

# 인지 무선 중계 시스템에서 에너지 하베스팅을 사용하는 중계기 선택 기법의 불능 확률

임경래, 이재홍  
서울대학교

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

## Outage Probability of Relay Selection in Cognitive Relay Network(CRN) with Energy Harvesting Relays

Gyeongrae Im Jae Hong Lee

Department of Electrical and Computer Engineering, INMC  
Seoul National University

### 요 약

에너지 하베스팅 기술은 외부의 지속적인 에너지 공급 없이 통신 시스템의 수명을 오랫동안 유지할 수 있는 수단의 하나로 각광받고 있다. 최근에는 수신한 신호에서 에너지를 얻는 전력 분배의 기법이 제안되었다. 본 논문에서는 인지 무선 통신 시스템에서 이차 사용자가 에너지 하베스팅을 사용하는 중계기를 사용할 때 중계기들 중 하나를 선택하는 기법의 불능 확률을 분석한다. 중계기는 전력 분배의 기법을 사용하여 에너지를 저장하며 선택된 중계기는 수신한 신호를 복호 후 전송한다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 간섭 제약 조건과 이차 사용자의 중계기 수가 달라질 때의 불능 확률을 살펴본다.

### 1. 서론

최근 무선통신의 수요가 크게 늘어남에 따라 에너지의 효율적인 사용이 중요한 문제가 되었다. 에너지 하베스팅 기술은 전력선 설치나 충전기의 교체 없이 에너지가 제약적인 네트워크의 수명을 크게 늘일 수 있는 방법의 하나로 각광받고 있다. 기존의 에너지 하베스팅 기술은 주변 환경에서 태양광이나 풍력발전 등을 이용하여 전력 공급을 하였지만, 이러한 환경적 조건을 이용하기 힘든 무선 네트워크의 경우를 위하여 simultaneous wireless information and power transfer (SWIFT) 개념이 제안되었다[1], [2].

[1]과 [2]에서 제안된 SWIFT 는 수신기에서 에너지 하베스팅과 정보 디코딩을 동시에 할 수 있다고 가정하였다. 하지만 현재 현실적으로 구현 가능한 회로는 두 가지를 동시에 처리할 수 없으므로 수신기에서 에너지 하베스팅과 정보 디코딩을 시간에 따라 나누어 사용하는 시분할(time splitting, TS) 기법과 관측된 동일한 RF 신호에서 일부는 에너지 하베스팅을 하고 나머지는 정보 디코딩에 이용하는 전력 분할(power splitting, PS)의 기법이 제안되었다[3], [4].

SWIFT 는 다양한 무선 통신 시스템에 적용되어 왔다.

이 논문은 2014 년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2009-0083495, 2011-0017437).

예를 들면 [5]에서는 SWIPT 가 협력통신에 적용되었다. 공간적 특성을 고려하여 위치되어 있는 다중 중계기들은 송신기로부터 에너지를 하베스팅 하여 수신기로 신호 전송을 한다. 이 때 중계기 선택기법에 따른 불능 확률이 분석되었다. [6]에서는 SWIFT 를 사용하는 환경에서 최적의 빔포밍과 전력 분배를 통하여 보안성을 높이는 방법이 제안되었다.

인지 무선 통신은 이차 사용자가 일차 사용자의 성능을 보장하는 선에서 같은 주파수 대역을 공유하여 사용하게 함으로써 주파수 효율을 높이는 기법이다. 인지 무선 환경에서 이차 사용자의 송신기가 에너지 하베스팅을 사용하면서 기회적으로 일차 사용자의 중계기로 사용되는 기법이 제안되었다[7].

현재까지의 SWIFT 를 사용하는 인지 무선환경에서 이차 사용자가 중계기를 사용하는 경우는 대부분 이차 사용자의 송신기가 일차 사용자로부터 에너지를 하베스팅 하여 기회적으로 이차 사용자 수신기에게 원하는 신호를 보내는 기법을 고려하였다. 본 논문에서는 이차 사용자의 다중 중계기가 PS 기법을 사용하며 이중 가장 성능이 좋은 중계기를 선택하여 사용하는 기회적 중계 기법을 제안한다. 시스템의 성능은 불능 확률로 나타내고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2 절에서는 시스템 모델을 설정하고 불능 조건을 확인한다. 3 절에서는 제안한 기법에 대한 불능 확률을 수치적으로 확인하며, 마지막으로 4 절에서는 본 논문에 대한 결론을 맺는다.

## 2. 시스템 모델

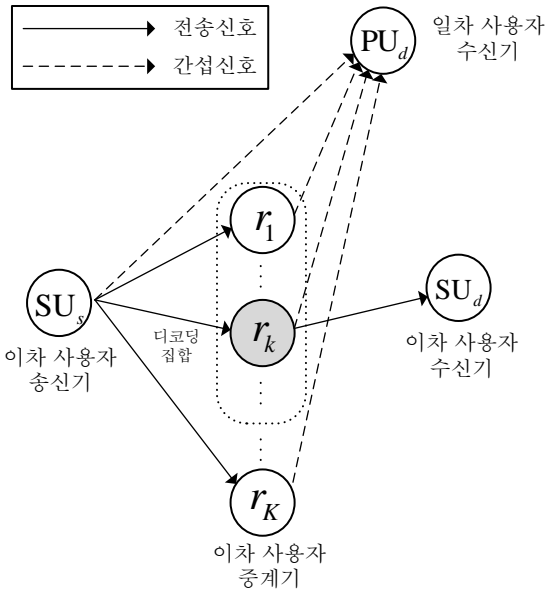


그림 1. 시스템 모델.

이 논문은 그림 1 과 같이 하나의 일차 사용자 수신기 ( $PU_d$ ), 하나의 이차 사용자 송신기 ( $SU_s$ ),  $K$  개의 이차 사용자 중계기 ( $r_k, k=1 \dots K$ ), 하나의 이차 사용자 수신기 ( $SU_d$ ) 로 구성된 시스템을 다루고 있다. 각 단말기와 중계기는 하나의 안테나를 가지고 있으며, 이차 사용자의 송신기와 수신기 사이의 직경로는 없다고 가정한다. 신호 전송은 두 단계를 통해 이루어진다. 각 신호 전송 단계에 소요되는 시간은  $1/2$  로 가정한다.

이차 사용자는 일차 사용자에게 할당된 주파수 대역을 공유하여 사용한다. 이 때  $SU_s$  와 중계기에서 보내는 신호는  $PU_d$  에서 간섭으로 작용하게 되는데 이 간섭의 전력이 기준으로 정해진 값  $Q$  보다 작아야 한다.  $SU_s$  는  $r_k, k=1, 2, \dots, K$  에게 데이터를 전송한다. 우선  $r_k$  는 수신한 신호를 에너지 하베스팅 회로로 보내어 수신한 신호의 전력의 일부분을 에너지로 저장한다. 에너지 하베스팅 후 남은 신호를 디코딩 회로로 보내어 디코딩을 시도한다. 디코딩을 시도한 중계기 중에서 송신기로부터 수신 받은 신호를 성공적으로 디코딩한 중계기의 집합을 디코딩 집합  $D$  라고 하자. 신호 전송의 첫 번째 단계에서 하베스팅한 에너지를 기반으로 두 번째 단계에서 선택된 중계기가  $SU_d$  로 신호를 전송하게 된다. 이때 선택되는 중계기는 디코딩 집합  $D$  안에 포함되면서  $SU_d$  에서 수신기에서의 수신 신호 대 잡음비 SNR 를 최대로 하는 중계기가 선택되어 신호를 전송하게 된다. 이차 사용자 수신기에서의 수신 SNR 이 기준으로 설정한 SNR 보다 낮으면 불능으로 간주한다.

이차 사용자 송신기로부터 중계기  $r_k$  까지의 채널 계수  $h_{s,r_k}, k=1, 2, \dots, K$  와 중계기  $r_k$  에서 이차 사용자 수신기까지의 채널 계수  $g_{r_k,d}, k=1, 2, \dots, K$ , 이차 사용자

송신기로부터 일차 사용자 송신기  $PU_d$  까지의 채널 계수  $h_{s,d}$  와 중계기  $r_k$  에서 일차 사용자 송신기  $PU_d$  까지의 채널 계수  $g_{r_k,d}$  는 평균이 0, 분산이 1 인 복소 가우시안 확률 변수이다. 중계기  $r_k$  에서의 전력 분할 상수를  $\theta_k$  라 하자. 이차 사용자 송신기에서 사용할 수 있는 최대전력은  $P_{max}$  이다. 일차 사용자 수신기에서의 허용 가능한 간섭의 세기를  $Q$  라고 하자. 일차 사용자 수신기로의 간섭 조건을 고려하여 이차 사용자 송신기에서 송신에 사용하는 전력은  $P_s = \min(P_{max}, \frac{Q}{|h_{sd}|^2})$  이다.  $x$  는 보내고자 하는 정보이며  $E[x^2]=1$  이라 가정한다. 또한  $n_k$  는 중계기  $r_k$  에의 가산 잡음이다. 신호 전송 첫 단계에서 중계기  $r_k$  에서의 수신 신호는 다음과 같이 주어진다[8].

$$y_k = \sqrt{P_s(1-\theta_k)}h_{s,r_k}x + n_k. \quad (1)$$

이차 사용자의 각 중계기에서 디코딩 가능한 신호의 임계 레이트를  $R$  로 모두 같다고 설정하면 중계기  $r_k$  에서의 전력 분배 상수는 다음과 같이 정해져야 한다.

$$\theta_k \leq \max \left\{ 0, 1 - \frac{(2^{2R} - 1)}{P_s |h_{s,r_k}|^2} \right\}. \quad (2)$$

(2) 에서 전력 분할 계수가 0 인 경우는 수신한 전력이 기준 이하가 되어 디코딩에 실패한 중계기이고, 0 이 아닌 경우는 디코딩을 성공했으며 하베스팅한 에너지가 남아있는 경우를 의미한다. 중계기에서는 이차 사용자 송신기로부터 수신한 신호의 일부를 하베스팅하여 저장된 전력을 두 번째 단계에서의 신호전송에 사용하게 된다. 에너지 하베스팅 회로의 효율을  $\eta$  라고 하면 중계기  $r_k$  에서 저장된 에너지는

$E_k = \frac{\eta}{2}(|h_{s,r_k}|^2 P_s - 2^{2R} + 1)$  이다. 그러므로 중계기가 사용할 수 있는 최대 전력은  $P_{k,max} = \eta(|h_{s,r_k}|^2 P_s - 2^{2R} + 1)$  이다. 신호

전송의 두 번째 단계에서 신호를 보내기 위하여 선택된 중계기를  $r_{k'}$  라고 하자. 이 중계기는  $D$  에 있으면서 이차 사용자 중계기에서 수신 SNR 을 최대로 할 수 있는 것으로 선택된다. 이 때 중계기가 신호 전송에 사용하는 전력은

$P_{k'} = \min(P_{k',max}, \frac{Q}{|g_{r_{k'},d}|^2})$  이다. 두 번째 신호 전송 단계에서 이차 사용자 수신기가 받게 되는 신호는 다음과 같다.

$$y_d = \sqrt{P_{k'}}h_{r_{k'},d}x + n_d. \quad (3)$$

(3)의 식을 바탕으로, 디코딩에 성공할 수 있는 신호의 기준 SNR 을  $\gamma_0$  라 하면 불능 확률은 다음 식과 같이 표현된다.

$$P_{out} = P(P_{r_{k'}} |h_{r_{k'},d}|^2 < \gamma_0). \quad (4)$$

## 3. 모의실험 결과

본 모의 실험에서는 송신 신호의 SNR 을 10 dB 로 두었고, 또한 이차 사용자 수신기에서의 타겟 SNR 을 1 dB 로 두었다. 에너지 하베스팅 회로의 효율을 1 로 가정하였으며 에너지 하베스팅을 하는 중계기의 임계 레이트를 1 dB 로 가정하였다.

그림 2 는 일차 사용자의 수신기에서 간섭 제한이 변화될

때의 불능 확률을 여러  $K$  에 대하여 보인 것이다. 그림 2 에서 확인할 수 있듯이, 허용 간섭의 크기가 커지면 불능 확률이 감소한다. 또한 이차 사용자가 사용하는 중계기의 수가 많아질수록 불능 확률이 감소함을 확인할 수 있다.

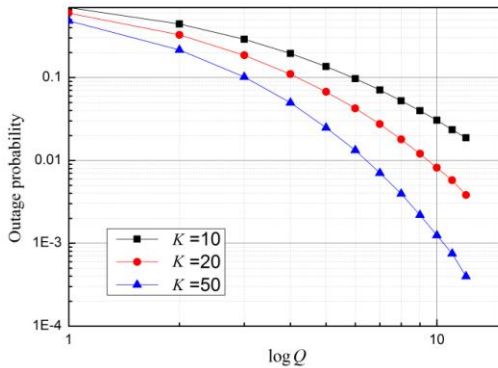


그림 2. 여러  $K$  값에 대한 불능 확률 비교.

#### 4. 결론

본 논문에서는 인지 무선 환경에서 일차 사용자와 주파수 대역을 공유하여 사용하는 이차 사용자가 신호 전송에 에너지 하베스팅이 가능한 다중 중계기를 사용하였을 때 수신 SNR 을 최대로 하는 중계기 선택 기법을 제안하고 불능 확률을 분석하였다. 일차 사용자의 성능을 보장하기 위하여 이차 사용자의 송신전력과 중계기에서의 송신 전력의 제한을 고려하였다. 모의 실험을 통하여 사용하는 중계기의 수가 늘어났을 때 불능 확률이 감소하며, 일차 사용자 수신기에서의 간섭 제한이 엄격해지면 불능 확률이 증가함을 확인하였다.

#### 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] X. Zhou, R. Zhang, and C. K. Ho, "Wireless information and power transfer: Architecture design and rate-energy tradeoff," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 61, no. 11, pp. 4754- 4767, Nov. 2013.
- [4] A. A. Nasir, X. Zhou, S. Durrani, and R. A. Kennedy, "Relaying protocols for wireless energy harvesting and information processing," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 12, no. 7, pp. 3622- 3636, Jul. 2013.
- [5] 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.

- [6] L. Liu, R. Zhang, and K. C. Chua, "Secrecy wireless information and power transfer with MISO beamforming," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 62, no. 7, pp. 1850- 1863, Apr. 2014.
- [7] S. Yin, E. Zhang, Z. Qu, L. Yin, and S. Li, "Optimal cooperation strategy in cognitive radio systems with energy harvesting," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 13, no. 9, pp. 4693-4707, Sep. 2014.
- [8] Z. Ding, S. M. Perlaza, I. Esnaola, and H. V. Poor, "Power allocation strategies in energy harvesting wireless cooperative networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 13, no. 2, pp. 846-860, Feb. 2014.