

## 무선 인지 양방향 중계 네트워크에서 에너지 하베스팅 단말기 선택 기법의 불능 확률

임경래, 이재홍  
서울대학교

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

### Outage Probability for a Two-Way Cognitive Relay Network with User Selection in the Presence of Energy Harvesting Devices

Gyeongrae Im Jae Hong Lee

Department of Electrical and Computer Engineering, INMC  
Seoul National University

#### 요 약

본 논문은 무선 인지 네트워크에서 에너지 하베스팅을 하는 다수의 단말이 하나의 중계기를 사용하여 양방향 통신을 하는 시스템을 다룬다. 한 신호 전송 프레임은 에너지 하베스팅 단계와 신호 전송 단계로 이루어 진다. 에너지 하베스팅 단계에서 각 단말은 일차 사용자의 송신기에서 보내는 무선 에너지 신호를 이용하여 신호 전송에 필요한 에너지를 저장한다. 신호 전송 단계에서 중계기는 처리량이 가장 높은 하나의 유저 쌍을 선택하며, 선택된 유저는 중계기를 통하여 세 단계를 거쳐 정보를 교환한다. 이 때 각 단말에서의 불능 확률을 1) 중계기에서의 전송 전력이 변화할 때, 2) 단말 수가 변화할 때로 나누어 시뮬레이션 하고, 결과를 분석한다.

#### 1. 서론

Internet of Things (IoT)는 모든 사물이 유선, 무선으로 연결되어 하나의 네트워크를 이루는 것을 이른다. 전 세계적으로 IoT 에 대한 관심이 크게 증가하고 있으며, Gartner 에 따르면 2020 년에 260 억대의 IoT 단말이 인터넷에 연결될 것으로 예측하고 있다[1]. 단말의 수가 크게 증가함에 따라 단말이 사용하는 주파수 대역 부족의 문제와 에너지 소비 문제가 대두되고 있고, 이를 해결하기 위한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 무선 인지 기술과 에너지 하베스팅 기술을 결합한 연구는 단말들의 주파수 활용도를 높임과 동시에 에너지를 효율적으로 공급할 수 있게 한다[2].

양방향 중계 통신은 중첩 코딩의 사용 혹은 물리 계층에서의 네트워크 코딩을 사용함으로써 단방향 통신보다 주파수 효율을 높일 수 있다[3]. 무선 인지 네트워크에 양방향 중계 통신을 적용하면 주파수 효율을 더욱 향상시킬 수 있으며[4], 주파수 효율을 높임과 동시에 단말에 안정적으로 에너지를 공급하기 위해서 양방향 통신에 무선 인지 에너지 하베스팅을 접목시키고자 하는 연구가 이루어 지고 있다[5].

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

이 논문은 2016 년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 정보통신기술진흥센터의 지원을 받아 수행된 연구임(No. B0115-16-0001).

기존의 양방향 중계 네트워크에 무선 인지 기술과 에너지 하베스팅 기술을 접목시키고자 하는 연구에서는 중계기가 에너지 하베스팅 하여 신호를 중계하거나[6], 에너지가 확률적 모델에 따라서 단말에 도착한다고 가정하거나 일차 사용자의 송신기가 존재하지 않는다고 가정하였다[7]. 하지만 소형 단말들이 다수 존재하는 IoT 환경에서 양방향 통신을 할 때 중계기의 전송 전력이 작은 경우 단말에서 통신 불능이 일어나기 쉬우며, 중계기 보다 소형 단말들이 에너지 하베스팅 하여 에너지를 얻는다는 가정이 현실적이다. 또한 일차 사용자 송신기를 고려하는 것이 실제 상황과 밀접한 관련이 있다. 하지만 이를 고려한 연구는 아직까지 세계적으로 미진한 상태이다.

본 논문에서는 에너지 하베스팅을 하는 다수의 단말이 존재하는 무선 인지 양방향 통신 네트워크에서 다중 홉 전송 방식을 처음으로 제안하였다. 단말들은 일차 사용자가 보내는 RF 에너지를 하베스팅하여 신호 전송 프레임에서 신호 전송을 하기 위한 에너지로 사용한다. 다수 단말 중에 한 단말의 쌍이 선택되어 통신을 하며, 이를 위한 단말 선택 기법을 제안한다. 단말의 수, 중계기에서의 전송 전력이 변화함에 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

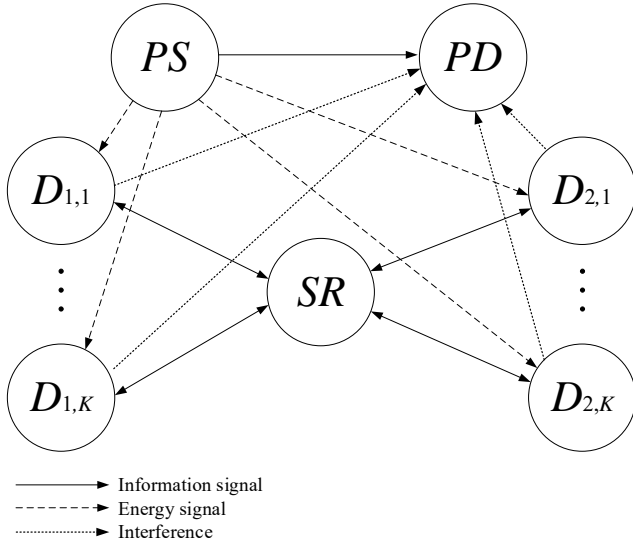


그림 1. 시스템 모델.

본 논문은 그림 1 과 같이 일차 사용자 송신기 (PS) 한 개, 일차 사용자 수신기 (PD) 한 개, 양방향 통신이 가능한 이차 사용자 중계기 (SR) 한 개,  $2K$  개의 이차 사용자 쌍으로 구성된 시스템을 다루고 있다. 수신기와 중계기는 하나의 안테나를 가지고 있으며, 반이중(half-duplex)으로 작동하고, 통신하는 이차 사용자 사이의 직경로는 없다고 가정한다.  $(1,i)$  로 색인이 되어있는 이차 사용자 ( $D_{1,i}$ )는  $(2,i)$  로 색인이 되어있는 이차 사용자 수신기 ( $D_{2,i}$ )와 통신한다고 가정한다. 이차 사용자 중계기는 복호 후 전송 중계 프로토콜을 사용하여 신호를 전송한다. 이차 사용자는 에너지 하베스팅이 가능한 단말기이며, 따로 지속적인 전력을 공급하는 장치가 없기 때문에 일차 사용자가 보낸 신호의 에너지를 하베스팅 하여 신호 전송에 필요한 에너지를 얻는다. 본 논문에서는 주파수 공유 무선 인지 네트워크를 가정한다. 이차 사용자들과 이차 사용자 중계기에서 보내는 신호는 일차 사용자 수신기에서 간섭으로 작용하기 때문에, 전송하는 신호의 세기를 조절하여 일차 사용자 수신기에서의 통신 성능을 보장하여야 한다 [8]. 일차 사용자 수신기에서 허용 가능한 최대 수신 간섭의 크기는  $Q$ 이다.

각 단말 사이의 채널  $h_{i,j}$ ,  $i, j \in \{PS, PD, SR, D_{1,1}, \dots, D_{1,K}, D_{2,1}, \dots, D_{2,K}\}$  은 평균이 0, 분산이 1 인 복소 가우시안 확률 변수로 가정한다. 채널은 상호성(reciprocity)이 있다고 가정한다. 즉,  $h_{i,j} = h_{j,i}$  이다. 또한 채널 정보는 프레임마다 독립적인 값을 가지며 프레임 단위로 변화한다고 가정한다. 각 채널은 크기가  $N_0$  인 부가 백색 가우스 잡음을 가지는 채널이다.

길이가  $T$  인 프레임은  $\alpha T$  의 길이를 갖는 에너지 하베스팅 단계와  $(1-\alpha)T$  의 길이를 갖는 정보 전송 단계로 이루어 지는데, 정보 전송 단계는 3 개의 하위 단계로 이루어진다.

에너지 하베스팅을 하는 단계에서 이차 사용자들은 일차 사용자가 전송하는 신호를 RF (radio frequency) 에너지 하베스팅 한다.  $\alpha T$  시간동안 에너지를 하베스팅 한 후 정보 전송 단계에 신호 전송을 한다.

정보 전송을 하는 프레임은 3 개의 단계로 나누어진다. 각 단계는  $(1-\alpha)T/3$  의 동일한 시간을 갖는다고 가정한다. 정보 전송을 하는 단계 바로 직전에 이차 사용자 중계기는 통신하기 위한 이차 사용자 쌍을 선택한다. 본 논문에서는 이차 사용자 쌍의 양 끝간 신호대잡음비가 가장 높은 이차 사용자 쌍을 선택한다. 이를 계산하기 위한 시간은 무시 가능할 만큼 짧다고 가정한다. 선택된 이차 사용자의 쌍을  $D_{1,i^*} - D_{2,i^*}$  이라고 가정하자. 첫 번째 하위 단계에서  $D_{1,i^*}$  은 에너지 하베스팅 단계에서 저장한 에너지를 사용하여 이차 사용자 중계기에 정보 신호를 전송하고 SR 은 이를 수신 한 뒤 복호를 시도한다. 두 번째 하위단계에서  $D_{2,i^*}$  가 저장한 에너지를 사용하여 이차 사용자 중계기에 정보 신호를 전송하고, 이차 사용자 중계기는 복호를 시도한다. 세 번째 하위단계에서 이차 사용자 중계기는 복호에 성공한 두 신호를 중첩 코딩 한 후  $D_{1,i^*}, D_{2,i^*}$  에 동시 전송한다. 어느 하나의 하위 단계에서 이차 사용자 혹은 이차 사용자 중계기가 수신한 신호의 신호대잡음비(signal-to-noise-ratio, SNR)이 목표한 SNR 크기인  $\gamma$  보다 작으면 불능으로 간주한다.

## 3. 신호 전송 및 불능 확률

에너지 하베스팅 단계에서 단말이 받게 되는 에너지 신호는 다음과 같다.

$$y_{D_{j,i}}^{EH} = \sqrt{P_{PS}} h_{PS,D_{j,i}} x_{PS} + n_{D_{j,i}}^{EH}, \quad j \in \{1,2\}, i \in \{1, \dots, K\}. \quad (1)$$

$x_{PS}$  는 일차 사용자 송신기의 정보 심볼이며,  $P_{PS}$  는 일차 사용자 송신기의 전송전력,  $n_{D_{j,i}}^{EH}$  은  $D_{i,j}$  에서의 가산 잡음이다. 이차 사용자  $D_{i,j}$  가 하베스팅 하게 되는 에너지의 크기는 다음과 같다.

$$E_{D_{i,j}} = \rho P_{PS} \alpha T |h_{PS,D_{i,j}}|^2. \quad (2)$$

단말  $D_{i,j}$  가 사용 가능한 최대 전력은 다음과 같다.

$$P_i = \frac{E_{D_{i,j}}}{(1-\alpha)T/3} = \frac{3\rho P_{PS} \alpha |h_{PS,D_{i,j}}|^2}{1-\alpha}. \quad (3)$$

정보 전송 단계에서는 선택된 이차 사용자 쌍  $D_{1,i^*} - D_{2,i^*}$  이 정보를 교환하게 된다.  $j$ ,  $j \in \{1,2\}$ , 번째 하위 단계에서는  $D_{j,i^*}$  가 정보를 전송한다. 이차 사용자 중계기에서 수신하는 신호는 다음과 같다.

$$y_{SR}^j = \sqrt{P_{D_{j,i^*}}} h_{D_{j,i^*},SR} x_{D_{j,i^*}} + n_{SR}^j \quad (4)$$

$x_{D_{j,i^*}}$  는  $D_{j,i^*}$  에서 보내는 정보 심볼,  $n_{SR}^j$  는 이차 사용자 중계기가  $j$  번째 하위 단계에서 받게 되는 가우시안 가산 잡음이다.  $P_{D_{j,i^*}}$  는  $D_{j,i^*}$  에서의 전송 전력이며,  $P_{D_{j,i^*}}$  는 하베스팅한 에너지의 양과 일차 사용자로의 간섭을 고려하여 다음과 같이 제한된다.

$$P_{D_{j,i^*}} \leq \min \left\{ \frac{Q}{|h_{D_{j,i^*},PD}|^2}, \frac{3\rho P_{PS} \alpha |h_{PS,D_{j,i^*}}|^2}{1-\alpha} \right\} \quad (5)$$

$j$  번째 하위 단계에서 SR 에서의 수신 SNR 은 다음과 같다.

$$\gamma_{SR}^j = \frac{|h_{D_{j,i^*},SR}|^2}{N_0} \min \left\{ \frac{Q}{|h_{D_{j,i^*},PD}|^2}, \frac{3\rho P_{PS}\alpha |h_{PS,D_{j,i^*}}|^2}{1-\alpha} \right\}. \quad (6)$$

세 번째 하위 단계에서는 이차 사용자 중계기가 정보를 전송한다. 첫 번째, 두 번째 하위 단계에서 받은 신호를 복호 한 심볼들을 중첩하여 새 심볼을 생성하며, 이를  $D_{1,i^*}$  과  $D_{2,i^*}$  에 동시에 전송한다. 이차 사용자  $D_{j,i^*}$ ,  $j \in \{1,2\}$ , 에서 수신하는 신호는 다음과 같다.

$$y_{D_{j,i^*}}^3 = \sqrt{P_{SR}} h_{SR,D_{j,i^*}} x_{SR} + n_{D_{j,i^*}}^3 \quad (7)$$

$n_{D_{j,i^*}}^3$  는 이차 사용자  $D_{j,i^*}$  가 세번째 하위단계에서 받게 되는 가우시안 가산 잡음이다.  $x_{SR}$  는 SR 에서 보내는 정보 심볼이며 다음과 같이 정해진다.

$$x_{SR} = x_{D_{1,i^*}} \oplus x_{D_{2,i^*}} \quad (8)$$

$\oplus$  는 XOR 연산자이다.  $P_{SR}$  은 SR 에서의 전송 전력이며,  $P_{SR}$  은 에너지의 양과 이차 사용자로의 간섭을 고려하여 다음과 같이 제한된다.

$$P_{SR} \leq \min \left\{ \frac{Q}{|h_{SR,PD}|^2}, P_{SR}^{\max} \right\}. \quad (9)$$

$P_{SR}^{\max}$  은 SR 에서 최대로 송신할 수 있는 전력이다.  $D_{j,i^*}$  에서는 자신의 신호, 즉  $x_{D_{j,i^*}}$  를 간섭제거를 통해서 없앨 수 있으며, 세 번째 하위단계에서 간섭 제거 후  $D_{j,i^*}$ ,  $j \in \{1,2\}$ , 에서의 수신 SNR 은 다음과 같다.

$$\gamma_{D_{j,i^*}}^3 = \frac{|h_{SR,D_{j,i^*}}|^2}{N_0} \min \left\{ \frac{Q}{|h_{SR,PD}|^2}, P_{SR}^{\max} \right\}. \quad (10)$$

위에서 전개된 수식들을 바탕으로, 이차 사용자간의 수신 SNR 을 최대화 하기 위한 이차 사용자 쌍의 선택 기준은 다음과 같다.

$$i^* = \arg \max_i \min \{ \gamma_{D_{1,i^*}}^3, \gamma_{D_{2,i^*}}^3 \} \quad (11)$$

$D_{j,i^*}$  에서의 불능 확률은 첫 번째, 두 번째 정보 전송 하위 단계의 이차 사용자 중계기 SNR 이  $\gamma$  보다 작거나, 세번째 하위단계에서  $D_{j,i^*}$  에서의 SNU 이  $\gamma$  보다 작은 경우 발생하며, 다음과 같이 정의된다.

$$P_{out} = \Pr[\gamma_{SR}^1 < \gamma] + \Pr[\gamma_{SR}^2 < \gamma, \gamma_{SR}^1 > \gamma] + \Pr[\gamma_{D_{j,i^*}}^3 < \gamma, \gamma_{SR}^2 > \gamma, \gamma_{SR}^1 > \gamma]. \quad (12)$$

#### 4. 모의실험 결과 및 결론

본 모의 실험에서는 일차 사용자와 이차 사용자 중계기에서의 최대 송신 신호의 전력 ( $P_{PS}$ ,  $P_{SR}^{\max}$ )을 10W 로 가정하였고 이차 사용자 중계기와 이차 사용자들의 타겟 SNR 을  $\gamma = 0.1$  로 두었다.  $N_0 = 1$  로 두어 SNR 값을 정규화하여 사용하였다. 에너지 하베스팅 회로의 효율  $\rho$  는 상수값이며 1 로 가정하였다. 모든 채널의 분산을 1 로 가정하였다. 시행횟수 50 만번의 몬테 카를로 시뮬레이션을 사용하였다.

그림 2 에서는  $K = 5$ , 즉 이차 사용자 쌍의 수를 다섯으로 가정하였다. 또한 일차 사용자 송신기와 이차 사용자 중계기가 사용할 수 있는 최대 전력은 10W 로 가정하였다. 그림 3 에서는 일차 사용자 수신기에서의 최대 허용 전력 크기를 10W 로 가정하였다.

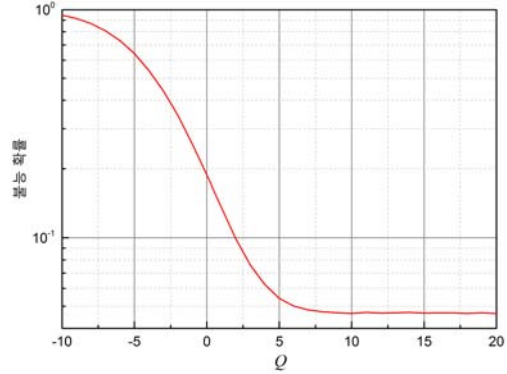


그림 2. 일차 사용자 수신기에서의 간섭 제한에 따른 불능 확률

그림 2 는 일차 사용자 수신기에서의 허용 간섭 전력 크기 제한에 따라 불능 확률을 시뮬레이션 한 결과이다. 허용 간섭 크기가 증가할수록 불능 확률이 떨어지는 것은 일차 사용자 송신기와 이차 사용자 중계기, 이차 사용자들이 송신할 수 있는 전력의 최대치가 증가하여 SNR 이 좋아지기 때문이다. 하지만  $Q$  가 5W 이상일 때는 불능 확률이 더 이상 감소하지 않고 일정 값으로 유지되는 것을 확인할 수 있는데, 이는 단말 들에서 전송 전력의 최대치를 사용하여도 일차 사용자 수신기가 허용하는 간섭의 크기를 넘지 못하기 때문이다.

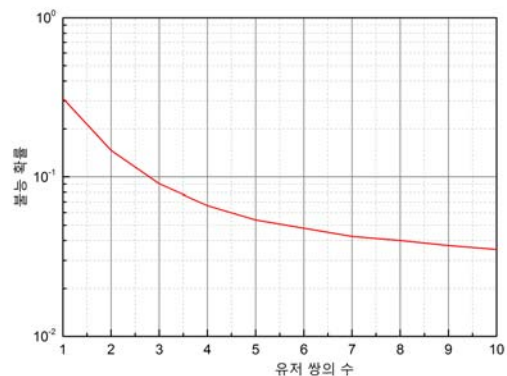


그림 3. 이차 사용자 쌍의 수에 따른 불능 확률

그림 3 은 이차 사용자 쌍의 수  $K$  에 따라서 불능 확률을 시뮬레이션 한 것이다. 이차 사용자 쌍의 수가 늘어나면 다이버시티 효과를 얻을 수 있어 불능 확률이 지속적으로 감소하는 결과를 얻을 수 있으나, 이차 사용자 쌍의 수가 늘어날수록 감소하는 정도가 줄어드는 것을 확인할 수 있다.

## 참고문헌

- [1] Gartner, (2014, Oct. 20). Forecast: Internet of Things, Endpoints and Associated Services, Worldwide, 2014. Available: <https://www.gartner.com/doc/2880717/forecast-internet-things-endpoints-associated>
- [2] X. Lu, P. Wang, D. Niyato, D. I. Kim, and Z. Han, Poor, "Wireless networks with RF energy harvesting: A contemporary survey," *IEEE Communications Survey & Tutorials*, vol. 17, no. 2, pp. 757–789, Second Quarter, 2015.
- [3] B. Rankov and A. Wittneben, "Spectral efficient protocols for half-duplex fading relay channels," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 25, no. 2, pp. 379–389, Nov. 2007.
- [4] Z. Ding, I. Krikidis, B. Sharif, and H. V. Poor, "Simultaneous wireless information and power transfer for cognitive two-way relaying networks," in *Proc. 2014 IEEE 25th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communication (PIMRC)*, Washington, 2014, pp. 748–752.
- [5] D. K. Nguyen, M. Matthaiou, T. Q. Duong, and H. Ochi, "RF energy harvesting two-way cognitive DF relaying with transceiver impairments," in *Proc. 2015 IEEE International Conference on Communications (ICC)*, London, UK, 2015, pp. 1970–1975.
- [6] S. Singh, S. Modem, and S. Prakriya, "Optimization of cognitive two-way networks with energy harvesting relays," *IEEE Commun. Lett.*, to be published.
- [7] D. K. Nguyen, D. N. K. Jayakody, S. Chatzinotas, J. Thomson, and J. Li, "Wireless energy harvesting assisted two-way cognitive relay networks: Protocol design and performance analysis," *IEEE Access*, to be published.
- [8] W. Xu, J. Zhang, P. Zhang, and C. Tellambura, "Outage probability of decode-and-forward cognitive relay in presence of primary user's interference," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 16, no. 8, pp. 1252–1255, Aug. 2012.