

RF 충전 인지 무선 네트워크에서 2-채널 센싱 2차 사용자의 Energy Outage 확률 및 패킷 전송 성능

오 선 애*, 신 요 안°, 김 동 인*

Energy Outage Probability and Achievable Throughput of 2-Channel Sensing Secondary Users in RF Powered Cognitive Radio Networks

Shanai Wu*, Yoan Shin°, Dong In Kim*

요 약

본 논문에서는 인지 무선 (Cognitive Radio; CR) 네트워크에서 Radio Frequency (RF) 에너지 수집 (Energy Harvesting; EH) 기능을 갖는 2차 사용자 (Secondary User; SU)가 최대 2개의 서로 다른 채널을 순차적으로 센싱하여 주사용자 (Primary User; PU)가 사용하지 않고 비어 있는 채널을 확보하는 경우를 고려하였다. EH SU는 데이터를 전송하기 위해 비어 있는 채널을 정확하게 검출해야 할 뿐만 아니라 충분한 에너지를 보유하고 있어야 한다. 기존의 SU와 마찬가지로 데이터 전송에 의한 에너지 소모와 더불어 자체적으로 에너지 수집이 가능하기 때문에 EH SU의 에너지 상태는 감소와 증가를 반복하게 되며, 본 논문에서는 이와 같은 EH SU의 배터리 상태를 Markov 모델로 구축하였다. 해당 모델로부터 EH SU가 에너지를 완전히 소모할 안정상태 확률을 도출하였으며, 이에 근거하여 패킷을 성공적으로 전송할 확률을 도출하였다. 제안된 Markov 배터리 모델을 분석하기 위해 Monte-Carlo 모의실험을 진행하여 Energy Outage 확률과 패킷 전송 성능 분석의 정확성을 검증하였다.

Key Words : energy harvesting, cognitive radio, Markov battery model, 2-channel sensing, energy outage, achievable throughput

ABSTRACT

In this paper, we consider the secondary users (SUs) who are capable of harvesting energy from ambient radio frequency (RF) signals and are allowed to sequentially sense up to 2 different channels to find out idle channels not occupied by the primary users (PUs). The EH SUs are permitted to transmit data packets only if both idle channels and sufficient energy are available. Compared with traditional SUs, the EH SUs consume energy with data transmission and also harvest energy without additional energy supply. Consequently, the battery state is expected to be fluctuated due to energy consumption and harvesting, and therefore we develop a Markov battery model to provide energy variations at the 2-channel sensing EH SUs. With the proposed battery model, we derive the steady-state probability that the EH SUs completely run out of energy, and the achievable

* 본 연구는 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업 (2013R1A1A2059500) 및 2014년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행되었음 (2014R1A5A1011478).

♦ First Author : Soongsil University, School of Electronic Engineering, sunae0814@ssu.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : Soongsil University, School of Electronic Engineering, yashin@ssu.ac.kr, 종신회원

* Sungkyunkwan University, School of Information and Communication Engineering, dikim@skku.ac.kr, 종신회원

논문번호 : KICS2016-08-197, Received August 13, 2016; Revised September 5, 2016; Accepted September 5, 2016

throughput of EH SUs is derived accordingly. To evaluate the proposed Markov battery model, the Monte-Carlo simulation was performed to validate the accuracy of energy outage probability and achievable throughput at the 2-channel sensing EH SUs.

I. 서 론

에너지 수집 (Energy Harvesting; EH) 기능을 갖는 단말들은 태양광, 풍력, 진동 등으로부터 자체적으로 에너지를 수집하여 외부의 전원 공급 없이도 지속적으로 작동 가능하다. 스마트 단말기의 보급에 따라 Radio Frequency (RF) 신호가 늘 주변에 존재하기 때문에, 정보와 에너지를 모두 전송하는 RF 신호로부터 에너지를 수집하고자 하는 RF EH 기술이 Self-Sustainable 에너지 공급 기술로 주목받고 있다^[1]. EH 단말은 RF 신호를 전기로 전환하여 정보 처리 및 전송에 사용하며 무선 충전 시스템, 무선 센서 네트워크 등에서의 RF EH 응용 방안이 제안되었다^[2,3]. 저전력 무선 센서 노드들로 구성된 사물 인터넷 (Internet of Things; IoT) 환경이나 무선 센서 네트워크에서 RF 무선 충전 기술을 적용하여 센서 노드들의 배터리 수명을 연장할 수 있으며, 이와 같은 RF 무선 충전 기술의 응용을 위한 테스트베드가 구현되었다^[4,5]. 또한 저전력 센서 노드들의 원거리 통신을 위해 Backscatter 통신을 접목한 RF 무선 충전 통신 네트워크에 대한 연구도 진행되었다^[6].

에너지 사용 효율과 더불어 주파수 이용 효율은 무선 통신 시스템에서 해결해야 할 중요한 문제점 중의 하나이다. 급증하는 주파수 자원에 대한 요구를 만족하고 주파수 이용 효율 극대화를 위해 동적 스펙트럼 접근 방식의 하나인 인지 무선 (Cognitive Radio; CR) 기술이 제안되었다^[7]. 따라서 최근 들어 RF EH와 CR 기술의 결합 연구를 통해 주파수 이용 효율과 에너지 사용 효율을 동시에 개선하고자 하는 연구들이 다양한 접근 방식으로 활발히 진행되고 있다^[8-13].

CR 네트워크에서 EH 기능을 갖는 2차 사용자 (Secondary User; SU)는 주사용자 (Primary User; PU)로 인해 실제로 사용되지 않고 비어 있는 주파수 대역에 접근하여 데이터를 전송한다. 성공적인 데이터 전송을 위해 EH SU는 비어 있는 채널뿐만 아니라 전송에 필요한 에너지를 확보하여야 한다. 데이터 전송으로 인한 에너지 소모와 RF 신호로부터의 에너지 수집에 따라 EH SU가 보유하고 있는 에너지는 감소와 증가를 반복하게 되며, 앞서 저자들은 [14]에서 이러한 에너지 상태의 변화를 제공하는 EH SU의 Markov

배터리 모델을 제안하였다. 이를 기반으로 본 논문에서는 더 많은 데이터 전송 기회를 확보하기 위해 최대 2개의 서로 다른 채널을 순차적으로 센싱하는 2-채널 센싱 EH SU의 Markov 배터리 모델을 제안한다. 해당 모델로부터 EH SU가 에너지를 완전히 소모할 Energy Outage 확률과 패킷을 성공적으로 전송할 확률을 도출하며, Monte-Carlo 모의실험을 통해 분석의 정확성을 검증한다.

II. RF 충전 CR 네트워크

2.1 시스템 모델

본 논문에서는 슬롯 구간이 $T \in \mathbb{N}$ 인 RF 충전 CR 네트워크를 고려하였으며, 여기서 \mathbb{N} 은 자연수의 집합을 의미한다. 채널 상태 C 는 PU의 데이터 전송 패킷에 따라 변화하며 그림 1과 같이 서로 상관된 2개의 상태 {idle($C=0$), occupied($C=1$)}로 모델링할 수 있다. 현재 슬롯에서 채널이 PU에 의해 사용되고 있지 않으면 다음 슬롯에서도 확률 q_i 로 비어 있게 되며 $1 - q_i$ 의 확률로 PU에 의해 점유된다. 동일하게 현재 슬롯에서 채널이 PU에 의해 사용되고 있으면 다음 슬롯에서도 확률 q_o 로 점유되고 $1 - q_o$ 의 확률로 비어 있게 된다. 따라서 채널이 비어 있을 안정상태 확률을 π_i , PU에 의해 점유될 안정상태 확률을 π_o 라 할 때, 안정상태에서 식 (1)과 같은 평형 방정식을 만족하게 된다.

$$[\pi_i \ \pi_o] = [\pi_i \ \pi_o] \begin{bmatrix} q_i & 1 - q_i \\ 1 - q_o & q_o \end{bmatrix}. \quad (1)$$

그러므로 슬롯 m 에서 π_i 와 π_o 는 각각 다음과 같게 된다.

$$\pi_i = \Pr(C_m = 0) = \frac{1 - q_o}{2 - q_i - q_o}. \quad (2)$$

$$\pi_o = \Pr(C_m = 1) = \frac{1 - q_i}{2 - q_i - q_o}. \quad (3)$$

본 논문에서 고려하는 2-채널 센싱 EH SU는 RF

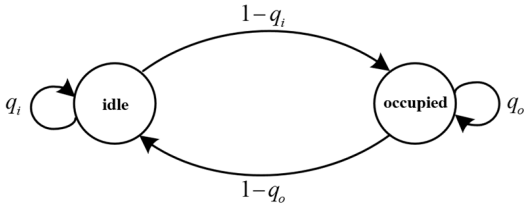


그림 1. 채널 상태 천이 다이어그램
Fig. 1. Channel state transition diagram

송수신기와 독립적이고 분리된 안테나를 사용하는 RF Energy Harvester (즉, EH 보드)로부터 에너지를 수집한다고 가정하였다¹¹. 또한 데이터 전송과 에너지 수집 효율을 상호 저하시키는 것을 회피하기 위해 EH 보드는 EH SU의 데이터 전송에 사용되지 않는 주파수 대역에 접근하여 에너지를 수집한다고 가정하였으며, 한 개의 슬롯 동안에 에너지 수집을 e_n 로 에너지를 수집하게 된다. 한편, EH 보드가 주변의 RF 신호로부터 수집하는 에너지를 제외한 별도의 에너지 공급을 고려하지 않았다. 이 때, 채널 상태와 동일하게 EH 보드에서의 에너지 수집도 다음과 같이 서로 상관된 2개의 상태 (*on*: energy arrives, *off*: no energy arrives)로 모델링할 수 있다.

$$\Pr \begin{pmatrix} on|on & off|on \\ on|off & off|off \end{pmatrix} = \begin{bmatrix} p_{on} & 1-p_{on} \\ 1-p_{off} & p_{off} \end{bmatrix}, \quad (4)$$

여기서 p_{on} 은 EH 보드가 현재 슬롯에서 에너지를 수집하면 다음 슬롯에서도 에너지를 수집할 확률, p_{off} 는 현재 슬롯에서 에너지를 수집하지 않는 경우에 다음 슬롯에서도 에너지를 수집하지 않을 확률을 의미한다.

따라서 EH 보드가 에너지를 수집할 안정상태 확률 e_{on} 과 에너지를 수집하지 않을 안정상태 확률 e_{off} 는 각각 다음과 같게 된다.

$$e_{on} = \frac{1-p_{off}}{2-p_{on}-p_{off}}. \quad (5)$$

$$e_{off} = \frac{1-p_{on}}{2-p_{on}-p_{off}}. \quad (6)$$

2.2 에너지 검출 기반의 채널 센싱

본 논문에서 EH SU는 항상 전송해야 할 데이터가 있다고 가정하였다. PU의 채널 모델링 파라미터 정보는 주어지지만 현재 채널의 점유 상태에 대한 정보를

알 수 없다고 가정하였기 때문에, EH SU는 데이터를 전송하기 위해 각 슬롯의 시작점에서 $\tau_s \in (0, T]$ 동안 수신 신호를 샘플링 주파수 f_s 로 샘플링하여 에너지 검출 (Energy Detection)을 수행하며 이진 가설 검증을 통해서 PU의 채널 사용 유무를 결정하게 된다⁷. 가설 H_0 은 PU가 채널을 사용하지 않는 경우를 의미하고, 가설 H_1 은 PU가 채널을 사용하는 경우를 의미한다. PU의 채널 사용 유무에 따라 EH SU가 수신하는 신호는 다음과 같이 주어진다.

$$y_m(n) = \begin{cases} w(n) & \text{for } H_0 \\ s(n) + w(n) & \text{for } H_1 \end{cases}, \quad (7)$$

여기서 $y_m(n)$ 은 m 번째 슬롯에서의 n 번째 샘플 신호를 의미한다. PU의 신호 $s(n)$ 과 복소 잡음 $w(n)$ 은 모두 평균이 0이고 분산이 각각 σ_s^2 , σ_w^2 인 순환 대칭 복소 가우시안 (Circularly Symmetric Complex Gaussian) 신호로 가정하였다¹⁵. 이 때, m 번째 슬롯에서의 검정 통계량 (Test Statistic) $T(y_m)$ 은 식 (8)과 같이 표현된다.

$$T(y_m) = \frac{1}{N} \sum_{n=1}^N |y_m(n)|^2, \quad (8)$$

여기서 $N = \tau_s f_s$ 는 에너지 검출에 사용된 샘플의 개수이다.

가설 H_0 인 경우에 PU가 채널을 사용하고 있다고 잘못 판단할 오경보 확률 (False Alarm Probability) $P_f(\epsilon)$ 은 선택된 검출 임계값 (Detection Threshold) ϵ 에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} P_f(\epsilon) &= \Pr(T(y_m) > \epsilon | H_0) \\ &= \int_{\epsilon}^{\infty} p_0(x) dx, \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 샘플 개수 N 이 충분히 큰 경우 오경보 확률 $P_f(\epsilon)$ 의 확률밀도함수 (Probability Density Function; PDF) $p_0(x)$ 는 평균과 분산이 각각 $\mu_0 = \sigma_w^2$, $\sigma_0^2 = \frac{1}{N} \sigma_w^4$ 인 가우시안 분포를 따른다¹⁵. 따라서 오경보 확률 $P_f(\epsilon)$ 은 다음과 같이 계산된다.

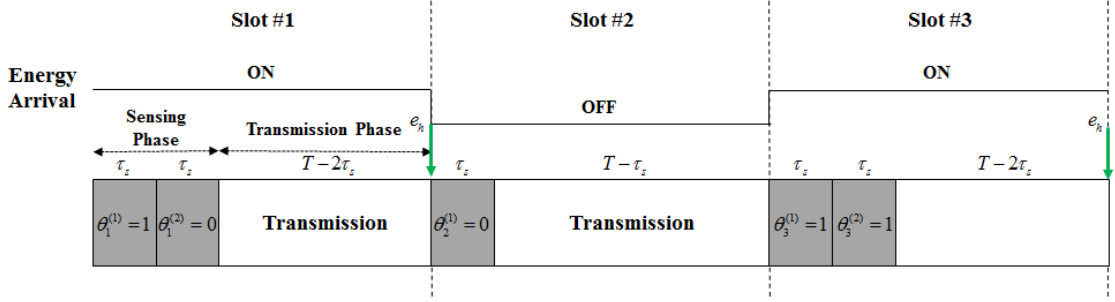


그림 2. 2-채널 센싱 EH SU의 슬롯 구조
Fig. 2. Slot structure for 2-chanel sensing EH SUs

$$P_f(\epsilon) = \int_{\epsilon}^{\infty} \frac{\sqrt{N}}{\sqrt{2\pi}\sigma_w^2} \times \exp\left(-\frac{N(x-\sigma_w^2)^2}{2\sigma_w^4}\right) dx. \quad (10)$$

윗 식에서 $u \equiv \frac{\sqrt{N}(x-\sigma_w^2)}{\sigma_w^2}$ 을 대입하여 정리하면, 아래 식 (11)과 같이 오경보 확률 $P_f(\epsilon)$ 을 얻을 수 있다.

$$P_f(\epsilon) = Q\left(\left(\frac{\epsilon}{\sigma_w^2} - 1\right) \cdot \sqrt{\tau_s f_s}\right), \quad (11)$$

여기서 Q -함수는 식 (12)와 같이 주어진다.

$$Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^{\infty} \exp\left(-\frac{u^2}{2}\right) du. \quad (12)$$

한편, 가설 H_1 인 경우에 PU가 채널을 사용하고 있음을 정확하게 검출할 검출 확률 (Detection Probability) $P_d(\epsilon)$ 은 미리 선택된 검출 임계값 ϵ 에 의해 다음과 같이 주어진다.

$$P_d(\epsilon) = \Pr(T(y_m) > \epsilon | H_1) = \int_{\epsilon}^{\infty} p_1(x) dx, \quad (13)$$

여기서 샘플 개수 N 이 충분히 큰 경우 검출 확률 $P_d(\epsilon)$ 의 PDF $p_1(x)$ 는 평균과 분산이 각각 $\mu_1 = (\gamma_p + 1)\sigma_w^2$, $\sigma_1^2 = \frac{1}{N}(\gamma_p + 1)^2\sigma_w^4$ 인 가우시안 분포를 따른다^[15]. 따라서 검출 확률 $P_d(\epsilon)$ 은 다음과 같

이 계산된다.

$$P_d(\epsilon) = \int_{\epsilon}^{\infty} \frac{\sqrt{N}}{\sqrt{2\pi}(\gamma_p + 1)\sigma_w^2} \times \exp\left(-\frac{N(x - (\gamma_p + 1)\sigma_w^2)^2}{2(\gamma_p + 1)^2\sigma_w^4}\right) dx. \quad (14)$$

앞서와 마찬가지로 $v \equiv \frac{\sqrt{N}(x - (\gamma_p + 1)\sigma_w^2)}{(\gamma_p + 1)\sigma_w^2}$ 을 식 (14)에 대입하면 다음의 식 (15)와 같이 검출 확률 $P_d(\epsilon)$ 을 얻을 수 있게 된다.

$$P_d(\epsilon) = Q\left(\left(\frac{\epsilon}{(\gamma_p + 1)\sigma_w^2} - 1\right) \cdot \sqrt{\tau_s f_s}\right), \quad (15)$$

여기서 $\gamma_p = \sigma_s^2/\sigma_w^2$ 은 SU에서 측정된 PU의 신호 대잡음비 (Signal-to-Noise Ratio; SNR)을 의미한다.

III. 제안된 2-채널 센싱 EH SU의 배터리 모델

3.1 에너지 소모

EH SU의 슬롯 m 에서의 데이터 전송 가능 여부는 센싱 결과 $\theta_m \in \{0(T(y_m) < \epsilon), 1(T(y_m) > \epsilon)\}$ 에 의해 결정된다. 그림 2에서 도시한 바와 같이 본 논문에서는 EH SU가 데이터를 전송하기 위해 순차적으로 최대 2개의 서로 다른 채널을 센싱하는 경우를 고려한다. 단일 채널 센싱 경우와 마찬가지로 m 번째 슬롯에서의 첫 번째 센싱 결과가 $\theta_m^{(1)} = 0$ 인 경우에 EH SU는 해당 채널에 접근하여 데이터를 전송하게 되며, $\theta_m^{(1)} = 1$ 이면 EH SU는 비어 있는 채널을 확보하기 위해 다른 채널을 선택하여 센싱을 수행한다. 이 때

두 번째 센싱 결과 $\theta_m^{(2)}$ 가 0이어야만 데이터 전송이 가능하다. 단일 채널 센싱을 수행하는 동안에 EH SU는 $E_s = \tau_s P_s$ 의 에너지를 소모하며, 여기서 P_s 는 센싱 전력을 의미한다. 본 논문에서 고려하는 2-채널 센싱 EH SU는 m 번째 슬롯의 센싱 구간에서 첫 번째 센싱 결과 $\theta_m^{(1)}$ 에 따라 다음과 같이 에너지를 소모하게 된다.

$$E_{s,(2-ch)} = \begin{cases} E_s & \text{for } \theta_m^{(1)} = 0 \\ 2E_s & \text{for } \theta_m^{(1)} = 1 \end{cases} \quad (16)$$

단일 채널 센싱의 경우에 EH SU는 데이터 전송 구간에서 $E_t = (T - \tau_s) \cdot \left(\frac{\xi}{\zeta} P_t + P_c \right)$ 의 에너지를 소모하며, 여기서 P_t 는 송신 전력, ξ 는 전력 증폭기 (Power Amplifier; PA)의 Peak-to-Average Ratio (PAR), ζ 는 PA의 드레인 효율 (Drain Efficiency), P_c 는 PA를 제외한 RF 송수신기의 전기회로에서 소모하는 전력을 의미한다¹⁰⁾. 2-채널 센싱 EH SU는 센싱 결과 $\theta_m^{(1)}$ 과 $\theta_m^{(2)}$ 에 의해 데이터 전송 과정에서 다음과 같이 주어지는 에너지를 소모한다.

$$E_{t,(2-ch)} = \begin{cases} E_t & \text{for } \theta_m^{(1)} = 0 \\ E_t - \tau_s \left(\frac{\xi}{\zeta} P_t + P_c \right) & \text{for } \theta_m^{(2)} = 0. \\ 0 & \text{for } \theta_m^{(2)} = 1 \end{cases} \quad (17)$$

본 논문에서는 2-채널 센싱 EH SU의 아주 짧은 센싱 구간을 고려하였으며 (즉, $\tau_s \ll T$), 전송에 비해 상대적으로 적은 에너지를 사용하기 때문에 EH SU가 채널 센싱을 수행하는 동안에 소모하는 에너지를 고려하지 않았다. 따라서 EH SU가 슬롯 m 에서 데이터를 전송한 경우에 소모한 총 에너지는 $E_m^c = E_{t,(2-ch)} \approx E_t$ 로 가정하였다. EH 보드가 슬롯 m 에서 수집한 에너지는 $E_m^h = e_h$ 이며, EH SU가 한 개의 슬롯 동안에 소모하는 총 에너지의 양과 같다고 가정하였다 (즉, $e_h = E_t$). 또한 EH 보드가 슬롯 m 에서 수집한 에너지는 용량이 L 인 배터리에 저장되었다가 슬롯 $m+1$ 에서 바로 EH SU에 의해 사용될 수 있다. 슬롯 $m+1$ 의 시작점에서 EH SU의 잔여 에너지 E_{m+1} 은 다음과 같이 업데이트된다.

$$E_{m+1} = \min \{ E_m - E_m^c + E_m^h, (L-1) \cdot E \}, \quad (18)$$

여기서 E 는 단위 에너지를 의미하며, 한 개의 슬롯 동안에 EH SU가 소모한 에너지와 EH 보드가 수집한 에너지의 양과 같다 (즉, $E = E_t = e_h$). 따라서 임의의 에너지 상태 l ($0 \leq l \leq L-1$)은 상위 또는 하위 레벨로 한 단계씩 전이하거나 원래의 상태를 유지하게 된다. 슬롯 $m+1$ 에서의 잔여 에너지가 $E_{m+1} < E_t$ 이면 데이터 전송이 불가하며 해당 에너지 상태를 Energy Outage로 정의한다. 설명을 쉽게 하기 위해 본 논문에서 Energy Outage는 에너지 상태 $l=0$ 으로 표현하였으며, 에너지 상태 $l=L-1$ 은 배터리가 완전히 충전된 상태를 나타내었다.

3.2 에너지 상태 전이확률

센싱 결과가 0이면, 즉 검출된 에너지가 임계값 ϵ 보다 작으면 EH SU는 PU가 채널을 사용하지 않는다고 판단하여 해당 채널에 접근하여 데이터를 전송 및 에너지를 소모한다. EH SU가 서로 다른 채널에 순차적으로 접근하여 센싱을 수행하기 때문에 센싱 결과 $\theta_m^{(1)}$ 과 $\theta_m^{(2)}$ 는 서로 독립적이다. 2-채널 센싱 EH SU가 첫 번째와 두 번째의 채널에 접근하여 데이터를 전송할 확률 $\delta^{(1)}$ 과 $\delta^{(2)}$ 는 각각 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\delta^{(1)} \equiv \delta = \Pr(\theta_m^{(1)} = 0). \quad (19)$$

$$\delta^{(2)} = \Pr(\theta_m^{(1)} = 1) \cdot \Pr(\theta_m^{(2)} = 0). \quad (20)$$

궁극적으로 2-채널 센싱 EH SU가 채널에 접근할 확률 Δ 는 다음과 같게 된다.

$$\Delta = \delta^{(1)} + \delta^{(2)} = \delta(2 - \delta). \quad (21)$$

총합확률에 의하여 m 번째 슬롯에서 채널 센싱 결과가 $\theta_m = 0$ 일 확률 δ 는 다음과 같이 도출된다.

$$\begin{aligned} \delta &= \sum_{c_m \in \{H_0, H_1\}} \Pr(\theta_m = 0 | c_m) \cdot \Pr(c_m) \\ &= (1 - P_f(\epsilon))\pi_i + (1 - P_d(\epsilon))\pi_o. \end{aligned} \quad (22)$$

외부로부터의 에너지 공급이 없으면 데이터를 전송하면서 에너지를 소모하기만 하는 기존의 SU와 달리, EH 보드가 자체적으로 에너지를 수집하여 공급하기 때문에 EH SU의 에너지 상태는 감소 및 증가를 반복하게 되며, 현재의 에너지 상태 (에너지 고갈 상태, 에너지 충분 상태, 완전 충전 상태)에서 데이터 전송 및

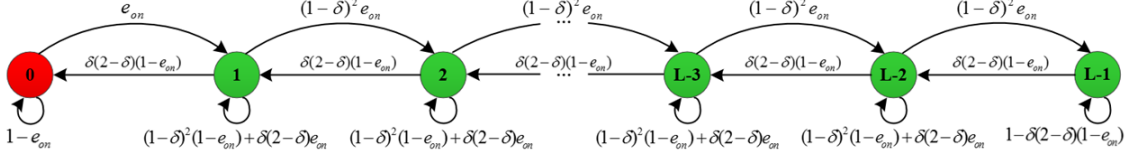


그림 3. 2-채널 센싱 EH SU의 Markov 배터리 모델

Fig. 3. A Markov battery model for 2-chanel sensing EH SUs

EH 보드의 에너지 수집에 따라 다음의 전이확률들로 변화한다.

1) 에너지 고갈 상태 ($l = 0$): Energy Outage가 발생한 경우에 EH SU는 데이터를 전송할 수 없게 되며, EH 보드가 에너지를 수집하여야만 에너지 충분 상태로 전이하여 데이터 전송이 가능하게 된다. 따라서 EH SU가 Energy Outage를 극복하지 못할 확률과 잔여 에너지가 충분 상태로 전이될 확률은 각각 다음과 같다.

$$p_{0,0} = 1 - e_{on}. \quad (23)$$

$$p_{0,1} = e_{on}. \quad (24)$$

2) 에너지 충분 상태 ($0 < l < L-1$): 에너지가 충분하면 EH SU는 비어 있는 채널에 접근하여 데이터를 전송하면서 에너지를 소모하게 되며, 이 때 EH 보드가 에너지를 수집하지 않으면 EH SU의 에너지 상태는 하위 레벨로 전이한다. 반면에 EH 보드가 에너지를 수집하면 최종적으로 에너지 상태에 변화가 없으며, EH SU가 데이터를 전송하지 않는 동시에 EH 보드가 에너지를 수집하면 에너지 상태는 상위 레벨로 전이하게 된다. 이와 같은 에너지 충분 상태의 전이확률은 다음과 같다.

$$p_{l,l-1} = \delta(2-\delta)(1-e_{on}). \quad (25)$$

$$p_{l,l} = (1-\delta)^2(1-e_{on}) + \delta(2-\delta)e_{on}. \quad (26)$$

$$p_{l,l+1} = (1-\delta)^2 e_{on}. \quad (27)$$

3) 완전 충전 상태 ($l = L-1$): 에너지 충분 상태와 마찬가지로 데이터 전송이 가능하여 에너지 하위 레벨로 전이할 수 있으며, 배터리 용량이 제한되어 있기 때문에 EH 보드가 에너지를 지속적으로 수집하여도 에너지 상위 레벨로 전이할 수 없다. 따라서 에너지 상태 $L-1$ 은 다음의 확률로 에너지 하위 레벨로 전

이하거나 원래의 상태를 유지한다.

$$p_{L-1,L-2} = \delta(2-\delta)(1-e_{on}). \quad (28)$$

$$p_{L-1,L-1} = 1 - \delta(2-\delta)(1-e_{on}). \quad (29)$$

그림 3은 에너지 상태가 위에서 설명한 전이확률로 변화하는 2-채널 센싱 EH SU의 Markov 배터리 모델을 도시한다.

IV. EH SU의 Energy Outage 확률 및 패킷 전송 성능

4.1 Energy Outage 확률

앞서 언급한 바와 같이 에너지 상태는 상위 또는 하위 레벨로 한 단계씩 전이하기 때문에 임의의 에너지 상태는 더 이상 줄일 수 없으며 (Irreducible), 제한된 용량의 배터리를 고려하였기 때문에 2-채널 센싱 EH SU의 Markov 배터리 모델은 양재귀 (Positive Recurrent)하다. 또한 임의의 에너지 상태는 최소 한 번의 전이를 거쳐 다시 원래의 상태로 돌아오기 때문에 Markov 배터리 모델은 비주기적 (Aperiodic)이다. 따라서 2-채널 센싱 EH SU의 Markov 배터리 모델은 에르고딕 (Ergodic)하며, EH SU가 에너지를 완전히 소모할 확률 π_0 은 [14]에서와 동일하게 평형 방정식 $\pi = \pi \mathbf{P}$ 로부터 산출할 수 있다. 여기서 π 는 안정상태 확률들로 구성된 $1 \times L$ 벡터이며, \mathbf{P} 는 전이확률들로 구성된 $L \times L$ 행렬이다.

에너지 상태가 $l = 0$ 인 경우에 평형 방정식은 식 (30)과 같게 되며, 에너지 상태 $l = 1$ 의 안정상태 확률 π_1 은 π_0 을 이용하여 (31)과 같이 표현된다.

$$\pi_0(1-p_{0,0}) = \pi_1 p_{1,0}. \quad (30)$$

$$\pi_1 = \frac{e_{on}}{\delta(2-\delta)(1-e_{on})} \pi_0. \quad (31)$$

에너지 상태가 $l=1$ 일 때 평형 방정식은 식 (32)와 같게 된다.

$$\pi_1(1-p_{1,1}) = \pi_0 p_{0,1} + \pi_2 p_{2,1}. \quad (32)$$

식 (32)는 식 (31)을 사용하여 다음과 같이 간략화 될 수 있다.

$$\pi_2 = \frac{(1-\delta)^2 e_{on}^2}{(\delta(2-\delta)(1-e_{on}))^2} \pi_0. \quad (33)$$

그럼 3에서 도시하는 2-채널 센싱 EH SU의 Markov 배터리 모델로부터 임의의 에너지 상태 l ($1 < l < L-1$)은 다음의 식 (34)를 만족하는 것을 알 수 있다.

$$\pi_l(1-p_{l,l}) = \pi_{l-1} p_{l-1,l} + \pi_{l+1} p_{l+1,l}. \quad (34)$$

(34)에 $l=2$ 를 대입하면 다음의 식을 얻게 된다.

$$\pi_3 = \frac{((1-\delta)^2 e_{on}^3)}{(\delta(2-\delta)(1-e_{on}))^3} \pi_0. \quad (35)$$

따라서 임의의 에너지 상태 l ($1 \leq l \leq L-1$)의 안정상태 확률은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\pi_l = \frac{\pi_0}{(1-\delta)^2} \alpha^l, \quad (36)$$

여기서 α 값은 다음과 같다.

$$\alpha = \frac{(1-\delta)^2 e_{on}}{\delta(2-\delta)(1-e_{on})}. \quad (37)$$

한편 모든 확률의 합은 1이므로 (즉, $\sum_{l=0}^{L-1} \pi_l = 1$), 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\pi_0 \left(1 + \sum_{l=1}^{L-1} \alpha^l \frac{1}{(1-\delta)^2} \right) = 1, \quad (38)$$

$$\pi \left(1 + \frac{1}{(1-\delta)^2} \sum_{l=0}^{L-1} \alpha^l - \frac{1}{(1-\delta)^2} \right) = 1. \quad (39)$$

여기서 $\alpha < 1$ 이면 식 (40)을 만족한다.

$$\sum_{l=0}^{L-1} \alpha^l = \frac{1-\alpha^L}{1-\alpha}. \quad (40)$$

따라서 2-채널 센싱 EH SU가 에너지를 완전히 소모하여 Energy Outage가 발생할 안정상태 확률 π_0 은 α 값에 따라 다음과 같이 산출할 수 있다.

$$\pi_0 = \begin{cases} \frac{(1-\delta)^2(1-\alpha)}{1-\alpha^L-\delta(2-\delta)(1-\alpha)}, & \alpha < 1 \\ \frac{1}{1+\frac{1}{(1-\delta)^2} \sum_{l=1}^{L-1} \alpha^l}, & \alpha > 1 \end{cases}. \quad (41)$$

4.2 패킷 전송 성능

송수신기 사이의 무선 채널은 통신 시스템의 성능에 영향을 주는 원인 중의 하나이지만 송수신 성능을 개선함으로써 해결 가능하기 때문에 본 논문에서는 무선 채널의 영향을 고려하지 않았다. 따라서 EH SU는 데이터 전송을 위한 충분한 에너지를 보유하고 있는 동시에 PU가 사용하지 않고 실제로 비어 있는 채널을 정확하게 확보하면 PU와의 충돌 없이 데이터를 성공적으로 전달할 수 있게 된다고 가정하였다.

먼저 EH SU가 첫 번째의 채널 센싱을 수행한 후 해당 채널에 접근하여 데이터를 전송할 확률은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} R^{(1)} &\equiv R = (1-\pi_0) \Pr(\theta_m^{(1)} = 0, C_m^{(1)} = 0) \\ &= (1-\pi_0)(1-P_f(\epsilon))\pi_i. \end{aligned} \quad (42)$$

EH SU는 첫 번째 채널이 PU에 의해 사용되고 있다고 판단되면 두 번째 채널을 선택하여 센싱을 진행하기 때문에 두 번째 채널에서 데이터를 전송할 확률은 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$\begin{aligned} R^{(2)} &= (1-\pi_0) \Pr(\theta_m^{(2)} = 0, C_m^{(2)} = 0, \theta_m^{(1)} = 1) \\ &= (P_f(\epsilon)\pi_i + P_d(\epsilon)\pi_o) \cdot R. \end{aligned} \quad (43)$$

최종적으로 EH SU가 패킷을 성공적으로 전송할 확률은 다음과 같이 첫 번째와 두 번째 채널에서 데이터를 전송할 확률의 합과 같게 된다.

$$R_{(2-ch)} = R^{(1)} + R^{(2)} \tag{44}$$

$$= (1 + P_f(\epsilon)\pi_i + P_d(\epsilon)\pi_o) \cdot R.$$

V. 모의실험 결과

제안된 2-채널 센싱 EH SU의 Markov 배터리 모델을 분석하기 위해 Monte-Carlo 모의실험을 진행하여 해당 모델로부터 도출된 Energy Outage 확률과 패킷 전송 성능의 정확성을 검증하였다. 또한 [14]에서 제안된 단일 채널 센싱 EH SU의 Markov 배터리 모델로부터 도출한 Energy Outage 확률과 패킷 전송 성능과의 비교를 진행하였다. 표 1에 모의실험에서 사용된 주요 파라미터들을 정리하였다.

그림 4와 5는 EH 보드의 에너지 수집 상태 전이 확률 p_{on} 에 따른 Energy Outage 확률과 패킷 전송 성능을 각각 도시한다. 이 때 에너지 검출 임계값은 $\epsilon = 10.2$, EH 보드의 에너지 수집 상태 전이 확률 $p_{off} = 0.5$, 채널 상태 전이 확률 $q_o = 0.5$ 를 고려하였다. 그림 4에서 보는 바와 같이 EH 보드가 에너지를 빈번하게 수집하면 EH SU가 에너지를 완전히 소모할 확률은 점차 감소하며, 채널이 자주 비어 있는 경우에 EH SU가 데이터를 전송할 확률이 증가하여 에너지 소모가 자주 발생하기 때문에 Energy Outage가 발생할 확률이 항상 크게 나타남을 알 수 있다. 예상했던 바와 같이 2-채널 센싱은 단일 채널 센싱에 비해 데이터 전송 기회가 증가하기 때문에 에너지를 자주 소모하여 상대적으로 높은 확률로 Energy Outage가 발생한다. 하지만 그림 5에 의하면 EH 보드가 에너지를 수집할 확률이 증가함에 따라, 패킷 전송 성능이 더 이상 개선되지 않는 단일 채널 센싱 경우와는 달리 패킷 전송 성능이 지속적으로 개선됨을 확인할 수 있다. 에너지가 일정 확률 이상으로 수집되고 있는 경우에

표 1. 모의실험에서 사용된 주요 파라미터
Table 1. Simulation parameters

Parameter	Value
Slot duration, T	100 msec
Sensing duration, τ_s	2 msec
Sampling frequency, f_s	1 MHz
Battery size, L	100
Noise variance, σ_w^2	10
Primary SNR, γ_p	-15 dB
Number of channels	20

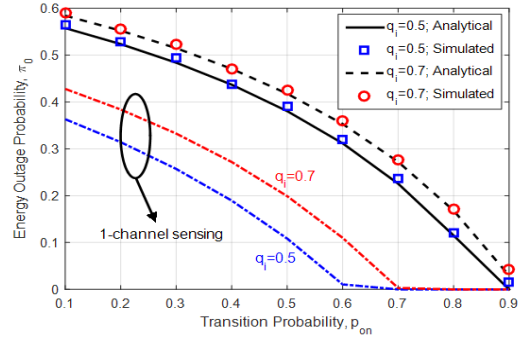


그림 4. 전이확률 p_{on} 에 따른 Energy Outage 확률 π_0
Fig. 4. Energy outage probability π_0 vs. transition probability p_{on}

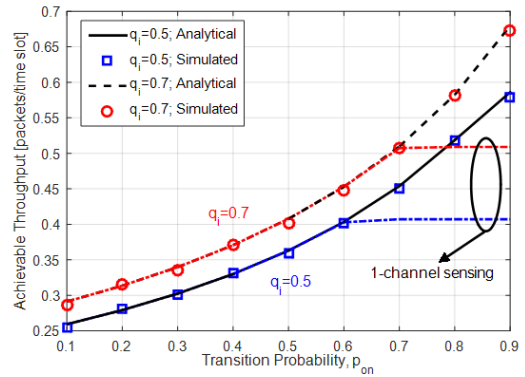


그림 5. 전이확률 p_{on} 에 따른 패킷 전송 성능
Fig. 5. Achievable throughput vs. transition probability p_{on}

높은 Energy Outage 확률은 EH SU가 더 많은 양의 데이터를 전송하여 소모한 에너지가 증가하였음을 의미한다.

또한 Energy Outage 확률과 패킷 전송 성능을 검출 임계값 ϵ 의 함수로 표현하여 각각 그림 6과 7에서 도시하였다. 이 때 에너지 수집 상태 전이 확률은 $p_{on} = p_{off} = 0.5$, 채널 상태 전이 확률 $q_i = 0.5$ 를 고려하였다. 그림 6에서와 같이 검출 임계값이 크면 채널이 비어 있다고 판단되기 쉽기 때문에 에너지 누적보다 소모가 상대적으로 많이 발생하여 Energy Outage 확률이 점차 증가하게 된다. 또한 검출 임계값이 증가하면 오경보 확률이 감소하여 패킷 전송 성능은 개선되다가 높은 Energy Outage 확률의 영향으로 인해 다시 감소되는 추세를 보이는 것을 그림 7을 통해 확인할 수 있다. 이러한 결과는, 검출 임계값이 커지면 오경보 확률뿐만 아니라 검출 확률도 동시에 감소하여 EH SU가 PU에 의해 사용되고 있는 채널에 접근하여 에너지를 소모하게 되며 따라서 패킷 전송 성능이 더 이상 개선되지 않기 때문이다.

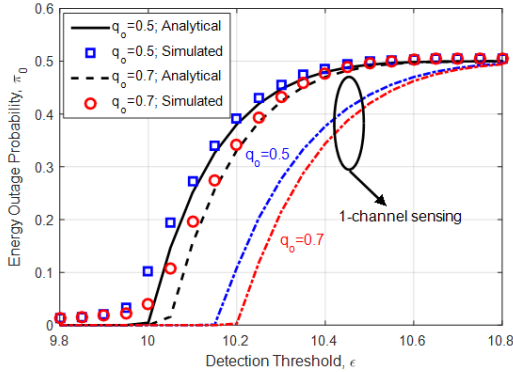


그림 6. 검출 임계값 ϵ 에 따른 Energy Outage 확률 π_0
 Fig. 6. Energy outage probability π_0 vs. detection threshold ϵ

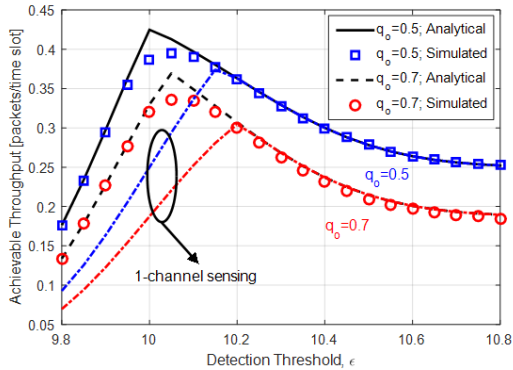


그림 7. 검출 임계값 ϵ 에 따른 패킷 전송 성능
 Fig. 7. Achievable throughput vs. detection threshold ϵ

VI. 결론

본 논문에서는 데이터를 전송하기 위해 최대 2개의 서로 다른 채널을 순차적으로 센싱하는 EH SU의 Markov 배터리 모델을 제안하였으며, 해당 배터리 모델로부터 EH SU가 에너지를 완전히 소모하여 데이터를 전송할 수 없는 Energy Outage가 발생할 안정상태 확률을 수식적으로 도출하였다. 이에 근거하여 충분한 에너지와 PU가 사용하지 않는 채널을 확보하여 EH SU가 성공적으로 패킷을 전송할 확률을 역시 도출하였다. Monte-Carlo 모의실험을 통해 EH SU가 한 개의 채널을 센싱하는 경우보다 Energy Outage가 발생할 확률은 증가하지만 패킷 전송 성능이 개선됨을 확인하였다. 하지만 한 개의 슬롯에서 일정한 센싱 구간으로 여러 차례의 채널 센싱을 반복하여 진행되는 경우에, 데이터 전송 기회는 증가하지만 전송을 위해 할당된 시간이 감소하여 전체 시스템의 성능이 저하되는 문제점이 동반되기 때문에 센싱할 채널의 개수는 최적의 시스템 성능을 고

려하여 신중하게 결정되어야 한다.

References

- [1] X. Lu, P. Wang, D. Niyato, D. I. Kim, and A. Han, "Wireless networks with RF energy harvesting: A contemporary survey," *IEEE Commun. Surveys & Tuts.*, vol. 17, no. 2, pp. 757-789, May 2015.
- [2] X. Lu, D. Niyato, P. Wang, D. I. Kim, and Z. Han, "Wireless charger networking for mobile devices: Fundamentals, standards, and applications," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 22, no. 2, pp. 126-135, Apr. 2015.
- [3] S. Kim, R. Vyas, J. Bito, K. Nitotaki, A. Collado, A. georgiadis, and M. M. Tentzeris, "Ambient RF energy-harvesting technologies for self-sustainable standalone wireless sensor platforms," *IEEE Proc.*, vol. 102, no. 11, pp. 1649-1666, Nov. 2014.
- [4] A. A. Aziz, D. Tribudi, L. Ginting, P. A. Rosyady, D. Setiawan, and K. Choi, "RF energy transfer testbed based on off-the-shelf components for IoT application," *J. KICS*, vol. 40, no. 10, pp. 1912-1921, Oct. 2015.
- [5] M. Kim, W. Lim, J. Bae, J. Park, Y. Park, J. Lee, S. Trinh-Van, D. I. Kim, K. Lee, K. Hwang, and Y. Yang, "Development of far field RF power harvesting testbed," *J. KICS*, vol. 40, no. 10, pp. 1922-1930, Oct. 2015.
- [6] S. Choi and D. I. Kim, "Backscatter communication for wireless-powered communication networks," *J. KICS*, vol. 40, no. 10, pp. 1900-1911, Oct. 2015.
- [7] Y.-C. Liang, K.-C. Chen, G. Y. Li, and P. Mahonen, "Cognitive radio networking and communications: An overview," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 60, no. 7, pp. 3386-3407, Sept. 2011.
- [8] X. Lu, P. Wang, D. Niyato, and E. Hossain, "Dynamic spectrum access in cognitive radio networks with RF energy harvesting," *IEEE Wireless Commun.*, vol. 21, no. 7, pp. 102-110, Jun. 2014.
- [9] D. Hoang, D. Niyato, P. Wang, and D. I.

Kim, "Opportunistic channel access and RF energy harvesting in cognitive radio networks," *IEEE J. Sel. Areas in Commun.*, vol. 32, no. 11, pp. 2039-2052, Nov. 2014.

- [10] S. Park, H. Kim, and D. Hong, "Cognitive radio networks with energy harvesting," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 12, no. 3, pp. 1386-1397, Mar. 2013.
- [11] W. Chung, S. Park, S. Lim, and D. Hong, "Spectrum sensing optimization for energy-harvesting cognitive radio systems," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 13, no. 5, pp. 2601-2613, May 2014.
- [12] S. Park and D. Hong, "Achievable throughput of energy harvesting cognitive radio networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 13, no. 2, pp. 1010-1022, Feb. 2014.
- [13] D. Hoang, D. Niyato, P. Wang, and D. I. Kim, "Performance optimization for cooperative multiuser cognitive radio networks with RF energy harvesting capability," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 14, no. 7, pp. 3614-3629, Jul. 2015.
- [14] S. Wu, Y. Shin, J. Y. Kim, and D. I. Kim, "Probability of packet loss in energy harvesting nodes with cognitive radio capabilities," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 20, no. 5, pp. 978-981, May 2016.
- [15] Y.-C. Liang, Y. Zeng, E. C. Y. Peh, and A. T. Hoang, "Sensing-throughput tradeoff for cognitive radio networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 7, no. 4, pp. 1326-1337, Apr. 2008.

오 선 애 (Shanai Wu)



2011년 8월 : 연변과학기술대학 컴퓨터전자통신공학부 (학사)
 2011년 9월~현재: 숭실대학교 정보통신공학과 (석박사통합과정)
 <관심분야> Energy Harvesting, Cognitive Radio, Magnetic Induction Communications

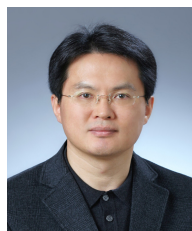
신 요 안 (Yoan Shin)



1987년 : 서울대학교 전자공학과 (학사)
 1989년 : 서울대학교 전자공학과 (석사)
 1992년 : University of Texas at Austin 전기및컴퓨터공학과 (박사)

1992년~1994년 : Austin 소재 MCC (Microelectronics & Computer Technology Corp.) 연구원
 1994년~현재 : 숭실대학교 전자정보공학부 교수
 2009년~2010년 : University of British Columbia 전기및컴퓨터공학과 방문교수
 2015년~현재 : 숭실대학교 연구·산학협력처장/산학협력단장
 <관심분야> Energy Harvesting, Cognitive Radio, Localization

김 동 인 (Dong In Kim)



1980년 : 서울대학교 전자공학과
 1984년~1985년 : KT Research Labs 전임연구원
 1987년 : University of Southern California 전기공학 (공학석사)
 1990년 : University of Southern California 전기공학 (공학박사)

2002년~2007년 : School of Engineering Science, Simon Fraser University (SFU) 종신 정교수
 2008년~2011년 : IEEE Transactions on Wireless Communications 초대지역편집위원
 2008년~2013년 : 지식경제부 대학IT연구센터(ITRC) 협력무선통신 연구센터 센터장
 2012년~2015년 : IEEE Wireless Communications Letters 초대편집장
 2007년~현재 : 성균관대학교 정보통신대학 정교수
 2014년~현재 : 미래창조과학부 선도연구센터(ERC) 무선에너지 하비스팅 통신융합 연구센터 센터장
 <관심분야> Future Cellular Systems, Energy Harvesting for IoT