

RF 충전 후방산란 인지 라디오 네트워크를 위한 QBD 기반 에너지 모델

오 선 애*, 김 진 영*, 김 동 인**, 신 요 안^o

QBD-Based Energy Model for RF-Powered Backscatter Cognitive Radio Networks

Shanai Wu*, Jin Young Kim*, Dong In Kim**, Yoan Shin^o

요 약

본 논문에서는 RF 충전 인지 라디오 (Cognitive Radio; CR) 네트워크에서 2차 송신단말 (Secondary Transmitter; ST)의 성능을 개선하기 위해 주변 Primary 신호를 반사하여 정보를 전송하는 주변 후방산란 통신 (Ambient Backscatter Communications; AmBC) 기술의 활용방안을 고려했다. 주변 후방산란은 에너지 수집과 마찬가지로 주사용자 (Primary User; PU)가 사용하는 채널에 접근하여 안테나에서 수신한 에너지를 반사하는 방식으로 정보를 전달한다. Primary 신호를 흡수하여 에너지를 효율적으로 수집하는 동시에 후방산란을 활용하여 데이터 전송 성능을 개선하기 위해, 본 논문에서 ST는 PU가 사용하고 있는 채널에 접근하여 에너지 수집과 후방산란을 순차적으로 수행한다. 추가적인 에너지 공급원을 고려하지 않았기 때문에 ST는 충분한 양의 에너지를 수집하여야만 채널이 비어 있는 동안에 데이터 전송이 가능하게 된다. 따라서 ST가 보유한 에너지는 이와 같은 동작 모드에 따라 변하며, 본 논문에서는 에너지 상태 변화를 제공할 수 있는 유사출생사멸 (Quasi-Birth-and-Death; QBD) 과정 기반 에너지 모델을 구축하였다. 에너지 모델로부터 에너지 수집만 가능한 에너지 고갈 상태와 데이터 전송이 불가능한 에너지 부족 상태가 발생할 정상화율을 각각 도출하였다. 이를 기반으로 ST의 후방산란 성능과 전송 성능을 도출하였으며, Monte-Carlo 모의실험을 통해 검증 및 분석하였다.

Key Words : RF, energy harvesting, ambient backscattering, cognitive radio, quasi-birth-and-death process, energy model

ABSTRACT

In this paper, ambient backscattering communication is considered to improve achievable throughput of secondary transmitter (ST) in RF-powered cognitive radio networks. With the capability of ambient backscattering, the ST can deliver information by reflecting the amount of energy received at the antenna. To support efficient energy harvesting and to improve achievable throughput, the ST harvests energy from the primary signals and

※ 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

* (ORCID:0000-0002-1456-7097)Kwangwoon University, School of Electronic Engineering, jinyoung@kw.ac.kr, 종신회원

** (ORCID:0000-0001-7711-8072)Sungkyunkwan University, School of Information and Communication Engineering, dikim@skku.ac.kr, 종신회원

논문번호 : 201810-301-B-RE, Received September 29, 2018; Revised December 6, 2018; Accepted December 26, 2018

subsequently backscatter primary signals to transmit information when the primary channel is busy. Without additional energy supply, the ST needs to harvest sufficient amount of energy to enable data transmission when the primary channel becomes idle. The residual energy at the ST will be increased or decreased according to operation mode. Therefore, we develop a quasi-birth-and-death process-based energy model to provide variations of energy states. From the developed energy model, we derive the stationary probabilities of energy outage and energy deficit. Accordingly, the achievable transmission throughput and backscatter throughput of the ST are derived. The Monte-Carlo simulation was performed to show an agreement between theoretical and simulated throughputs.

I. 서론

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 있다^[1]. 특히 주파수 이용 효율 극대화를 위한 동적 스펙트럼 접근 기술 중의 하나인 인지 라디오 (Cognitive Radio; CR) 기술과의 결합 연구가 다양한 방식으로 진행되고 있다^[2-5]. RF 충전 CR 네트워크에서 에너지 수집 기능을 갖는 2차 송신단말 (Secondary Transmitter; ST)은 주사용자 (Primary User; PU)가 사용하고 있는 채널에 접근하여 에너지를 수집하고, 채널이 비어 있는 동안에 해당 에너지를 사용하여 데이터를 전송할 수 있다. 따라서 ST의 전송 성능은 데이터 전송을 지원할 수 있는 충분한 에너지와 비어 있는 채널에 접근할 수 있는 기회의 영향을 크게 받으며, ST의 에너지 수집 효율은 에너지 전송 채널 상태, 에너지 변환 효율, 에너지 수집 시간 등 요소와 더불어 PU가 사용하고 있는 채널에 접근할 수 있는 기회에 의해 결정된다.

RF 충전 CR 네트워크에서 ST의 전송 성능을 개선하기 위해 주변 후방산란 통신 (Ambient Backscatter Communication; AmBC) 기술의 적용방안이 제안되었다^[6]. AmBC 기술은 주변에 존재하는 신호를 반사하여 정보를 전송하는 장거리 통신 기술로서 별도의 전력소모가 발생하지 않기 때문에 에너지 수집과 결합하여 효율적인 무선전력 통신 네트워크를 구성할 수 있다^[7]. 또한 후방산란을 수행하는 단말이 Primary 수신단말로부터 7.2 인치 이상 떨어져 있으면 Primary 시스템에 간섭을 주지 않는다는 연구결과가 보고된 바 있으며^[8], 본 논문에서는 RF 충전 CR 네트워크에서 ST의 성능과 에너지 사용 효율을 개선하기 위해 주변 후방산란 기술을 활용하고자 한다.

Primary 채널에 접근하여 채널 상태에 적합한 동작

모드를 선택하여 수행하기 위해 ST는 주기적으로 Primary 채널을 센싱해야 하며, 본 논문에서는 타임 슬롯 기반 RF 충전 후방산란 CR 네트워크를 고려한다. 따라서 ST는 채널 상태 정보를 획득하기 위해 각 슬롯의 시작점에서 일정 구간 동안 Primary 채널을 센싱한다. 나머지 슬롯 구간에서 PU가 채널을 사용하고 있으면 Primary 신호로부터 에너지를 수집하거나 주변의 Primary 신호를 반사하여 정보를 전송하고, 대신에 채널이 비어 있으면 ST는 수집한 에너지를 사용하여 데이터를 전송한다. 본 논문에서 ST는 2차 수신단말 (Secondary Receiver; SR)에서의 신호대잡음비 (Signal-to-Noise Ratio; SNR)를 보장할 수 있는 일정 크기의 송신 전력을 사용하지만, 앞서 언급한 바와 같이 ST의 에너지 수집 효율은 에너지 전송 채널 상태, 에너지 변환 효율, 에너지 수집 시간, PU가 사용하고 있는 채널에 접근할 기회 등의 영향을 받는다. 따라서 채널 센싱을 제외한 동일 슬롯 구간을 고려하였을 때 ST가 수집 가능한 에너지보다 더 많은 양의 에너지를 데이터 전송에 사용할 수 있다. 또한 후방산란은 안테나에서 수신한 에너지를 반사하여 정보를 전달하기 때문에, Primary 채널이 사용되고 있을 때 에너지 수집과 후방산란을 순차적으로 수행하여 에너지 수집 시간이 줄어들고 결국엔 수집하는 에너지의 양이 감소하게 된다. 따라서 본 논문에서는 한 개의 에너지 레벨이 여러 개의 에너지 상태를 갖는 유사출생사멸 (Quasi-Birth-and-Death; QBD) 과정 기반 에너지 모델을 구축하고, 해당 모델로부터 에너지 상태의 정상 확률을 도출하여 ST의 전송 성능과 후방산란 성능을 도출하여 검증 및 분석하고자 한다.

II. RF 충전 후방산란 CR 네트워크

본 논문에서는 Primary 시스템과 Secondary 시스템이 각각 한 쌍의 송수신단으로 구성된 RF 충전 후방산란 CR 네트워크를 고려한다.

2.1 Primary 채널

ST는 Primary 채널에 접근하여 데이터 전송, 에너지 수집 및 후방산란을 수행하기 위해 주기적으로 Primary 채널을 센싱해야 한다. 따라서 본 논문에서는 타임 슬롯 구간이 $T \in \mathbb{R}^+$ 인 RF 충전 후방산란 CR 네트워크를 고려하였다. 여기서 \mathbb{R}^+ 은 양의 실수 집합을 의미한다. 각 슬롯에서 Primary 채널은 PU의 데이터 전송 패턴에 따라 PU에 의해 사용되거나 (Occupied; $C=1$) 비어 있게 되며 (Idle; $C=0$), 서로 상관된 2개의 상태인 Occupied와 Idle에서 각각 확률 p_o 와 p_i 로 다음 슬롯에서도 현재 슬롯에서의 채널 상태를 유지하도록 모델링하였다. 즉, 현재 슬롯에서 채널이 PU에 의해 사용되고 있으면 확률 p_o 로 다음 슬롯에서도 사용되거나, 확률 $(1-p_o)$ 로 다음 슬롯에서는 비어 있게 된다. Idle 상태에서 확률 p_i 로 Occupied 상태에서와 동일하게 채널 상태 전이가 발생하며, 따라서 임의의 슬롯에서 채널이 PU에 의해 사용되거나 비어 있을 정상확률은 각각 다음과 같게 된다.

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

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

2.2 Secondary 시스템

ST는 PU가 사용하고 있는 채널에 접근한 경우에 주변의 Primary 신호를 흡수하여 에너지를 수집하거나 Primary 신호를 반사하여 SR한테 정보를 전달한다. 수집한 에너지는 Primary 채널이 비어 있는 동안에 데이터를 전송하기 위해 사용된다. 따라서 ST는 기존의 송수신기 외에 동작 모드 (데이터 전송, 에너지 수집, 후방산란)를 제어하는 제어기, 에너지 수집기, 후방산란기 및 수집한 에너지를 저장하는 배터리로 구성된다.

2.2.1 에너지 검출

ST는 현재 Primary 채널의 상태를 알 수 없기 때문에, 그림 1에서와 같이 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. 즉, 검출된 에너지가 사전에 선택한 검출 임계값 ϵ 보다 작으면 Primary 채널이 비어 있다고 판단하고 ($\theta=0$), ϵ 보다

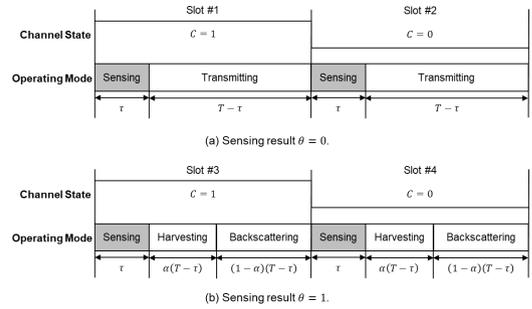


그림 1. 센싱 결과 θ 에 따른 ST의 동작 모드
Fig. 1. Operating mode corresponding to the sensing result θ

크면 채널이 PU에 의해 사용되고 있다고 판단한다 ($\theta=1$). 효율적인 데이터 전송과 에너지 수집 및 후방산란을 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^{9,10}.

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

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

여기서 $Q(x) \triangleq \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-t^2/2} dt$ 이며, γ_p 는 에너지 검출 과정에서 ST가 측정된 Primary SNR이다. 본 논문에서는 Primary 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 ST가 Primary 채널을 센싱하는 동안에 회로에서 소모하는 에너지를 고려하지 않았다.

2.2.2 데이터 전송

그림 1(a)에서와 같이 검출된 에너지가 ϵ 보다 작으면 ST는 Primary 채널이 비어 있다고 판단하여 데이터를 전송하려고 한다. 따라서 ST가 데이터를 전송하면서 에너지를 소모하는 확률을 다음과 같이 정의할 수 있으며, 오직 2개의 채널 상태가 존재하기 때문에 다음 (5)의 두 번째 등식이 성립한다.

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

ST가 $(T - \tau_s)$ 동안 데이터를 전송하기 위해 필요한 에너지를 E_c 라 하면, 배터리에 저장된 에너지가 E_c 보다 적으면 ST의 데이터 전송이 제한된다. 이와 같은 에너지 상태를 에너지-부족 (Energy-deficient) 상태로 정의하며, 에너지-부족 상태를 제외한 모든 에너지 상태에서 데이터 전송이 가능하게 된다. 본 논문에서 SR은 ST에 비해 고효율의 에너지 사용이 가능하다고 가정하였기 때문에 ST가 일정 크기의 송신전력으로 데이터를 전송하는 동시에 Primary 시스템과의 충돌이 발생하지 않으면 SR은 높은 확률로 페이딩된 신호를 복호할 수 있게 된다. 따라서 채널 용량으로 표현되는 SR에서의 성능보다 데이터 전송을 지원할 수 있는 에너지를 수집하여 축적해야 하며 실제로 비어 있는 Primary 채널에 접근할 수 있는 기회를 정확하게 확보해야 하는 ST의 정규화된 전송 성능을 주로 고려하며, 이와 같은 ST의 전송 성능은 다음과 같이 도출할 수 있다.

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

여기서 π_0 은 에너지-부족 상태가 발생할 정상확률을 의미한다.

2.2.3 에너지 수집 및 주변 후방산란

검출된 에너지가 ϵ 보다 크면 ST는 PU가 채널을 사용하고 있다고 판단하여 Primary 신호로부터 에너지를 수집하거나 후방산란을 통해 SR한테 정보를 전달하게 된다. 에너지 수집은 안테나에서 수신한 신호를 흡수해야 하는 반면에 후방산란은 안테나에서 일정한 양의 에너지를 반사하여 정보를 전달한다. 따라서 효율적으로 에너지를 수집하기 위해 후방산란과 에너지 수집을 동시에 진행할 수 없으며, 그림 1(b)에서와 같이 에너지 수집과 후방산란을 순차적으로 수행하는 방안을 고려한다. 여기서 $\alpha \in (0, 1]$ 이며, α 가 1에 가까울수록 에너지 수집 구간이 길어지고 α 가 0에 가까울수록 후방산란을 더 오랫동안 수행한다.

ST는 먼저 $\alpha(T - \tau_s)$ 동안 에너지를 수집하여 배터리에 저장하며, 이 때 그림 1(b)의 두 번째 슬롯에서와 같이 오경보가 발생하면 주변에 Primary 신호가 존재하지 않기 때문에 ST의 에너지 상태는 변하지 않는다. 따라서 ST가 실제로 에너지를 수집하여 축적할 수 있는 확률을 다음과 같이 도출할 수 있다.

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

에너지 수집에 이어서 ST는 후방산란을 수행하여 정보를 전송하게 된다. 후방산란 회로는 Dipole 안테나의 Branch 사이에 Transistor로 구성된 스위치를 연결하여 구현할 수 있다. 스위치의 입력은 '1'과 '0'으로 구성된 시퀀스이며 안테나의 임피던스를 제어하여 후방산란을 수행한다. 스위치에 '0'이 입력되면 Transistor가 꺼지면서 신호를 흡수하기 때문에 안테나에서 소량의 에너지가 반사되는 반면에 '1'이 입력되면 Transistor가 켜지면서 Dipole 안테나의 Branch 사이에서 Short 현상이 발생하여 많은 양의 에너지를 반사하게 된다. 이와 같이 안테나의 임피던스를 제어하여 에너지를 반사하는 후방산란 회로를 구현하기 위해 Reflective 스위치의 하나인 ADG902 RF 스위치를 사용할 수 있으며, ADG902 RF 스위치의 소모 전력은 약 $0.275 \mu W$ 이다^[11]. 따라서 본 논문에서는 후방산란 회로에서 소모하는 에너지를 고려하지 않으며, 최종적으로 에너지 상태에 변화가 없을 확률은 다음과 같게 된다.

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

후방산란 성능은 수신단 복호회로의 영향을 크게 받기 때문에 Closed-form으로 도출하는 것은 거의 불가능하다. 또한 본 논문에서는 SR의 고효율 에너지 사용을 고려하여 높은 복호 성능을 가정하였기 때문에, ST가 주변 Primary 신호를 정확하게 검출하여 후방산란을 수행할 수 있는 성능을 주로 고려하며, 다음과 같이 ST의 정규화된 후방산란 성능을 도출할 수 있다.

$$R_b = (1 - \pi_{0,1})(1 - \alpha)P_d\pi_o, \quad (9)$$

여기서 $\pi_{0,1}$ 은 에너지 상태 (0, 1)의 정상확률이다. 본 논문에서는 에너지 상태 (0, 1)을 에너지-고갈 (Energy Outage) 상태로 정의하였으며, ST의 지속적인 동작을 보장하기 위해 에너지-고갈 상태에서는 항상 에너지 수집을 우선적으로 수행하도록 하였다. 따라서 ST는 에너지-고갈 상태를 제외한 모든 에너지 상태에서 후방산란을 수행할 수 있게 된다. 앞서 언급한 바와 같이 Dipole 안테나의 Branch 사이에 Transistor로 구성된 스위치를 연결하여 후방산란 회로를 구현하며, 스위치의 입력에 따라 안테나의 임피던스를 제어하여 RF 신호를 흡수하거나 반사하여 후방산란을 수행한다. 따라서 스위치의 입력 비트 간격

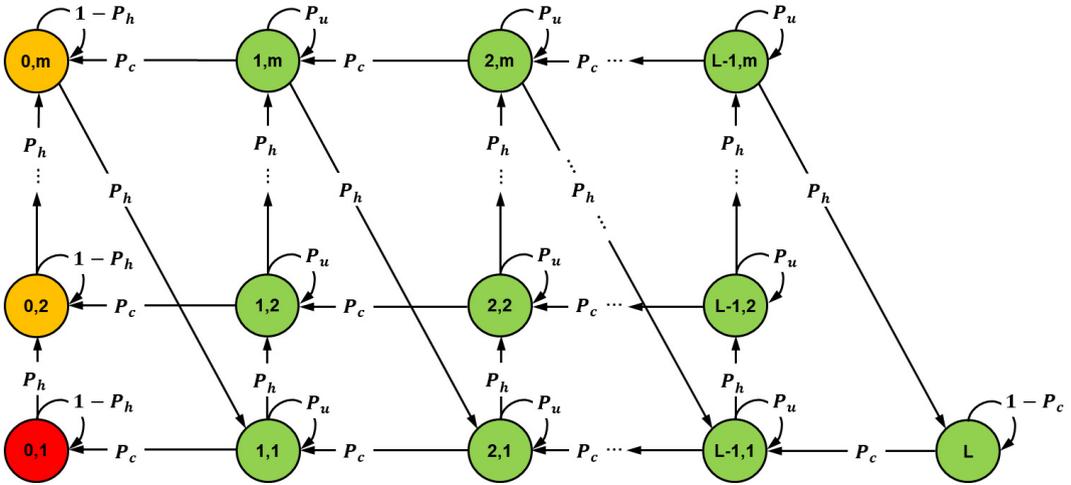


그림 2. QBD 기반 에너지 모델 예시 ($\alpha=1$)
 Fig. 2. An example of QBD-based energy model ($\alpha=1$)

이 일정한 때 후방산란 구간이 길수록 스위치의 입력 시퀀스가 길어져 후방산란을 통해 전송 가능한 비트의 개수가 많아지게 된다.

III. QBD 기반 에너지 모델

추가적인 에너지 공급원을 고려하지 않았기 때문에 ST의 에너지는 데이터 전송에 따라 감소하고 에너지 수집을 통해 증가한다. 앞서 언급한 바와 같이 동일 시간 동안에 수집한 에너지는 데이터 전송을 위해 필요한 에너지보다 부족할 수 있다. 따라서 $(T - \tau_s)$ 동안에 수집할 수 있는 에너지를 E_h 라고 하고 본 논문에서는 데이터를 전송하면서 소모하는 에너지와 $E_c = mE_h$ 의 관계식을 갖는다고 가정하였다. 또한 배터리가 완전히 충전되면 ST는 데이터를 연속적으로 L 번 전송할 수 있다고 가정하였으며, 따라서 $\alpha=1$ 인 경우에 그림 2에서와 같이 에너지 상태 공간 $\{(n, j), n=0, \dots, L, j=1, \dots, m\}$ 을 갖는 QBD 기반 에너지 추적 모델을 구축할 수 있게 된다. 해당 에너지 모델로부터 에너지 레벨 $l(n)$ ($n=1, \dots, L$)에서 ST가 데이터를 전송하면 하위 레벨 $l(n-1)$ 로 전이하고, 임의의 에너지 레벨 $l(n)$ ($n=0, \dots, L-1$)에서 ST가 에너지를 수집하면 상위 레벨 $l(n+1)$ 로 전이할 수 있지만 반드시 에너지 상태 (n, m) 을 통해서 진입 가능한 것을 알 수 있다.

3.1 전이확률행렬

ST의 성능을 개선하기 위해 후방산란 기능을 적용

하면서 에너지 수집 구간은 $\alpha(T - \tau_s)$ ($\alpha < 1$)로 줄어든다. 본 논문에서는 ST의 에너지 수집에 영향을 주는 여러 조건들 중에서도 에너지 수집 시간의 영향을 주로 고려하며, ST는 단축된 에너지 수집 구간 동안에 E_h 보다 적은 양의 에너지를 수집하게 된다고 가정하였다. 따라서 그림 2에서의 에너지 상태 (n, j) ($n=0, \dots, L-1, j=1, \dots, m$)에서 ST가 에너지를 수집하여도 에너지 상태 $(n, j+1)$ 이나 상위 레벨 $l(n+1)$ 로 전이하지 못하고 α 의 값에 따라 (n, j) 와 $(n, j+1)$ 또는 $(n+1, 1)$ 사이의 임의의 에너지 상태에 도달하게 된다. $\alpha < 1$, 즉 에너지 수집과 후방산란 기능을 모두 갖는 ST의 에너지 추적 모델을 구축하기 위해 QBD 과정의 상태 공간을 $\{(n, j), n=0, \dots, L, j=1, \dots, \tilde{m}\}$ 로 변경하였으며, 여기서 \tilde{m} 는 α 에 의해 다음과 같이 결정된다. α 를 지수형태 $\beta \times 10^{-x}$ 으로 표현한 후, 그림 2에서 에너지 수집을 통해 전이가 발생하는 인접한 에너지 상태들 사이에 $(10^x - 1)$ 개의 에너지 상태를 추가하였다. 따라서 에너지 레벨 $l(n)$ ($n=0, \dots, L-1$)은 $(m + m \times (10^x - 1))$ 개의 에너지 상태를 갖게 되어 $\tilde{m} = m \times 10^x$ 이 된다. 또한 β 는 에너지를 수집한 후 한 번에 도달할 수 있는 에너지 상태의 수가 되어 에너지 상태 (n, j) 에서 에너지를 수집하면 상태 $(n, j+\beta)$ 로 전이하며, 이 때 $j+\beta > \tilde{m}$ 이면 상위 레벨 $l(n+1)$ 로 전이하게 된다. 해당 에너지 모델의 전이확률행렬 (Transition Probability Matrix)은 다음의 형태를 갖는다.

표 1. 행렬 \mathbf{B} , \mathbf{A}_2 , \mathbf{A}_1 , \mathbf{A}_0 의 계산
Table 1. Computation of matrices \mathbf{B} , \mathbf{A}_2 , \mathbf{A}_1 , and \mathbf{A}_0

```

1: Initialization  $t = 1, i^1 = 1$ 
2: while  $i^t = i^1$  and  $t > 1$  do
3:    $j^t = i^t + \beta$ 
4:    $(\mathbf{B})_{ii} = 1 - P_h$ 
5:    $(\mathbf{A}_2)_{ii} = P_c$ 
6:    $(\mathbf{A}_1)_{ii} = P_u$ 
7:   if  $j^t > \tilde{m}$  then
8:      $j^t = \text{rem}(j^t, \tilde{m})$ 
9:      $(\mathbf{A}_0)_{ij} = P_h$ 
10:  else
11:     $(\mathbf{B})_{ij} = P_h$ 
12:     $(\mathbf{A}_1)_{ij} = P_h$ 
13:  end if
14:   $t = t + 1$ 
15:   $i^t = j^{t-1}$ 
16: end while

```

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \mathbf{B} \mathbf{A}_0 & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{A}_2 \mathbf{A}_1 \mathbf{A}_0 & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_2 \mathbf{A}_1 & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{A}_1 & \mathbf{A}_0 \\ \mathbf{0}_1 & \mathbf{0}_1 & \mathbf{0}_1 & \cdots & (\mathbf{A}_2)_1 & (\mathbf{I} - \mathbf{A}_2)_1 \end{bmatrix}, \quad (10)$$

여기서 \mathbf{B} , \mathbf{A}_2 , \mathbf{A}_1 , \mathbf{A}_0 은 모두 $\tilde{m} \times \tilde{m}$ 행렬이며, $\mathbf{0}$ 은 $\tilde{m} \times \tilde{m}$ 영행렬을 의미한다. 또한 $(\cdot)_1$ 은 행렬의 첫 번째 행을 나타낸다. 행렬 \mathbf{B} 와 \mathbf{A}_1 의 비대각 원소들은 ST가 각각 에너지 레벨 $l(0)$ 과 $l(n)$ ($n=1, \dots, L-1$)에서 에너지를 수집한 후 동일 레벨 내의 에너지 상태로 전이할 확률을 의미하며, 대각 원소들은 기존의 에너지 상태를 유지할 확률을 의미한다. 행렬 \mathbf{A}_2 의 대각 원소는 에너지 레벨 $l(n)$ ($n=1, \dots, L-1$)에서 ST가 데이터를 전송하면서 에너지를 소모하여 하위 레벨 $l(n-1)$ 로 전이할 확률이며, 비대각 원소는 모두 0이다. 행렬 \mathbf{A}_0 의 (i, j) 원소는 ST가 하위 에너지 레벨의 상태 (n, i) ($n=0, \dots, L-1$)에서 에너지를 수집하여 상위 에너지 레벨의 상태 $(n+1, j)$ 에 도달할 확률을 의미한다. 행렬 \mathbf{P} 의 각 소행렬들은 에너지 레벨 $l(0)$ 에 해당되는 첫 번째 행을 제외하고 두 번째 행부터 동일한 전이패턴 $\{\mathbf{A}_2, \mathbf{A}_1, \mathbf{A}_0\}$ 을 반복한다. 따라서 QBD 기반 에너지 모델이 레벨독립임을 알 수 있으며, 소행렬들의

(i, j) 원소는 표 1의 알고리즘을 통해 주어진다. 이 표에서 $\text{rem}(a, b)$ 는 a 를 b 로 나눈 후 나머지 값을 취하는 연산을 나타낸다.

3.2 레벨독립 QBD

레벨독립 QBD 과정에서 에너지 레벨 $l(n)$ 의 정상확률벡터 $\boldsymbol{\pi}_n = [\pi_{n,1}, \dots, \pi_{n,\tilde{m}}]$ 는 다음의 관계식을 갖는다^[12].

$$\boldsymbol{\pi}_n = \boldsymbol{\pi}_{n-1} \mathbf{R} \quad (n \geq 1), \quad (11)$$

여기서 \mathbf{R} 은 $\tilde{m} \times \tilde{m}$ 행렬이며, \mathbf{R} 의 (i, j) 원소는 에너지 상태 $(n-1, i)$ 에서 출발하여 결국 다시 에너지 레벨 $l(n-1)$ 로 돌아오기 전까지 에너지 상태 (n, j) 를 방문하는 평균횟수이다. 또한 (11)은 다음을 의미한다.

$$\boldsymbol{\pi}_n = \boldsymbol{\pi}_0 \mathbf{R}^n \quad (n \geq 0). \quad (12)$$

따라서 에너지 레벨 $l(n)$ 의 정상확률벡터 $\boldsymbol{\pi}_n$ 을 구하려면 행렬 \mathbf{R} 이 먼저 계산되어야 한다. 행렬 \mathbf{R} 은 직접 계산할 수 없기 때문에 QBD 과정의 특징을 가장 잘 표현하면서 다음의 관계를 갖는 $\tilde{m} \times \tilde{m}$ 행렬 \mathbf{U} 와 \mathbf{G} 를 사용한다^[13,14].

$$\mathbf{U} = \mathbf{A}_1 + \mathbf{A}_0 \mathbf{G}, \quad (13)$$

$$\mathbf{G} = (\mathbf{I} - \mathbf{U})^{-1} \mathbf{A}_2, \quad (14)$$

$$\mathbf{R} = \mathbf{A}_0 (\mathbf{I} - \mathbf{U})^{-1}, \quad (15)$$

$$\mathbf{U} = \mathbf{A}_1 + \mathbf{R} \mathbf{A}_2. \quad (16)$$

행렬 \mathbf{U} 의 (i, j) 원소는 에너지 상태 $(1, i)$ ($i=1, \dots, \tilde{m}$)에서 출발하여 에너지 레벨 $l(0)$ 에 도달하기 전에 에너지 상태 $(1, j)$ ($j=1, \dots, \tilde{m}$)를 통해 에너지 레벨 $l(1)$ 을 방문할 확률을 의미한다. 즉, U_{ij} 는 에너지 상태 $(1, i)$ ($i=1, \dots, \tilde{m}$)에서 출발하여 에너지 상태 $(1, j)$ ($j=1, \dots, \tilde{m}$)를 통해 에너지 레벨 $l(1)$ 을 방문하는 동안에 에너지 레벨 $l(0)$ 을 거치지 않을 타부확률이다. 행렬 \mathbf{G} 의 (i, j) 원소는 에너지 상태 $(1, i)$ ($i=1, \dots, \tilde{m}$)에서 출발하여 언젠가는 에너지 레벨 $l(0)$ 에 도달하되 에너지 상태 $(1, j)$

표 2. 행렬 U 와 G 의 계산
Table 2. Computation of matrices U and G

1: Initialization $t = 1, G_0 = 0$
2: if $\ e - G_t e\ > \kappa$ then
3: $U_t = A_1 + A_0 G_{t-1}$
4: $G_t = (I - U_t)^{-1} A_2$
5: $t = t + 1$
6: end if

($j = 1, \dots, \tilde{m}$)를 통해 도달할 확률을 의미한다. 레벨 독립 QBD이기 때문에 모든 에너지 레벨 $l(n)$ ($n = 1, \dots, L$)에서 동일한 확률행렬 U 와 G 를 갖게 되며, 관계식 (13)~(16)이 성립된다.

행렬 R 을 구하기 위해 본 논문에서는 표 2에서 주어지는 알고리즘과 같이 (13)과 (14)를 이용하여 반복적으로 U 와 G 를 먼저 계산한다. t 가 커짐에 따라 행렬 U 와 G 가 단조증가하여 미리 설정한 값 κ 를 만족하면 알고리즘을 종료한 후, (15)를 이용하여 행렬 R 을 구한다.

3.3 정상확률 π_0

앞서 언급한 바와 같이 ST는 에너지 레벨 $l(n)$ ($n = 1, \dots, L$)에서 비어 있는 채널을 통해 데이터를 전송 가능하고, 에너지 소모가 거의 발생하지 않는 후방산란은 에너지-고갈 상태 (0,1)을 제외한 모든 에너지 상태에서 동작 가능하다. 따라서 ST의 전송 성능과 후방산란 성능을 계산하기 위해 에너지 레벨 $l(0)$ 의 정상확률벡터 $\pi_0 = [\pi_{0,1}, \dots, \pi_{0,\tilde{m}}]$ 를 구해야 한다.

QBD 기반 에너지 모델을 $\{l(0)\}$ 과 $D = \{l(1), \dots, l(L)\}$ 의 두 개의 집단으로 나눈다. 제안한 QBD 기반 에너지 모델은 양재귀 (Positive Recurrent)하기 때문에 정상확률벡터와 전이확률행렬이 $\pi = \pi P$ 를 만족하며, 따라서 다음과 같이 표현된다.

$$[\pi_0 \pi_D] = [\pi_0 \pi_D] \begin{bmatrix} P_{00} & P_{0D} \\ P_{D0} & P_{DD} \end{bmatrix}, \quad (17)$$

여기서 $\pi_D = [\pi_{1,1}, \dots, \pi_{1,\tilde{m}}, \pi_{2,1}, \dots, \pi_{2,\tilde{m}}, \dots, \pi_L]$ 은 에너지 상태 (n, j) ($n = 1, \dots, L, j = 1, \dots, \tilde{m}$)의 정상확률로 구성된 $1 \times \hat{m}$ ($\hat{m} = (L-1)\tilde{m} + 1$) 확률벡터를 의미한다. P_{00} 은 에너지 상태 $(0, j)$ ($j = 1, \dots, \tilde{m}$)들간에서의 $\tilde{m} \times \tilde{m}$ 전이확률행렬을 나타내며, (10)에 의하면 $P_{00} = B$ 이다. 또한 P_{DD} 는 에

너지 상태 (n, j) ($n = 1, \dots, L, j = 1, \dots, \tilde{m}$)들간에서의 $\hat{m} \times \hat{m}$ 전이확률행렬을 의미한다. 따라서 P_{0D} 와 P_{D0} 은 각각 에너지 레벨 $l(0)$ 에서 에너지 레벨 $l(n)$ ($l(n) \in D$)으로의 $\tilde{m} \times \hat{m}$ 전이확률행렬과 에너지 레벨 $l(n)$ ($l(n) \in D$)에서 에너지 레벨 $l(0)$ 으로 전이할 확률들로 구성된 $\hat{m} \times \tilde{m}$ 행렬이다. (17)을 정리하여 다음을 얻을 수 있다.

$$\pi_0 = \pi_0 P_{00} + \pi_D P_{D0}, \quad (18)$$

$$\pi_D = \pi_0 P_{0D} + \pi_D P_{DD}. \quad (19)$$

(19)를 π_D 에 대해 정리하여 (18)에 대입하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\pi_0 = \pi_0 [B + A_0 (I - P_{DD})^{-1} A_2]. \quad (20)$$

즉, 국소 모델 $\{l(0)\}$ 의 전이확률행렬은 결국 에너지 레벨 $l(0)$ 내의 상태들 간에서 전이가 발생하거나 (B), $l(0)$ 을 이탈하여 상태집단 D 로 전이한 후 (A_0) 계속하여 D 에 머물다가 $((I - P_{DD})^{-1})$ 언젠가 에너지 레벨 $l(0)$ 으로 돌아오는 (A_2) 확률들로 표현된다. 에너지 레벨 $l(0)$ 과 상태집단 D 는 에너지 레벨 $l(1)$ 을 통해서만 전이가 가능하기 때문에 $(I - P_{DD})^{-1}$ 은 결국 $l(1)$ 에서 출발하여 $l(0)$ 에 도달하기 전까지 $l(1)$ 을 방문하는 평균횟수를 나타낸다. 에너지 레벨 $l(1)$ 에서 행렬 U 의 의미를 되새겨 보면, (i, j) 원소는 $(1, i)$ 에서 출발하여 $l(0)$ 에 도달하기 전에 $(1, j)$ 를 통해 $l(1)$ 을 방문할 타부확률이다. 따라서 $(1, i)$ 에서 출발하여 k 번 전이하여 $(1, j)$ 에 도달하였다면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\sum_{k=1}^{\infty} U^k = (I - U)^{-1}. \quad (21)$$

(21)은 결국 $(I - P_{DD})^{-1}$ 와 동일하며, 따라서 (20)은 다음과 같게 된다.

$$\pi_0 = \pi_0 [B + A_0 (I - U)^{-1} A_2]. \quad (22)$$

또한 정상확률벡터 $\pi = [\pi_0, \dots, \pi_L]$ 에 대해 $\pi e = 1$ 이므로, 정규화 조건에 의해 최종적으로 에너지 레벨 $l(0)$ 의 정상확률벡터 π_0 을 구할 수 있게 된다.

IV. 모의실험 결과

Monte-Carlo 모의실험을 진행하여 QBD 기반 에너지 모델로부터 도출한 에너지 부족 상태의 정상 확률과 ST의 성능 ($R = R_t + R_b$)을 분석하였다. 모의 실험에서 $T = 100$ ms, $\tau_s = 2$ ms, $f_s = 1$ MHz, $\sigma_w^2 = 10$, $\gamma_p = -10$ dB, $L = 5$ 를 고려하였다.

ST는 Primary 신호로부터 에너지를 수집하면 채널이 비어 있는 동안에 해당 에너지를 사용하여 데이터를 전송하며, 에너지가 충분히 축적되어야만 데이터 전송이 가능하다. 또한 ST는 주변 신호가 존재할 때 후방산란을 통해 SR에게 정보를 전송할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 후방산란을 통해 개선된 ST의 전송 성능을 확인하기 위해 전이확률 $p_i = 0.5$ 로 고정시키고 α 의 값과 Primary 채널의 전이확률 p_o 에 따른 성능 위주로 검증 및 분석을 진행하였다. 이 때 에너지 검출 오경보 확률은 $\bar{P}_f = 0.01$ 로 설정하였으며, 이와 같은 목표 오경보 확률을 만족하는 검출 임계값 ϵ 을 도출한 후 ST에서 측정된 Primary SNR $\gamma_p = -10$ dB를 고려하여 ST가 Primary 신호를 정확하게 검출할 확률 P_d 를 계산하였다. 또한 QBD 기반 에너지 모델에 대해 $m = 2$ 를 고려하였다.

그림 3과 4는 각각 α 의 값과 Primary 채널의 전이확률 p_o 에 따른 에너지-고갈 상태가 발생할 정상 확률과 에너지-부족 상태가 발생할 정상 확률을 도시한다. 그림 5는 α 의 값과 Primary 채널의 전이확률 p_o 에 따른 ST의 성능을 도시한다. 전이확률 p_i 가 변하지 않으면 p_o 가 커질수록 Primary 채널은 PU에 의해 자주

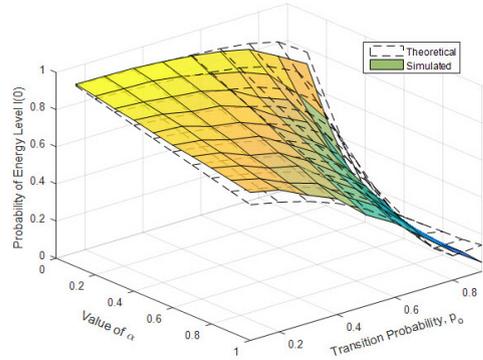


그림 4. α 의 값과 전이확률 p_o 에 따른 에너지-부족 상태의 정상 확률
Fig. 4. Probability of energy level $l(0)$ corresponding to the value of α and transition probability p_o

사용된다. 이 때 α 가 1에 접근하면 ST는 후방산란보다 에너지를 더 오랫동안 수집하기 때문에 그림 3과 4에서와 같이 에너지-고갈 상태와 에너지-부족 상태가 발생할 확률이 감소하여 ST의 전송 성능은 개선되다가, 에너지는 충분하지만 데이터 전송 기회가 크게 줄어들어 그림 5에서와 같이 ST의 성능이 다시 저하되는 것을 알 수 있다. 반면에 α 가 0에 가까우면 후방산란 구간이 길어져 에너지-부족 상태가 발생할 확률은 크게 감소하지 않지만 후방산란은 에너지-고갈 상태를 제외한 모든 에너지 상태에서 수행 가능하기 때문에 그림 5에서와 같이 PU가 채널을 자주 사용할수록 ST의 성능이 계속해서 좋아지는 것을 알 수 있다.

추가적으로 에너지 상태 (1, 1)에서 데이터를 전송하면 에너지를 소모하여 하위 에너지 상태인 에너지-고갈 상태로 전이하게 되며, 이 때 에너지를 수집할

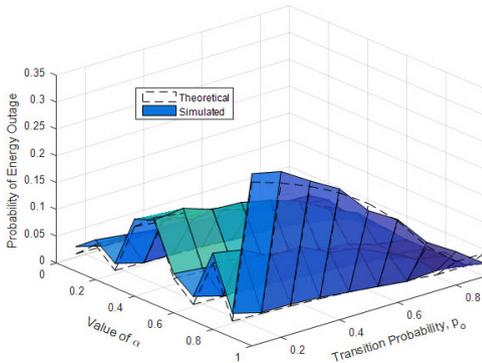


그림 3. α 의 값과 전이확률 p_o 에 따른 에너지-고갈 상태의 정상 확률
Fig. 3. Probability of energy outage corresponding to the value of α and transition probability p_o

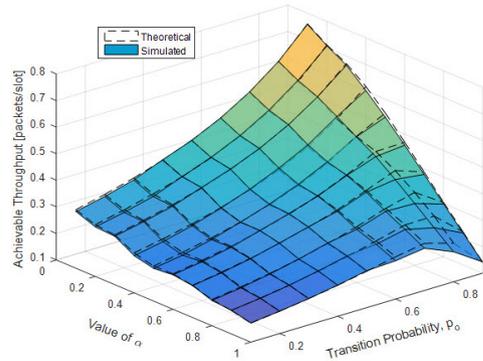


그림 5. α 의 값과 전이확률 p_o 에 따른 ST의 성능
Fig. 5. Achievable secondary throughput corresponding to the value of α and transition probability p_o

확률이 낮으면 에너지-고갈 상태에 오랫동안 머무르게 된다. 따라서 그림 3에서와 같이 전이확률 p_o 가 작은 경우에 에너지 상태 (1,1)에 빨리 도달할 수 있는 α 값들이 상대적으로 높은 Energy Outage 확률을 갖는 것을 확인할 수 있다. 즉, $m = 2$ 인 경우에 α 가 1이면 최소 2번의 전이를 거쳐 에너지 상태 (1,1)에 도달하기 때문에 에너지-고갈 상태가 발생할 확률이 가장 크게 나타나고, α 가 0.1, 0.3, 0.7, 0.9이면 최소 20번 전이하여 에너지 상태 (1,1)에 도달하기 때문에 Energy Outage 확률이 상대적으로 작은 것을 알 수 있다. 이와 같은 현상이 ST의 성능에 주는 영향은 그림 5를 통해 확인할 수 있다.

그림 6은 m 값이 다양할 때 α 에 따른 ST의 전송 성능 R_t 와 후방산란 성능 R_b 의 변화를 도시한다. Primary 채널의 전이확률 $p_i = p_o = 0.5$ 를 고려하였으며, 기타 파라미터는 위와 동일한 값을 갖도록 하였다. p_i 와 p_o 가 변하지 않으면 α 가 증가할수록 에너지 수집 확률이 증가하여 ST의 데이터 전송 성능은 개선된다. 이 때 m 이 클수록 에너지 레벨 $l(0)$ 에서 데이터 전송이 가능한 상위 에너지 레벨로 전이하기 어렵기 때문에 전송 성능의 개선폭이 작은 것을 알 수 있다. 후방산란 성능은 α 가 증가할수록 감소하나 m 의 영향은 크게 받지 않는 것을 알 수 있다. 이는 에너지의 영향을 크게 받는 전송 성능과는 달리 후방산란은 적은 에너지로 구현 가능하여 에너지-고갈 상태를 제외한 모든 에너지 상태에서 수행할 수 있기 때문이다. 또한 α 가 증가할수록 ST의 전송 성능 개선폭이 후방산란 성능의 감소보다 작기 때문에 ST의 성능은 전체적으로 감소하는 것을 알 수 있으며, 이와 같은 결과

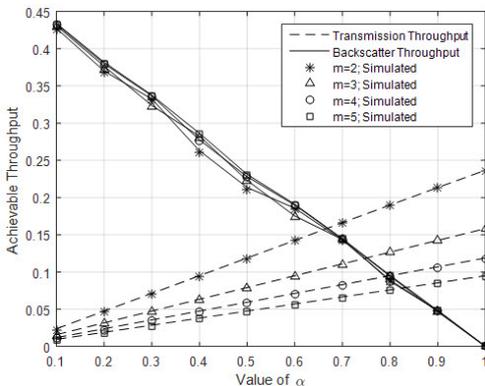


그림 6. α 의 값과 m 에 따른 ST의 전송 성능 및 후방산란 성능
 Fig. 6. Achievable transmission and backscatter throughput corresponding to the values of α and m

는 그림 5에서 도시한 것과 일치하게 된다.

V. 결론

본 논문에서는 RF 충전 CR 네트워크에서 ST의 성능을 개선하기 위해 주변 Primary 신호를 반사하여 정보를 전송하는 AmBC 기술의 활용방안을 고려하였다. 효율적인 에너지 수집을 위해 ST는 PU가 사용하고 있는 채널에 접근하여 순차적으로 에너지 수집과 후방산란을 수행하며, Primary 채널이 비어 있으면 수집한 에너지를 사용하여 데이터를 전송한다. 여러 요소의 영향을 심각하게 받는 에너지 수집 성능을 고려하여 QBD 기반 에너지 모델을 구축하였으며, 해당 모델로부터 에너지-고갈 상태를 포함한 에너지 레벨 $l(0)$ 의 정상확률을 도출하였다. 이를 기반으로 충분한 에너지를 필요로 하는 ST의 전송 성능과 에너지 소모가 상당히 적은 후방산란 성능을 도출하여 Monte-Carlo 모의실험을 통해 검증 및 분석하였다. 모의실험 결과로부터 AmBC 기술은 RF 충전 CR 네트워크에서 ST의 성능을 효율적으로 개선할 수 있음을 확인하였다. 특히 에너지 수집 성능이 낮은 경우에 후방산란을 최대한 활용하여 ST의 성능을 개선시킬 수 있음을 확인하였다.

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] Y. Bae and H. Baek, "Achievable throughput analysis of opportunistic spectrum access in cognitive radio networks with energy harvesting," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 64, no. 4, pp. 1399-1410, Apr. 2016.
- [3] C. Xu, M. Zheng, W. Liang, H. Yu, and Y.-C. Liang, "Outage performance of underlay multihop cognitive relay networks with energy harvesting," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 20, no. 6, pp. 1148-1151, Jun. 2016.
- [4] Z. Qin, Y. Liu, Y. Gao, M. Elkashlan, and A. Nallanathan, "Wireless powered cognitive radio networks with compressive sensing and matrix completion," *IEEE Trans. Commun.*,

vol. 65, no. 4, pp. 1464-1476, Apr. 2017.

[5] M. Ahmed, D. I. Kim, J. Y. Kim, and Y. Shin, "Energy-arrival-aware detection threshold in wireless-powered cognitive radio networks," *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 66, no. 10, pp. 9201-9213, Oct. 2017.

[6] D. Hoang, D. Niyato, P. Wang, D. I. Kim, and Z. Han, "Ambient backscatter: A new approach to improve network performance for RF-powered cognitive radio networks," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 65, no. 9, pp. 3659-3674, Sept. 2017.

[7] S. Choi and D. I. Kim, "Backscatter communication for wireless-powered communication networks," *J. KICS*, vol. 40, no. 10, pp. 1900-1911, Oct. 2015.

[8] V. Liu, A. Parks, V. Talla, S. Gollakota, D. Wetherall, and J. R. Smith, "Ambient backscatter: Wireless communication out of thin air," in *Proc. ACM SIGCOMM 2013*, Hong Kong, China, Aug. 2013.

[9] 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.

[10] 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.

[11] *ADG902 RF Switch Datasheet*, https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/ADG901_902.pdf

[12] G. Bolch, S. Greiner H. Meer, and K. S. Trivedi, *Queueing Networks and Markov Chains: Modeling and Performance Evaluation with Computer Science Applications*, 2nd Ed., Wiley, 2006.

[13] B. Hajek, "Birth-and-death processes on the integers with phases and general boundaries," *J. Appl. Prob.*, vol. 19, no. 3, pp. 488-499, Sept. 1982.

[14] 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.

오 선 애 (Shanai Wu)

한국통신학회논문지 Vol. 41, No. 9 참조

김 진 영 (Jin Young Kim)

한국통신학회논문지 Vol. 38C, No. 11 참조

김 동 인 (Dong In Kim)

한국통신학회논문지 Vol. 41, No. 9 참조

신 요 안 (Yoan Shin)

한국통신학회논문지 Vol. 41, No. 9 참조