

에너지 하베스팅을 사용하는 다중 홉 중계 전송 기법의 불능 확률

임경래, 이재홍

서울대학교

imgrae@snu.ac.kr, jhlee@snu.ac.kr

Outage Probability of multi-hop communication
with Energy Harvesting Relays

Gyeongrae Im Jae Hong Lee

Department of Electrical and Computer Engineering, INMC
Seoul National University

요 약

본 논문은 에너지 하베스팅을 하는 다수의 중계기를 사용하여 다중 홉 통신을 하는 시스템을 다룬다. 중계기는 파워 비콘에서 보내는 무선 에너지 신호를 이용하여 신호 전송에 필요한 에너지를 얻는다. 신호 전송은 여러 프레임을 통해 이루어 지는데, K 개의 프레임 동안 에너지를 하베스팅하고, 다음 프레임에 다중 홉으로 정보 신호 전송을 한다. 이 때 수신기에서의 불능 확률을 1) K 가 변화할 때, 2) 다중 홉 수 가 변화할 때로 나누어 시뮬레이션 한다.

1. 서론

최근 IoT 에 대한 관심이 증가하면서 IoT 단말의 수가 크게 증가하고 있다. 이에 따라 단말이 사용하는 에너지를 효율적으로 사용하는 연구가 꾸준히 이루어지고 있다. 크기가 큰 IoT 단말은 외부에서 전력을 공급받거나 자체 배터리를 가지고 동작하지만 센서와 같은 크기가 매우 작은 IoT 단말 혹은 인체 안에 들어가는 초소형 IoT 단말의 경우 안정적인 에너지 공급에 있어 문제가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위하여 외부에서 에너지를 공급해 주는 RF 에너지 하베스팅 기술이 해결책으로 각광받고 있다.

RF 에너지 하베스팅 기술을 무선통신에 적용하기 위하여 RF 신호에 정보와 에너지를 동시에 보내는 simultaneous wireless information and power transfer(SWIPT)의 개념이 제안되었다 [1], [2]. [3]에서는 SWIPT 가 협력 통신에 적용되었다. 다중 중계기는 송신기로부터 오는 에너지를 하베스팅 하며 모든 에너지를 바탕으로 수신기로 신호 전송을 할 때의 불능 확률이 분석되었다.

기존 대다수의 에너지 하베스팅 관련 연구에서는 에너지가 확률적 모델에 따라서 단말에 도착한다고 가정하거나 송신기가 보내주는 신호를 하베스팅하여 사용한다고 가정하였다. 하지만 외부에서 산발적으로 오는 에너지는 환경적 제약이 크고 송신기가 보내주는 신호의 경우 세기가 매우 약할 수 있다. 따라서 파워 비콘의 RF 신호 사용하여 에너지를 공급해 주는

에너지 하베스팅 모델이 제안되었다 [4].

본 논문에서는 에너지 하베스팅을 하는 중계기가 존재하는 무선 통신 네트워크에서 다중 홉 전송 방식을 처음으로 제안하였다. 단말들은 파워 비콘에서 보내는 RF 에너지를 하베스팅하여 신호 전송 프레임에서 신호 전송을 하기 위한 에너지로 사용한다. 홉의 수, 하베스팅 프레임의 수가 변함에 따라 불능 확률이 변화하는 것을 시뮬레이션 하고 그래프로 나타내었다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 절에서는 시스템 모델을 설정하고 채널을 모델링 한다. 3 절에서는 신호 전송 모델과 불능 조건을 확인한다. 4 절에서는 불능확률을 시뮬레이션을 통하여 수치적으로 확인하며, 마지막으로 결론을 맺는다.

2. 시스템 모델 및 채널 모델

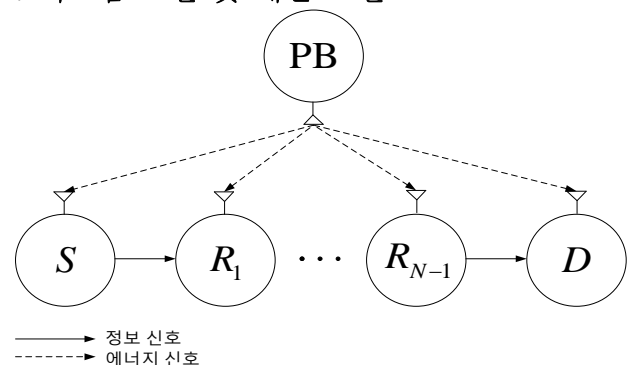


그림 1. 시스템 모델.

이 논문은 2016 년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2015R1D1A1A01057563).

본 논문은 그림 1 과 같이 하나의 송신기 (S), 하나의 수신기 (D), $N-1$ 개의 중계기(R_1, R_2, \dots, R_{N-1}), 하나의 파워 비콘(PB)으로 구성된 시스템을 다루고 있다. 송신기, 수신기와 중계기는 하나의 안테나를 가지고 있으며, 반이중(half-duplex)으로 작동하고, 송신기와 수신기 사이의 직경로는 없다고 가정한다. 또한, 중계기들은 공간상에서 순차적으로 배열되어 있어 인접한 단말하고만 통신이 가능하다고 가정한다. 즉, S 에서 전송하는 신호는 R_1 만 수신할 수 있으며, R_i ($i \in \{1, 2, \dots, N-2\}$) 에서 전송하는 신호는 R_{i+1} 만 수신할 수 있고, R_{N-1} 에서 전송하는 신호는 D 만 수신할 수 있다고 가정한다. 각 중계기는 복호후전송 중계 프로토콜을 사용하여 신호를 전송한다. 송신기와 중계기들은 따로 지속적인 전력을 공급하는 장치가 없기 때문에 주위에서 에너지를 하베스팅하여 신호 전송에 필요한 에너지를 얻는다. 길이가 T 인 각 프레임은 에너지 하베스팅을 하거나 정보 전송을 하는데 사용된다.

에너지 하베스팅을 하는 프레임에서 송신기와 중계기는 파워 비콘에서 전송하는 신호를 RF (radio frequency) 에너지 하베스팅 한다. K 개의 프레임 동안 에너지를 하베스팅 한 후 바로 다음 프레임에 정보 신호 전송을 한다.

정보 전송을 하는 프레임은 N 개의 단계로 나누어진다. 각 단계는 T/N 의 동일한 시간을 갖는다고 가정한다. 첫 번째 단계에서 S 는 R_1 에 정보 신호를 전송하고 R_1 은 이를 수신 한 뒤 복호를 시도한다. 복호에 성공한 경우 R_1 은 복호에 성공한 신호를 다시 부호화 하여 다음 단계에 R_2 에 전송한다. i ($i \in \{2, 3, \dots, N-1\}$) 번째 단계에는 R_{i-1} 이 R_i 에게 정보 신호를 전송하며 위와 같은 방법으로 복호후전송 중계한다. N 번째 단계에서는 R_{N-1} 이 D 에 정보 신호를 전송하며 D 는 수신한 신호를 복호하여 최종적으로 수신한 정보를 판단하게 된다. 각 단계에서 수신한 신호의 신호대잡음비(signal-to-noise-ratio, SNR)이 목표한 SNR γ 보다 작으면 불능으로 간주한다.

에너지 하베스팅을 하는 K 개의 프레임 중 k 번째 프레임에서 파워 비콘과 각 단말 사이의 채널 g_i^k , $i \in \{S, R_1, R_2, \dots, R_{N-1}\}$ 은 평균이 0, 분산이 1 인 복소 가우시안 확률 변수로 가정한다. 파워 비콘에서 에너지 신호 전송에 사용하는 전력의 크기는 P 이며 모든 프레임에서 동일하다. 또한 채널 정보는 프레임마다 독립적인 값을 가지며 프레임 단위로 변화한다.

정보 전송을 하는 프레임에서 각 단말 사이의 채널 계수 $h_{i,j}$, $i \in \{S, R_1, R_2, \dots, R_{N-1}\}, j \in \{R_1, R_2, \dots, R_{N-1}, D\}$ 는 평균이 0, 분산이 1 인 복소 가우시안 확률 변수로 가정한다. 또한 $h_{i,j}$ 들은 모두 독립이다.

3. 신호 전송 및 불능 확률

k 번째 에너지 하베스팅 프레임에서 i 번째 단말이 받게 되는 에너지 신호는 다음과 같다.

$$y_i^k = g_i^k x^k + n_i^k. \tag{1}$$

x^k 는 에너지 전송을 위해 파워 비콘에서 보내지는 심볼이며

n_i^k 은 평균 0, 분산 N_0 인 가우시안 가산 잡음이다. 하베스팅 하게 되는 에너지의 크기는 다음과 같다.

$$E_i^k = \rho PT |g_i^k|^2. \tag{2}$$

K 개의 에너지 하베스팅 프레임동안 단말 i 가 하베스팅 하게 되는 총 에너지는 다음과 같다.

$$E_i^{\text{TOT}} = \sum_{i=1}^K \rho PT |g_i^k|^2. \tag{3}$$

단말 i 가 사용 가능한 전력은 다음과 같다.

$$P_i = \frac{E_i^{\text{TOT}}}{\frac{1}{N}T} = \rho NP \sum_{i=1}^K |g_i^k|^2. \tag{4}$$

정보 전송을 하는 프레임에서 각 단말이 받게 되는 신호는 다음과 같다.

$$y_i^{\text{Inf}} = h_{j,i} x_j^{\text{Inf}} + n_i^{\text{Inf}} \tag{5}$$

x_j^{Inf} 는 단말 j 에서 보내는 정보 심볼, n_i^{Inf} 는 정보 전송을 하는 프레임에서 단말 i 의 평균 0, 분산 N_0 인 가우시안 가산 잡음이다. $E[x_j^{\text{Inf}}] = P_j$ 이다.

불능 확률은 각 홉에서 수신 SNR 이 γ 보다 작은 경우 발생하며, 다음과 같이 정의된다.

$$P_{\text{out}} = \Pr \left[\min \left\{ \frac{P_S}{N_0}, \frac{P_{R_1}}{N_0}, \frac{P_{R_2}}{N_0}, \dots, \frac{P_{R_{N-1}}}{N_0} \right\} < \gamma \right] \tag{6}$$

4. 모의실험 결과

본 모의 실험에서는 송신 신호의 전력을 10W 로 가정하였고 또한 중계기들과 수신기에서의 타겟 SNR 을 0dB 로 두었다. $N_0 = 1$ 로 두어 SNR 값을 정규화하여 사용하였다. S 와 D 사이의 거리를 1로 가정하였고 중계기의 위치를 S 와 D 를 잇는 선분에 균일하게 배치되었다고 가정하였다. 신호 감쇠 계수는 2로 가정하였다. 에너지 하베스팅 회로의 효율 ρ 을 1로 가정하였다. 그림 2에서는 중계기의 수를 4개, 즉 다섯 홉으로 작동하는 다중 홉 시스템을 가정하였다. 그림 3에서는 에너지 하베스팅 프레임의 수를 5개로 가정하였다.

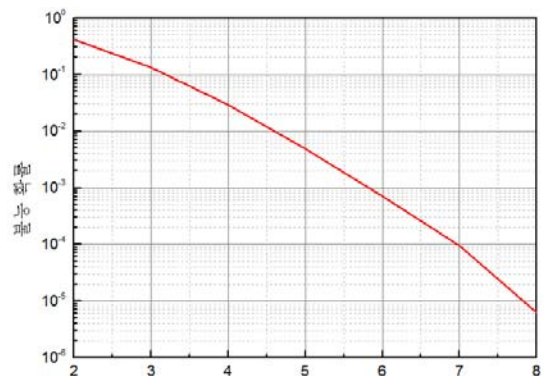


그림 2. 하베스팅 프레임 수에 대한 불능 확률 비교.

그림 2는 하베스팅 프레임 수에 대하여 불능 확률을 시뮬레이션 한 결과이다. 예상할 수 있는 대로 하베스팅 프레임 수가 증가할수록 불능확률이 매우 크게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 하지만 불능 확률이 낮은 대신 프레임을 하나 더 사용하기 때문에 처리율 측면에서는 하베스팅 프레임 수가 많아지는 것이

처리율 감소로 이어질 수 있다.

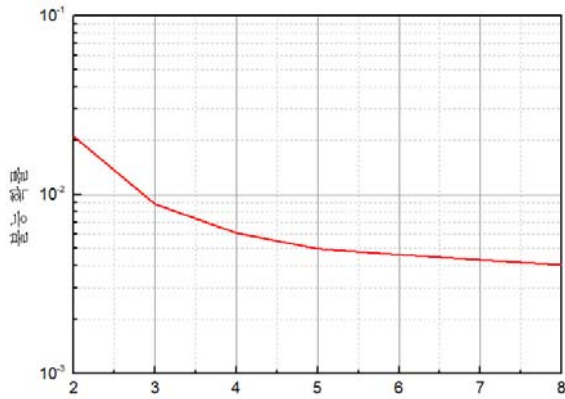


그림 3. 홉 수에 따른 불능 확률

그림 3은 홉 수에 따라서 불능 확률을 시뮬레이션 한 것이다. 홉 수가 늘어나면 불능 확률이 감소하는 결과를 얻을 수 있으나, 홉 수가 증가함에 따라 불능확률이 감소하는 정도가 줄어드는 것을 확인할 수 있다. 그러므로 일정 홉 수 이상이 넘어가면 불능 확률 측면에서의 성능은 별 차이가 없다.

5. 결론

본 논문에서는 에너지 하베스팅을 사용하는 다중 홉 중계 전송기법의 불능 확률을 시뮬레이션 하였다. 각 중계기는 복호후전송 중계 프로토콜을 사용하여 신호를 중계한다. 각 프레임은 에너지 하베스팅을 하거나 정보 전송을 하는 데 사용된다. 에너지 하베스팅 프레임에서는 파워 비콘의 신호를 에너지 하베스팅하고, 저장한 신호를 정보 전송 프레임에서 신호를 전송하는 데 사용한다. 정보 전송 프레임에서는 중계기들을 사용하여 다중 홉 전송을 하게 되며, 복호 후 전송을 하기 때문에 어느 한 홉의 신호대잡음비가 목표치보다 아래가 되면 불능이 발생한다. 모의 실험을 통하여 불능 확률은 하베스팅 프레임 수가 늘어날수록, 홉 수가 늘어날 수록 감소함을 확인하였다. 하지만 에너지 하베스팅 프레임 수가 늘어나면 처리율이 감소하는 단점이 있다. 또한 홉 수가 늘어나면 불능확률이 감소하지만 감소하는 정도가 줄어드는 것을 확인할 수 있었다. 그러므로 중계기 설치의 비용적인 측면과 처리율 측면에서 최적의 홉 수와 에너지 하베스팅 프레임 수를 정하는 것이 중요하다.

참고문헌

- [1] L. R. Varshney, "Transporting information and energy simultaneously," in *Proc. IEEE Int'l Symp. Inf. Theory*, Jul. 2008, pp. 1612– 1616.
- [2] P. Grover and A. Sahai, "Shannon meets Tesla: Wireless information and power transfer," in *Proc. IEEE Int'l Symp. Inf. Theory*, Jun. 2010, pp. 2363– 2367.
- [3] Z. Ding, I. Krikidis, B. Sharif, and H. V. Poor, "Wireless information and power transfer in cooperative networks with spatially random relays," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 13, no. 8, pp. 4440– 4453, Aug. 2014.

- [4] K. Huang and V. K. N. Lau, "Enabling wireless power transfer in cellular networks: Architecture, modeling and deployment," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 13, no. 2, pp. 902– 912, Feb. 2014.