}-\eta\|f\|^2 \left(\frac{1}{\delta}-1\right)} * \left(1 + \frac{\sqrt{\eta\left(\frac{1}{\delta}-1\right)}\|f\|\cos\theta}{\sqrt{1+\frac{1}{\gamma_1}-\left(\frac{1}{\delta}-1\right)\eta\|f\|^2 \sin^2 \theta}}\right) \quad (2) \end{aligned} \right\} [1]$$

처리량(R)은 γ_2^* 의 값이 증가함에 따라 단조 증가하기 때문에 최적의 처리량 R^* 에 관한 문제는 γ_2^* 을 구하는 문제와 같다. 최대 γ_2 를 구하는 식은 (P1)과 같다.

$$(P1) : \max_{P_r, v_r} \gamma_2 \triangleq P_r |g^H v_r|^2 / \sigma_d^2$$

위 식에서 릴레이 노드의 전송 전력(P_r)의 제한은

$$0 \leq P_r \leq 2\delta P_s \|h\|^2 \left(1 + \sqrt{\frac{P_r}{A}} |f^H v_r|\right)^2, \quad \|v_r\| = 1 \text{ 이다.}$$

A 는 1hop 에서 릴레이가 받은 수신신호 파워이며 $A = 2\delta P_s \|h\|^2 + \sigma_r^2$ 로 정의된다. σ_r, σ_d 는 각각 릴레이에서의 노이즈와 목적지에서 노이즈를 의미한다.

식 (P1)의 최적의 값은 $\gamma_2^* = \frac{2(1-\delta)(1+\frac{1}{\gamma_1})\eta P_s \|h\|^2 \|g\|^2}{\sigma_d^2(1+\frac{1}{\gamma_1}-\left(\frac{1}{\delta}-1\right)\eta\|f\|^2)}$.

$$\left(\sqrt{\eta\left(\frac{1}{\delta}-1\right)}\|f\|\cos\theta + \sqrt{1+\frac{1}{\gamma_1}-\left(\frac{1}{\delta}-1\right)\eta\|f\|^2 \sin^2 \theta}\right)^2 \quad (3)$$

이를 통해 R^* 을 구하면 $R^* = \frac{1}{2} \log_2(1 + \frac{\gamma_1 \gamma_2^*}{\gamma_1 + \gamma_2^* + 1})$ 이다. R^* 을 구하기 위해서는 최적의 δ 값을 구해야 한다. 이때의 δ 는 R^* 의 기울기가 0에 수렴하는 지점이다. Rate의 기울기를 구하는 식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} R' &= \frac{2BF\left(\left(\frac{C}{\delta}+H\left(1-\frac{1}{\delta}\right)+1+G\sqrt{\eta\left(\frac{1}{\delta}-1\right)}\right)\left(\frac{\frac{H}{\delta^2}-\frac{C}{\delta^2}}{2\left(\frac{C}{\delta}+H\left(1-\frac{1}{\delta}\right)+1\right)}-\frac{\eta G}{2\sqrt{\eta\left(\frac{1}{\delta}-1\right)\delta^2}}\right)\left(\frac{C}{\delta}+1\right)(1-\delta)\right)}{\sigma_d^2\left(\frac{C}{\delta}+D\left(1-\frac{1}{\delta}\right)+1\right)^2(B\delta+\sigma_r^2)+F\sigma_r^2\left(\sqrt{\frac{C}{\delta}+H\left(1-\frac{1}{\delta}\right)+1+G\sqrt{\eta\left(\frac{1}{\delta}-1\right)}}\right)^2\left(\frac{C}{\delta}+1\right)(1-\delta)} \right. \\ &\quad \left. - \frac{BF\left(\sqrt{\frac{C}{\delta}+H\left(1-\frac{1}{\delta}\right)+1+G\sqrt{\eta\left(\frac{1}{\delta}-1\right)}}\right)^2\left(\frac{C}{\delta}+1\right)\delta}{\sigma_d^2\left(\frac{C}{\delta}+D\left(1-\frac{1}{\delta}\right)+1\right)^2(B\delta+\sigma_r^2)+F\sigma_r^2\left(\sqrt{\frac{C}{\delta}+H\left(1-\frac{1}{\delta}\right)+1+G\sqrt{\eta\left(\frac{1}{\delta}-1\right)}}\right)^2\left(\frac{C}{\delta}+1\right)(1-\delta)} \right. \\ &\quad \left. - \frac{BF\left(\sqrt{\frac{C}{\delta}+H\left(1-\frac{1}{\delta}\right)+1+G\sqrt{\eta\left(\frac{1}{\delta}-1\right)}}\right)^2\left(\frac{C}{\delta}+1\right)(1-\delta)}{\sigma_d^2\left(\frac{C}{\delta}+D\left(1-\frac{1}{\delta}\right)+1\right)^2(B\delta+\sigma_r^2)+F\sigma_r^2\left(\sqrt{\frac{C}{\delta}+H\left(1-\frac{1}{\delta}\right)+1+G\sqrt{\eta\left(\frac{1}{\delta}-1\right)}}\right)^2\left(\frac{C}{\delta}+1\right)(1-\delta)} \right. \\ &\quad \left. - \frac{BCF\left(\sqrt{\frac{C}{\delta}+H\left(1-\frac{1}{\delta}\right)+1+G\sqrt{\eta\left(\frac{1}{\delta}-1\right)}}\right)^2(1-\delta)}{\delta\left(\sigma_r^2\left(\frac{C}{\delta}+D\left(1-\frac{1}{\delta}\right)+1\right)^2(B\delta+\sigma_r^2)+F\sigma_r^2\left(\sqrt{\frac{C}{\delta}+H\left(1-\frac{1}{\delta}\right)+1+G\sqrt{\eta\left(\frac{1}{\delta}-1\right)}}\right)^2\right)} \right. \\ &\quad \left. - \frac{BF\left(\sqrt{\frac{C}{\delta}+H\left(1-\frac{1}{\delta}\right)+1+G\sqrt{\eta\left(\frac{1}{\delta}-1\right)}}\right)^2\left(\frac{C}{\delta}+1\right)(1-\delta)\delta}{\left(\sigma_d^2\left(\frac{C}{\delta}+D\left(1-\frac{1}{\delta}\right)+1\right)^2(B\delta+\sigma_r^2)+F\sigma_r^2\left(\sqrt{\frac{C}{\delta}+H\left(1-\frac{1}{\delta}\right)+1+G\sqrt{\eta\left(\frac{1}{\delta}-1\right)}}\right)^2\left(\frac{C}{\delta}+1\right)(1-\delta)\right)^2} \right. \\ &\quad \left. + \frac{2\sigma_d^2\left(\frac{D}{\delta^2}-\frac{C}{\delta^2}\right)\left(\frac{C}{\delta}+D\left(1-\frac{1}{\delta}\right)+1\right)(B\delta+\sigma_r^2)}{\left(\sigma_d^2\left(\frac{C}{\delta}+D\left(1-\frac{1}{\delta}\right)+1\right)^2(B\delta+\sigma_r^2)+F\sigma_r^2\left(\sqrt{\frac{C}{\delta}+H\left(1-\frac{1}{\delta}\right)+1+G\sqrt{\eta\left(\frac{1}{\delta}-1\right)}}\right)^2\left(\frac{C}{\delta}+1\right)(1-\delta)\right)^2} \right. \\ &\quad \left. + \frac{2F\sigma_r^2\left(\sqrt{\frac{C}{\delta}+H\left(1-\frac{1}{\delta}\right)+1+G\sqrt{\eta\left(\frac{1}{\delta}-1\right)}}\right)\left(\frac{\frac{H}{\delta^2}-\frac{C}{\delta^2}}{2\left(\frac{C}{\delta}+H\left(1-\frac{1}{\delta}\right)+1\right)}-\frac{\eta G}{2\sqrt{\eta\left(\frac{1}{\delta}-1\right)\delta^2}}\right)\left(\frac{C}{\delta}+1\right)(1-\delta)}{\left(\sigma_d^2\left(\frac{C}{\delta}+D\left(1-\frac{1}{\delta}\right)+1\right)^2(B\delta+\sigma_r^2)+F\sigma_r^2\left(\sqrt{\frac{C}{\delta}+H\left(1-\frac{1}{\delta}\right)+1+G\sqrt{\eta\left(\frac{1}{\delta}-1\right)}}\right)^2\left(\frac{C}{\delta}+1\right)(1-\delta)\right)^2} \right. \\ &\quad \left. - \frac{F\sigma_r^2\left(\sqrt{\frac{C}{\delta}+H\left(1-\frac{1}{\delta}\right)+1+G\sqrt{\eta\left(\frac{1}{\delta}-1\right)}}\right)^2\left(\frac{C}{\delta}+1\right)}{\left(\sigma_d^2\left(\frac{C}{\delta}+D\left(1-\frac{1}{\delta}\right)+1\right)^2(B\delta+\sigma_r^2)+F\sigma_r^2\left(\sqrt{\frac{C}{\delta}+H\left(1-\frac{1}{\delta}\right)+1+G\sqrt{\eta\left(\frac{1}{\delta}-1\right)}}\right)^2\left(\frac{C}{\delta}+1\right)(1-\delta)\right)^2} \right. \\ &\quad \left. - \frac{CF\sigma_r^2\left(\sqrt{\frac{C}{\delta}+H\left(1-\frac{1}{\delta}\right)+1+G\sqrt{\eta\left(\frac{1}{\delta}-1\right)}}\right)^2(1-\delta)}{\left(\sigma_d^2\left(\frac{C}{\delta}+D\left(1-\frac{1}{\delta}\right)+1\right)^2(B\delta+\sigma_r^2)+F\sigma_r^2\left(\sqrt{\frac{C}{\delta}+H\left(1-\frac{1}{\delta}\right)+1+G\sqrt{\eta\left(\frac{1}{\delta}-1\right)}}\right)^2\left(\frac{C}{\delta}+1\right)(1-\delta)\right)^2} \right. \\ &\quad \left. + \frac{b\sigma_d^2\left(\left(\frac{C}{\delta}+D\left(1-\frac{1}{\delta}\right)+1\right)^2\right)}{\left(\sigma_d^2\left(\frac{C}{\delta}+D\left(1-\frac{1}{\delta}\right)+1\right)^2(B\delta+\sigma_r^2)+F\sigma_r^2\left(\sqrt{\frac{C}{\delta}+H\left(1-\frac{1}{\delta}\right)+1+G\sqrt{\eta\left(\frac{1}{\delta}-1\right)}}\right)^2\left(\frac{C}{\delta}+1\right)(1-\delta)\right)^2} \right) \quad (4) \end{aligned}$$

$$B = 2P_s \|h\|^2, \quad C = \frac{\sigma_d^2}{2\delta P_s \|h\|^2}, \quad D = \eta \|f\|^2$$

$F = 2\eta P_s \|h\|^2 \|g\|^2$, $G = \|f\| \cos(\theta)$, $H = \eta \|f\| \sin^2(\theta)$
위 식에서 표현된 h 는 $h \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 로 소스에서 릴레이 수신 안테나까지의 베이스밴드 등가 MISO 채널을 $g \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 는 릴레이에서 목적지까지 MISO 채널을 의미한다. M 은 소스에서 송신 안테나 수를 의미하며, N 은 릴레이에서 송신 안테나 수를 의미한다. $f \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 로 표시된 루프 채널을 통해 자체 전송 에너지의 일부를 재활용 할 수 있다.[1] η 의 경우 릴레이에서 에너지 하비스팅 효율을 의미 하기 때문에 $0 < \eta \leq 1$ 의 범위 내에 존재 한다. 그림 3은 δ 값에 따라 변하는 처리량 그래프 이다. δ 가 0.5가 아닌 조절한 값에서 최대 처리량의 값을 얻을 수 있다.

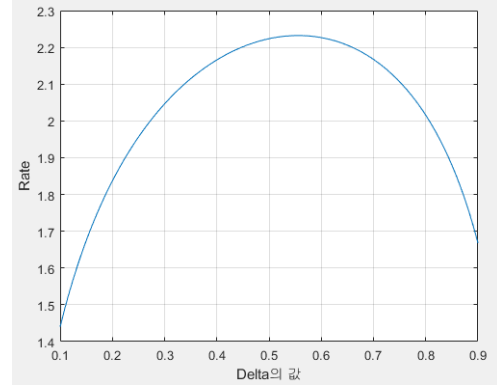


그림 3. Delta의 값에 따른 Rate의 변화

III. 결론

본 논문에서는 전력 분할 비율에 따라 최적의 처리량을 갖는 전 이중 방식의 무선 전력 릴레이를 제안한다. 이 릴레이는 정보 신호를 송신하는 동시에 에너지를 축적한다. 기존 프로토콜의 경우 소스 노드에서 1:1의 비율로 신호의 전력을 분할하여 정보 신호 전달과 에너지 신호를 전송하는 프로토콜을 제시하였다. 전체 에너지의 양은 $E = P_s \cdot T$ 로 제한 되어 있다. 때문에 안테나들 사이의 각도와 위상을 조절하거나 전력 분할 비율을 조절하면 기존의 프로토콜 보다 나은 최적의 처리량을 얻을 수 있을을 알 수 있다.

ACKNOWLEDGMENT

2017년도 산업통상자원부의 재원으로 한국산업기술진흥원-임베디드 SW 전문인력양성사업의 지원을 받아 수행된 연구임(No. N0001884)

참고 문헌

- [1] Y. Zeng and R. Zhang, "Full-Duplex Wireless-Powered Relay With Self-Energy Recycling", IEEE Communication Letters, Vol. 4, no. 2, pp. 201-204, Apr. 2015.
- [2] Jong Ho Moon, Jong Jin Park and Dong In Kim "Energy Signal Design and Decoding Procedure for Full-Duplex Two-Way Wireless Powered Relay", 2016 URSI Asia-Pacific Radio Science Conference (URSI AP-RASC)
- [3] Xin Song, Yue Ni, Xiuwei Han, and Siyang Xu "Optimal power splitting of full-Duplex wireless Powered Communication Networks with Two-way Relay", 2018 3rd International Conference on Mechanical, Control and Computer Engineering (ICMCCE)