

인지 라디오 RF 에너지 하베스팅 시스템에서 에너지 수집 2차 사용자의 성능 분석

오 선 애*, 신 요 안^o

Achievable Throughput of Secondary Users in Cognitive Radio RF Energy Harvesting Systems

Shanai Wu*, Yoan Shin^o

요 약

본 논문에서는 Radio Frequency (RF) 충전 인지 라디오 네트워크에서 에너지 수집 2차 송신기 (Secondary Transmitter; ST)의 성능을 분석하기 위해, 유사출생사멸 과정 기반 에너지 축적 모델을 구축하고 해당 모델로부터 데이터 전송이 불가능한 Energy Outage 확률을 도출하였다. 이를 기반으로 ST의 데이터 전송 성능을 도출하였으며, Monte-Carlo 모의실험을 통해 검증 및 분석하였다.

Key Words : RF, energy harvesting, cognitive radio, secondary throughput, quasi-birth-and-death process, energy accumulation model

ABSTRACT

In this paper, we develop a quasi-birth-and-death process-based energy accumulation model for the secondary transmitter with wirelessly energy harvesting capability. From the energy accumulation model, the probability of energy outage in which data transmission is unavailable, was derived to obtain the secondary throughput. The Monte-Carlo simulation was performed to validate the accuracy of

achievable secondary throughput.

I. 서 론

주변에 늘 존재하며 정보와 에너지를 모두 전송하는 Radio Frequency (RF) 신호로부터 에너지를 수집하는 RF 에너지 수집 기술이 자기 유지가능한 (Self-sustainable) 에너지 공급 기술로 부상하고 있다¹⁾. 특히 주파수 이용 효율 극대화를 위한 동적 스펙트럼 접근 기술 중의 하나인 인지 라디오 (Cognitive Radio; CR) 기술과의 결합 연구가 다양한 접근 방식으로 진행되고 있다.

본 논문에서는 RF 충전 CR 네트워크에서 에너지 수집 2차 송신기 (Secondary Transmitter; ST)의 성능을 분석하기 위한 에너지 축적 모델을 구축하고자 한다. ST는 외부의 에너지 공급원이 없이 점유된 Primary 채널에 접근하여 수집한 에너지를 사용하여 Primary 채널이 비어 있을 때 데이터를 전송한다. 성능을 유지하기 위해 ST는 일정한 송신 전력을 필요로 하지만 실제로 수집하는 에너지는 무선 채널, 에너지 수집 효율, 수신 신호 세기 등의 영향을 심각하게 받는다. 따라서 동일 주기 동안에 수집하는 에너지는 데이터 전송에 필요한 에너지보다 부족할 수 있으며, 본 논문에서는 유사출생사멸(Quasi-Birth-and-Death; QBD) 과정 기반 에너지 축적 모델을 구축하여 ST의 성능을 분석한다.

II. RF 충전 CR 네트워크

본 논문에서는 Primary 시스템과 Secondary 시스템이 각각 한 쌍의 송수신기로 구성된 RF 충전 CR 네트워크를 고려한다. ST는 점유된 Primary 채널에 접근하고 주변 신호로부터 에너지를 수집하여 용량이 제한된 배터리에 저장하며, 채널이 비어 있는 동안에 해당 에너지를 사용하여 데이터를 전송한다.

2.1 Primary 채널

Primary 채널에 접근하기 위해 ST는 주기적으로 채널을 센싱해야 하며, 본 논문에서는 슬롯 구간이 $T \in \mathbb{R}^+$ 인 RF 충전 CR 네트워크를 고려하였다. 여기

* 본 논문은 2014년 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구결과임 (2014R1A5A1011478).

• First Author : (ORCID:0000-0001-6572-2838)Soongsil University, School of Electronic Engineering, sunae0814@ssu.ac.kr, 학생회원

o Corresponding Author : (ORCID:0000-0002-4722-6387)Soongsil University, School of Electronic Engineering, yashin@ssu.ac.kr, 종신회원

논문번호 : 201807-232-A-LU, Received July 31, 2018; Revised August 21, 2018; Accepted August 21, 2018

서 \mathbb{R}^+ 은 양의 실수 집합을 의미한다. 채널 상태는 주 사용자 (Primary User; PU)의 데이터 전송 패턴에 따라 변화하며, 전이확률 $\{p_i, p_o\}$ 를 이용하여 서로 상관된 2개의 상태 $\{\text{idle}(C=0), \text{busy}(C=1)\}$ 로 모델링하였다²⁾. 따라서 채널이 비어 있거나 점유될 정상 확률은 각각 다음과 같게 된다.

$$\pi_i = \Pr(C=0) = \frac{1-p_o}{2-p_o-p_i}, \quad (1)$$

$$\pi_o = \Pr(C=1) = \frac{1-p_i}{2-p_o-p_i}. \quad (2)$$

2.2 Secondary 시스템

2.2.1 에너지 탐색

ST는 현재 Primary 채널의 상태를 알 수 없기 때문에, 각 슬롯의 시작점에서 $\tau_s \in (0, T]$ 동안 샘플링 주파수 f_s 로 샘플을 취하여 수신 신호의 에너지를 검출한 후 이진 가설 검증을 통해 Primary 채널 상태를 결정하게 된다. 검출된 에너지가 임계값 ϵ 보다 작으면 Primary 채널이 비어 있다고 판단하고 ($\theta = 0$), ϵ 보다 크면 채널이 점유되었다고 판단한다 ($\theta = 1$). 효율적인 데이터 전송과 에너지 수집을 위해 오경보 확률 $\Pr(\theta=1|C=0)$ 은 작아야 하고 검출 확률 $\Pr(\theta=1|C=1)$ 은 큰 값을 가져야 한다. 에너지 검출 과정에서 충분히 많은 샘플을 취한 경우에 검출 임계값 ϵ 에 따른 오경보 확률과 검출 확률은 각각 다음과 같게 된다^{2,3)}.

$$P_f(\epsilon) = Q\left(\left(\frac{\epsilon}{\sigma_w^2} - 1\right)\sqrt{\tau_s f_s}\right), \quad (3)$$

$$P_d(\epsilon) = Q\left(\left(\frac{\epsilon}{(\gamma_p + 1)\sigma_w^2} - 1\right)\sqrt{\tau_s f_s}\right), \quad (4)$$

여기서 $\gamma_p = \sigma_s^2/\sigma_w^2$ 은 ST에서 측정된 PU의 신호대 잡음비 (Signal-to-Noise Ratio; SNR)이다. 본 논문에서는 PU의 신호와 잡음을 평균이 모두 0이고 분산이 각각 σ_s^2, σ_w^2 인 순환 대칭 복소 가우시안 신호로 가정하였으며, 아주 짧은 센싱 구간 (즉, $\tau_s \ll T$)을 가정하여 Primary 채널을 센싱하는 과정에서 소모하는 에너지를 고려하지 않았다.

2.2.2 데이터 전송

검출된 에너지가 ϵ 보다 작으면 ST는 채널이 비어 있다고 판단하며 해당 채널에 접근하여 ($T-\tau_s$) 동안 데이터를 전송한다. 따라서 ST가 데이터를 전송하여 에너지를 소모할 확률은 다음과 같게 된다.

$$P_c \triangleq \Pr(\theta=0) = (1-P_f)\pi_i + (1-P_d)\pi_o. \quad (5)$$

ST는 충분한 에너지를 보유하고 있는 동시에 실제로 비어 있는 채널을 정확하게 검출하면 PU와의 충돌 없이 데이터를 전달할 수 있게 된다. 따라서 ST의 전송 성능을 다음과 같이 도출할 수 있다.

$$R = (1-\pi_0)(1-P_f)\pi_i, \quad (6)$$

여기서 π_0 은 잔여 에너지가 부족하여 데이터 전송이 불가능한 Energy Outage가 발생할 정상확률이다.

2.2.3 에너지 수집

검출된 에너지가 ϵ 보다 크면 ST는 PU가 채널을 사용하고 있다고 판단하여 ($T-\tau_s$) 동안 에너지 수집을 시도하게 된다. 이 때 오경보가 발생하면 주변에 PU의 신호가 존재하지 않기 때문에, ST가 지속적으로 에너지를 수집하려고 하여도 에너지 상태는 변하지 않는다. 따라서 실제로 에너지를 수집하여 축적할 수 있는 확률과 오경보가 발생하여 에너지 상태가 변하지 않을 확률은 각각 다음과 같게 된다.

$$P_h \triangleq \Pr(\theta=1, C=1) = P_d\pi_o, \quad (7)$$

$$P_u \triangleq \Pr(\theta=1, C=0) = P_f\pi_i. \quad (8)$$

III. 레벨독립 QBD 기반 에너지 축적 모델

3.1 에너지 축적 모델의 전이확률행렬

추가적인 에너지 공급원이 없기 때문에 ST의 에너지 상태는 데이터 전송에 따라 감소하고 에너지 수집에 의해 증가한다. 앞서 언급한 바와 같이 ($T-\tau_s$) 동안에 수집한 에너지는 데이터 전송을 위해 필요한 에너지보다 부족할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 ($T-\tau_s$) 동안에 소모한 에너지와 수집한 에너지가 $E_c = mE_h$ 의 관계식을 갖는다고 가정하였다. 에너지 레벨 $l(n)$ ($n=1, \dots, L$)은 데이터를 전송하면 하위 레벨 $l(n-1)$ 로 전이하고, 배터리가 완전히 충전되면

ST는 연속적으로 L 번 데이터를 전송 가능하다고 가정하였다. 에너지 레벨 $l(n)$ ($n=0, \dots, L-1$)은 에너지를 수집하여 상위 레벨 $l(n+1)$ 로 전이하며, 이때 반드시 에너지 상태 (n, m) 을 통해서만 전이가 가능하다. 앞서 도출한 에너지 상태 전이확률을 기반으로 상태 공간 $\{(n, j), n=0, \dots, L, j=1, \dots, m\}$ 을 갖는 QBD 기반 에너지 추적 모델을 구축하였으며, 해당 모델의 전이확률행렬은 다음의 형태로 표현된다.

$$P = \begin{bmatrix} B A_0 & 0 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ A_2 A_1 A_0 & \dots & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & A_2 A_1 & \dots & 0 & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \dots & A_1 & A_0 \\ 0_1 & 0_1 & 0_1 & \dots & (A_2)_1 & (I - A_2)_1 \end{bmatrix}, \quad (9)$$

여기서 B, A_2, A_1, A_0 은 모두 $m \times m$ 행렬이며, 0 은 $m \times m$ 영행렬을 나타낸다. 또한 $(\cdot)_1$ 은 행렬의 첫 번째 행을 의미한다. 행렬 B, A_2, A_1, A_0 의 (i, j) 원소는 각각 다음과 같이 주어진다.

$$(B)_{ij} = \begin{cases} 1 - P_h, & i = j \\ P_h, & j = i + 1 \\ 0, & otherwise \end{cases}, \quad (10)$$

$$(A_2)_{ij} = \begin{cases} P_c, & i = j \\ 0, & otherwise \end{cases}, \quad (11)$$

$$(A_1)_{ij} = \begin{cases} P_w, & i = j \\ P_h, & j = i + 1 \\ 0, & otherwise \end{cases}, \quad (12)$$

$$(A_0)_{ij} = \begin{cases} P_h, & i = m, j = 1 \\ 0, & otherwise \end{cases}, \quad (13)$$

여기서 $i, j = 1, \dots, m$ 이다.

3.2 Energy Outage 확률

전이확률행렬의 첫 번째 행을 제외한 두 번째 행부터 동일한 전이패턴을 반복함으로써 QBD 기반 에너지 모델이 레벨독립임을 알 수 있다. 레벨독립 QBD 과정에 대해 $\pi_n = \pi_0 R^n$ ($n=0, \dots, L$)의 관계식이 성립하기 때문에 Energy Outage 확률벡터 π_0 을 구하기 위해 행렬 R 을 먼저 계산해야 한다. 행렬 R 은 직접 계산할 수 없으며, QBD 과정의 특징을 가장 잘 표현하는 다음의 관계식을 갖는 $m \times m$ 행렬들을 고려한

다^[4].

$$U = A_1 + A_0 G, \quad (14)$$

$$G = (I - U)^{-1} A_2, \quad (15)$$

$$R = A_0 (I - U)^{-1}, \quad (16)$$

$$U = A_1 + R A_2. \quad (17)$$

본 논문에서는 (14)와 (15)를 이용하여 반복적으로 U 와 G 를 구한 후, (16)을 이용하여 R 을 계산하는 기본 알고리즘을 사용한다.

에너지 모델을 $\{l(0)\}$ 과 그 외의 에너지 레벨들로 구성된 2개의 그룹으로 나누면 $\{l(0)\}$ 만으로 한정된 국소 모델의 전이행렬은 다음과 같게 된다.

$$P_{\{0\}} = B + A_0 (I - U)^{-1} A_2. \quad (18)$$

제한한 QBD 기반 에너지 모델은 양재귀하기 때문에 국소 모델 $\{l(0)\}$ 도 양재귀하며, $\pi_0 = \pi_0 P_{\{0\}}$ 가 성립하여 (19)를 얻을 수 있다.

$$\pi_0 = \pi_0 (B + R A_2) = \pi_0 (B + A_0 G). \quad (19)$$

또한 정상확률벡터 $\pi = (\pi_0, \dots, \pi_L)$ 에 대해 $\pi e = 1$ 이므로, 정규화 조건에 의해 최종적으로 π_0 을 구할 수 있게 된다.

IV. 모의실험 결과

Monte-Carlo 모의실험을 진행하여 QBD 기반 에너지 모델로부터 도출한 ST의 성능을 분석하였다. 모의실험에서 $T = 100$ ms, $\tau_s = 2$ ms, $f_s = 1$ MHz, $\sigma_w^2 = 10$, $\gamma_p = -10$ dB, $L = 5$ 를 고려하였으며, 에너지 모델에 대해 $m = 2$ 을 고려하였다.

그림 1은 Primary 채널의 전이확률 p_o 와 정규화한 검출 임계값 ϵ/σ_w^2 에 따른 ST의 성능을 도시한다. p_i 가 고정된 경우에 p_o 가 증가하면 Primary 채널이 자주 점유되기 때문에 에너지 수집 기회가 증가하여 ST의 성능은 증가한다. 하지만 p_o 가 계속하여 증가하면 데이터 전송 기회가 감소하여 ST의 성능은 저하된다. 또한 검출 임계값이 커지면 오경보는 개선되지만 미

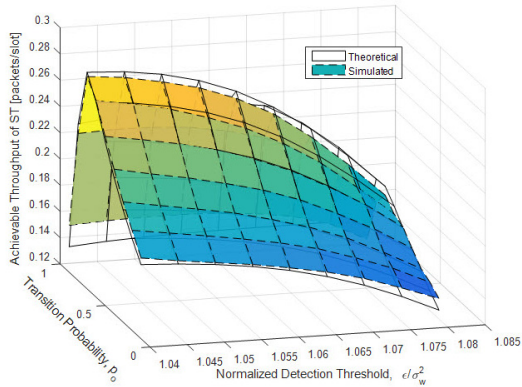


그림 1. p_o 와 ϵ/σ_w^2 에 따른 ST의 성능 ($p_i = 0.5$)
 Fig. 1. Achievable secondary throughput corresponding to transition probability p_o and ϵ/σ_w^2 ($p_i = 0.5$)

검출 확률이 증가하여 에너지 소모는 증가하는 반면에, 수집한 에너지는 감소하여 ST의 성능이 전체적으로 감소하는 추세를 보인다.

V. 결론

본 논문에서는 QBD 기반 에너지 모델을 구축하여 ST의 성능을 분석하였다. Monte-Carlo 모의실험을 통해 성능을 검증하였으며, ST의 성능을 개선하기 위해 주변의 신호를 반사하여 정보를 전송하는 주변 후방 산란 통신이 필수적인 것으로 판단된다.

References

- [1] X. Lu, P. Wang, D. Niyato, D. I. Kim, and Z. Han, "Wireless networks with RF energy harvesting: A contemporary survey," *IEEE Commun. Surveys & Tuts.*, vol. 17, no. 2, pp. 757-789, Second Quarter 2015.
- [2] S. Wu, Y. Shin, and D. I. Kim, "Energy outage probability and achievable throughput of 2-channel sensing secondary users in RF powered cognitive radio networks," *J. KICS*, vol. 41, no. 9, pp. 1044-1053, Sept. 2016.
- [3] 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.
- [4] G. Latouche, "A note on two matrices occurring in the solution of quasi-birth-and-death processes," *Commun. Statist. Stoch. Models*, vol. 3, no. 2, pp. 251-257, Mar. 2007.