

RF 충전 후방산란 CR 네트워크에서 2차 시스템의 전송 성능 향상 방안

오 선 애*, 김 진 영*, 김 동 인**, 신 요 안^o

An Approach to Improve Achievable Secondary Throughput 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 전송 성능을 개선하기 위해 주변에 존재하는 RF 신호를 반사하여 정보를 전송하는 주변 후방산란 통신 (Ambient Backscatter Communications; AmBC) 기술의 활용방안을 고려하였다. ST는 에너지 수집과 마찬가지로 점유된 1차 (Primary) 채널에 접근하여 주변 후방산란을 수행하며, 수신 신호를 흡수해야 하는 에너지 수집과 달리 안테나에서 수신한 에너지를 반사하는 방식으로 데이터 비트를 전달한다. 따라서 효율적으로 에너지를 충전하기 위해 본 논문에서는 점유된 채널을 검출하였을 때 ST가 확률 기반으로 에너지 수집과 주변 후방산란 중에서 한 개의 모드를 선택하여 수행하는 방안을 고려한다. 추가적인 에너지 공급원을 고려하지 않기 때문에 1차 채널이 비어 있으면 ST는 수집한 에너지를 사용하여 데이터를 전송하게 된다. 이와 같이 동작하는 ST가 달성 가능한 전송 성능과 후방산란 성능을 도출하기 위해 각 동작 모드를 지원하는 에너지 상태가 발생할 확률이 필요하게 되며, 본 논문에서는 레벨독립 유사출생사멸 (Quasi-Birth-and-Death; QBD) 과정에 기반하여 에너지의 상태 변화를 제공할 수 있는 모델을 구축하였으며, 간략하여 에너지 축적 모델이라고 명명하였다. 또한 2차 시스템의 성능을 한층 더 향상시키기 위해 ST가 보유한 에너지의 레벨을 고려하여 모드 선택 확률을 유연하게 제어하는 방안을 제안하였으며, 레벨종속 QBD 기반 에너지 축적 모델을 구축하여 에너지 상태의 정상확률을 도출하였다. Monte-Carlo 모의실험을 통해 에너지 축적 모델로부터 산출한 에너지 상태의 정상확률을 검증 및 분석하였으며, 레벨독립 방안과 레벨종속 방안을 통해 ST가 달성 가능한 성능을 비교 및 분석하였다.

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

ABSTRACT

To improve the achievable throughput, we consider the application of the ambient backscatter communications with which the secondary transmitter (ST) can transmit information using a negligible amount of energy. In RF-powered backscatter cognitive radio networks, the ST can charge energy by absorbing the primary signal and can also convey data bits by reflecting the energy received at the antenna. In this paper, to support efficient

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

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

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

* Kwangwoon University, School of Electronics Engineering, jinyoung@kw.ac.kr, 종신회원

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

논문번호 : 201905-081-B-RN, Received May 13, 2019; Revised July 24, 2019; Accepted July 26, 2019

energy replenishment, we assume the operation mode, i.e., energy harvesting or ambient backscattering, is stochastically selected by the controller when the primary channel is detected as busy. Without additional energy supply, the ST transmits data using the harvested energy when the primary channel becomes idle. Therefore, the residual energy at the battery will change with an operation mode, and we derive the transmission and backscatter throughputs considering the available energy. Then, we develop a level-independent quasi-birth-and-death (QBD) process based energy accumulation model to derive the stationary probabilities of energy states. To achieve further improvements on the secondary throughput, we propose an energy level-dependent scheme so that the ST can flexibly control the selection probability at each energy state, and build a level-dependent QBD based energy accumulation model. Finally, Monte-Carlo simulation is performed to validate the stationary probabilities of energy states and to compare the achievable secondary throughputs between level-independent and level-dependent schemes.

1. 서 론

주변의 무선 주파수 (Radio Frequency; RF) 신호를 흡수하여 에너지를 충전하는 RF 에너지 수집 기술과 주파수의 이용 효율 극대화를 위한 동적 스펙트럼 접근 기술 중의 하나인 인지 라디오 (Cognitive Radio; CR) 기술을 결합한 RF 충전 CR 네트워크에 대한 연구가 최근 들어 다양한 방식으로 진행되고 있다^[1-4]. RF 충전 CR 네트워크에서 2차 송신단말 (Secondary Transmitter; ST)은 주사용자 또는 1차 사용자 (Primary User; PU)가 사용하고 있는 채널에 접근하면 RF 신호를 에너지로 변환하여 저장하고, 채널이 비어 있는 동안에 수집한 에너지를 사용하여 데이터를 전송할 수 있게 된다. 따라서 추가적인 에너지 공급원을 고려하지 않는 경우에 2차 시스템의 전송 성능은 ST가 수집 모드를 통해 충분한 에너지를 축적하는 동시에 비어 있는 1차 채널에 접근할 수 있는 기회의 영향을 크게 받는다.

RF 충전 CR 네트워크에서 ST의 전송 성능을 개선하기 위해 주변 후방산란 통신 (Ambient Backscatter Communications; AmBC) 기술의 적용방안이 제안되었다^[5]. AmBC 기술은 안테나의 임피던스를 제어하여 주변 RF 신호를 반사하면서 정보를 전송하는 장거리 통신 기술로서 별도의 전력소모가 거의 발생하지 않기 때문에 에너지 수집과 결합하여 효율적인 무선전력 통신 네트워크를 구성할 수 있다^[6]. 또한 후방산란 모드로 동작하는 단말이 1차 수신단말로부터 7.2 인치 이상 떨어져 있으면 1차 시스템에 간섭을 주지 않는다는 연구결과가 보고된 바 있으며^[7], 본 논문에서는 RF 충전 CR 네트워크에서 ST의 데이터 전송 성능을 향상시키기 위해 AmBC의 활용방안을 고려한다.

RF 충전 후방산란 CR 네트워크에서 1차 채널에

접근하여 채널 상태에 적합한 동작 모드를 선택하여 수행하기 위해 ST는 주기적으로 1차 채널을 센싱해야 한다. 따라서 본 논문에서는 타임 슬롯 기반 RF 충전 후방산란 CR 네트워크를 고려하며, ST는 슬롯의 시작점에서 1차 채널 상태에 대한 정보를 획득하기 위해 일정 시간 동안 센싱을 수행한 후 센싱 결과를 바탕으로 선택한 동작 모드를 나머지 슬롯 구간에서 수행하게 된다. ST는 점유된 1차 채널에 접근한 경우에 RF 신호를 흡수하여 전기로 변환한 후 배터리에 저장하였다가 비어 있는 1차 채널을 통해 데이터를 전송하면서 사용하거나, 후방산란 모드로 동작하여 정보를 전송하게 된다. 에너지 수집과 달리 후방산란은 안테나의 임피던스를 제어하여 수신한 에너지의 일정 양을 반사시키는 방식으로 데이터 비트를 전송하며, 에너지를 효율적으로 수집하기 위해 ST는 수집과 후방산란 모드를 동시에 수행할 수 없다. 따라서 [8]에서와 같이 타임 슬롯을 에너지 수집과 후방산란 구간으로 분할하여 순차적으로 수행하는 방안과 본 논문에서 고려하는 확률 기반으로 모드를 선택하여 전체 슬롯 동안 수행하는 방안을 적용할 수 있으며, 본 논문에서는 이 기법들을 각각 시간 분할 기법과 모드 선택 기법으로 간략하게 명명한다. 시간 분할 기법은 타임 슬롯을 에너지 수집과 주변 후방산란 구간으로 분할하여 순차적으로 각 모드를 수행하기 때문에, 한 개의 슬롯 동안 ST가 수집 가능한 에너지와 후방산란을 통해 전송 가능한 데이터 비트의 수가 분할 상수의 영향을 받게 된다. 반면에 모드 선택 기법은 ST가 미리 설정한 확률 값에 의해 동작 모드를 선택하여 전체 슬롯 동안 수행하기 때문에, 한 개의 슬롯 동안 수집하는 에너지와 후방산란하는 데이터 비트의 수가 일정하다고 가정할 수 있다. 본 논문에서는 1차 신호가 검출되었을 때 제어가 에너지 수집 모드를 선택할 확률을

α 로 정의하였으며, 따라서 ST는 α 의 값이 클수록 에너지를 자주 수집하고 α 가 작은 값을 가지면 후방산란 모드를 빈번하게 수행하여 더 많은 데이터 비트를 전송할 수 있게 된다.

앞서 언급한 바와 같이 RF 충전 후방산란 CR 네트워크에서 ST는 비어 있는 채널에 접근하여 기존의 무선 전송 방식을 통해 정보를 전송하고, 1차 신호가 검출되면 안테나에서 수신한 에너지를 후방산란하여 데이터 비트를 전송하게 된다. 전자 회로에서 소모하는 에너지가 많은 기존의 무선 전송 방식과 달리, 후방산란 모드로 동작하는 ST는 안테나의 임피던스를 제어하여 에너지를 반사시키기 때문에 후방산란 회로가 소모하는 에너지를 무시할 수 있다. 즉, ST가 비어 있는 채널에 접근하여 데이터를 전송하기 위해서는 일정 레벨 이상의 에너지를 보유해야 하는 반면에 거의 모든 에너지 상태에서 후방산란 모드를 수행할 수 있다고 가정할 수 있다. 따라서 ST의 전송 성능과 후방산란 성능을 도출하기 위해 각 동작 모드를 지원 가능한 에너지 상태가 발생할 확률이 필요하게 된다. 본 논문에서는 ST가 보유한 에너지의 상태와는 상관없이 항상 동일한 확률 α 를 사용하여 모드를 선택하는 방안 (레벨독립 방안)을 고려하여 레벨독립 유사출생사멸 (Quasi-Birth-and-Death; QBD) 과정에 기반하여 에너지의 상태 변화를 제공할 수 있는 모델을 구축하였으며, 본 논문에서는 에너지 추적 모델이라고 간략하게 명명한다.

레벨독립 방안은 α 가 큰 값을 가질수록 ST가 수집 모드를 자주 수행하기 때문에 후방산란을 통한 성능 개선이 제한적일 것으로 예상된다. 특히 1차 신호가 자주 검출되는 경우에 ST는 많은 양의 에너지를 수집 가능하여 항상 충분한 에너지를 보유할 수 있지만, 반면에 1차 채널이 자주 점유되면 ST가 데이터를 전송할 수 있는 기회가 감소하여 2차 시스템의 성능은 다시 저하될 것으로 예상된다. 본 논문에서는 2차 시스템의 성능을 한층 더 향상시키기 위해 ST가 보유한 에너지를 고려하여 확률 α 를 유연하게 제어하는 레벨중속 방안을 제안하였다. 따라서 레벨중속 QBD 기반 에너지 추적 모델을 구축하였으며, Monte-Carlo 모의 실험을 진행하여 레벨독립 방안을 통해 달성 가능한 2차 시스템 성능과의 비교 및 분석을 진행하였다.

II. RF 충전 후방산란 CR 네트워크

본 논문에서는 1차 시스템과 2차 시스템이 각각 한 쌍의 송수신단으로 구성된 RF 충전 후방산란 CR 네

트워크를 고려한다. 1차 시스템에서 PU는 주파수 대역에 대한 접근 권한을 갖고 있는 사용자이며, 따라서 채널의 상태는 PU의 전송 패턴에 따라 변화한다. 2차 시스템에서 ST는 PU가 사용하고 있는 채널에 접근한 경우에 주변의 1차 신호를 흡수하여 에너지를 수집하거나 1차 신호를 반사하여 SR한테 정보를 전송한다. 또한 1차 채널이 비어 있는 동안에 ST는 수집한 에너지를 사용하여 데이터를 전송한다. 따라서 ST는 기존의 무선 송수신기 외에 동작 모드 (데이터 전송, 에너지 수집, 주변 후방산란)를 제어하는 제어기, 에너지 수집기, 후방산란기 및 수집한 에너지를 저장하는 배터리로 구성된다.

2.1 1차 채널 모델

ST는 1차 채널에 접근하여 채널 상태에 적합한 동작 모드를 선택하여 수행하기 위해 주기적으로 1차 채널을 센싱해야 한다. 따라서 본 논문에서는 슬롯 구간이 $T \in \mathbb{R}^+$ 인 RF 충전 후방산란 CR 네트워크를 고려하였으며, \mathbb{R}^+ 는 양의 실수 집합을 의미한다. 각 슬롯에서 1차 채널은 PU의 데이터 전송 패턴에 따라 PU에 의해 사용되거나 (Busy; $C=1$) 비어 있게 되며 (Idle; $C=0$), 본 논문에서는 서로 상관된 2개의 채널 상태인 Busy와 Idle로 1차 채널을 모델링하였다. 즉, 1차 채널이 현재 Busy인 상태에서 다음 슬롯에서도 PU에 의해 사용될 확률을 p_b 라고 하면, $(1-p_b)$ 의 확률로 Idle 상태가 된다. 마찬가지로 1차 채널이 Idle 상태일 경우에는 다음 슬롯에서 확률 p_i 로 현재의 상태를 유지하고 $(1-p_i)$ 의 확률로 PU에 의해 사용된다. 따라서 1차 채널이 PU에 의해 사용되거나 비어 있을 정상확률 (Stationary Probability) π_b 와 π_i 는 각각 다음과 같게 된다.

$$\pi_b = \frac{1-p_i}{2-p_i-p_b}, \quad (1)$$

$$\pi_i = \frac{1-p_b}{2-p_i-p_b}. \quad (2)$$

2.2 에너지 검출 기반 채널 센싱

ST는 현재 1차 채널 상태에 대한 정보를 획득하기 위해 각 슬롯의 시작점에서 $\tau_s \in (0, T]$ 동안 샘플링 주파수 f_s 로 수신 신호의 샘플을 취하여 에너지를 검출한 후 이진 가설 검증을 통해 채널 상태를 결정하게 된다. 센싱 결과를 θ 라고 하면, 검출된 에너지가 임계

값 ϵ 보다 작으면 ST는 채널이 비어 있다고 판단하고 ($\theta = 0$), 그렇지 아니한 경우에 채널이 PU에 의해 점유되었다고 판단한다 ($\theta = 1$). 2차 시스템의 효율적인 동작을 위해 1차 신호가 잘못 선언될 오경보 확률 (False Alarm Probability)은 작아야 하고 1차 신호를 정확히 검출할 확률 (Detection Probability)은 큰 값을 가져야 한다. 본 논문에서는 1차 신호와 잡음을 평균이 모두 0이고 분산이 각각 σ_s^2 , σ_w^2 인 순환 대칭 복소 가우시안 (Circularly Symmetric Complex Gaussian) 신호로 가정하였다. 에너지 검출 과정에서 충분히 많은 샘플을 취한 경우에 검출 임계값 ϵ 에 따른 오경보 확률 P_f 와 검출 확률 P_d 은 각각 다음과 같게 된다⁹⁾.

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

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

여기서 $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty e^{-z^2/2} dz$ 이며, γ_p 는 ST에서 측정된 1차 신호의 신호대잡음비 (Signal-to-Noise Ratio; SNR)를 나타낸다.

2.3 동작 모드

채널 센싱이 종료되면 제어기는 센싱 결과에 근거하여 채널 상태에 적합한 동작 모드를 결정하게 되며, 선택된 동작 모드는 타임 슬롯의 나머지 구간 ($T - \tau_s$) 동안 수행된다.

2.3.1 에너지 수집

센싱 결과가 $\theta = 1$ 이면 ST는 주변에 1차 신호가 존재한다고 판단하여 에너지를 수집하거나 후방산란을 통해 2차 수신단말 (Secondary Receiver; SR)한테 정보를 전달하게 된다. 후방산란 모드로 동작하는 ST는 안테나에서 일정 양의 에너지가 반사되도록 임피던스를 제어하여 데이터 비트를 전송한다¹⁰⁾. 반면에 에너지를 수집하기 위해 ST는 안테나에서 수신한 신호를 흡수해야 하며, 효율적으로 에너지를 충전하기 위해 ST는 에너지 수집과 주변 후방산란을 동시에 수행할 수 없다. 본 논문에서는 채널이 1차 사용자에 의해 사용되고 있다고 판단한 경우에 ST가 다음과 같이 정의되는 확률로 동작 모드를 선택하는 방안을 고려한다.

$$\alpha \triangleq \Pr(a_n | \theta = 1), \quad (5)$$

여기서 a_n 는 제어기가 에너지 수집 모드를 선택하였음을 의미한다. 즉, 검출된 에너지가 임계값 ϵ 보다 크면 ST는 확률 α 로 에너지를 수집하고 $(1 - \alpha)$ 의 확률로 후방산란을 수행한다.

2.3.2 주변 후방산란

후방산란 회로는 다이폴 (Dipole) 안테나의 Branch 사이에 트랜지스터로 구성된 스위치를 연결하여 구현할 수 있다. 스위치의 입력은 '1'과 '0'으로 구성된 시퀀스이며 안테나의 임피던스를 제어하여 에너지를 반사하거나 흡수하면서 후방산란을 수행한다. 스위치에 '0'이 입력되면 트랜지스터가 꺼지면서 수신 신호를 흡수하기 때문에 안테나에서 소량의 에너지가 반사되는 반면, '1'이 입력되면 트랜지스터가 켜지면서 다이폴 안테나의 Branch 사이에서 Short 현상이 발생하여 많은 양의 에너지가 안테나로부터 반사된다. 후방산란 회로를 구현하기 위해 Reflective 스위치의 하나인 ADG902 RF 스위치를 사용할 수 있으며, ADG902 RF 스위치의 소모전력은 약 $0.275 \mu W$ 이다¹⁰⁾. 따라서 본 논문에서는 후방산란 회로가 소모하는 에너지를 고려하지 않으며, ST는 거의 모든 에너지 상태에서 주변 후방산란을 수행할 수 있다고 가정하였다. 채널 센싱 과정에서 오경보가 발생하면 주변에 RF 신호가 존재하지 않기 때문에 ST는 후방산란 이득을 얻을 수 없으며, 후방산란 모드로 동작하는 ST가 도출할 수 있는 정규화된 후방산란 성능을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$R_b = (1 - \pi_{0,1})(1 - \alpha)P_d\pi_b, \quad (6)$$

여기서 $\pi_{0,1}$ 은 에너지 고갈 상태 (Energy Outage)가 발생할 정상확률을 의미한다. 에너지 고갈 상태는 배터리의 잔여 에너지가 일정 수준 이상을 유지하도록 하여 회로의 지속적인 안정적인 동작을 보장하기 위해 정의한 에너지 상태이며, ST는 에너지 고갈 상태에서 수집 모드뿐만 아니라 동작하도록 고려하였다.

2.3.3 데이터 전송

에너지 검출 과정에서 오경보가 발생하지 않거나 1차 신호가 미검출되는 경우에 센싱 결과가 $\theta = 0$ 이 되며, ST는 1차 채널이 비어 있다고 판단하여 해당 채널에 접근하여 데이터를 전송하게 된다. 추가적인 에너지 공급원이 없는 경우에 ST는 수집 모드를 통해

충분한 에너지를 저장해야만 데이터를 전송할 수 있다. 본 논문에서 ST와 달리 SR은 고효율의 에너지 사용이 가능하다고 가정하였으며, ST가 일정 크기의 송신전력으로 데이터를 전송하는 동시에 1차 시스템과의 충돌이 발생하지 않으면 SR은 페이딩된 신호를 높은 확률로 복호할 수 있게 된다. 따라서 본 논문에서는 ST가 전송에 필요한 에너지를 축적한 동시에 실제로 비어 있는 1차 채널에 접근할 수 있는 기회를 확보함으로써 도출 가능한 정규화된 전송 성능을 주로 고려하며, 이와 같은 전송 성능은 다음과 같게 된다.

$$R_t = (1 - \pi_0 \mathbf{e})(1 - P_f)\pi_i, \quad (7)$$

여기서 데이터 전송이 제한되는 모든 에너지 상태들의 집단을 에너지 부족 (Energy Deficiency) 상태라고 하였을 때 π_0 은 에너지 부족 상태의 정상확률벡터를 의미한다. 또한 앞서 정의한 에너지 고갈 상태는 에너지 부족 상태의 최하위 상태가 된다.

이와 같이 RF 충전 후방산란 CR 네트워크에서 ST는 기존의 무선 전송 방식을 사용하는 동시에 에너지 소모가 적은 후방산란을 활용하여 2차 시스템의 성능을 개선할 수 있다. (6)과 (7)에서와 같이 정의한 ST의 후방산란 성능과 전송 성능을 얻기 위해 에너지 고갈과 부족 상태가 발생할 정상확률들을 도출해야 한다. 따라서 본 논문에서는 ST의 동작 모드에 따라 상태 전이가 발생하는 에너지 축적 모델을 구축하고, 해당 모델로부터 에너지 상태의 정상확률을 도출하여 2차 시스템의 성능을 검증하고자 한다.

III. 제안하는 에너지 축적 모델

3.1 에너지 상태 전이확률

본 논문에서는 추가적인 에너지 공급원을 고려하지 않기 때문에 ST의 에너지 상태는 동작 모드에 따라 변화하게 되며 다음과 같이 정의되는 확률들에 따라 에너지 상태간의 전이가 발생한다.

후방산란과 마찬가지로 에너지 검출 과정에서 오경보가 발생하면 주변에 1차 신호가 존재하지 않기 때문에 ST는 에너지를 수집할 수 없게 된다. 따라서 ST가 실제로 에너지를 수집하여 상위 에너지 상태로 전이가 발생할 확률을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$P_a = \Pr(a_h, \theta = 1, C = 1) = \alpha P_d \pi_b. \quad (8)$$

본 논문에서는 1차 채널의 에너지를 검출하는 과정에서 아주 짧은 센싱 구간 (즉, $\tau_s \ll T$)을 가정하여 센싱 회로에서 소모하는 에너지를 고려하지 않는다. 또한 앞서 설명한 바와 같이 후방산란 회로에서 소모하는 전력도 고려하지 않기 때문에 ST는 주로 데이터를 전송하면서 에너지를 소모하게 된다. 따라서 에너지 상태가 하위 상태로 전이할 확률을 다음과 같이 정의할 수 있다.

$$P_c \triangleq \Pr(\theta = 0) = (1 - P_f)\pi_i + (1 - P_d)\pi_b. \quad (9)$$

최종적으로 에너지 상태가 변하지 않을 확률은 다음과 같게 된다.

$$P_u = \frac{P_f \pi_i}{FA} + \frac{(1 - \alpha) P_d \pi_b}{Backscattering}. \quad (10)$$

즉, ST가 1차 채널을 센싱하는 과정에서 오경보가 발생하였거나 회로에서 소모하는 에너지를 무시 가능한 후방산란 모드로 동작하는 경우에 ST의 에너지 상태에는 변화가 없게 된다.

3.2 QBD 기반 에너지 축적 모델

ST는 SR에서의 SNR을 보장하기 위해 일정 크기의 송신전력을 사용할 수 있는 반면, 에너지 수집은 에너지 전송 채널 상태, RF-에너지 변환 효율, 에너지 수집 시간 등의 영향을 심각하게 받는다. 따라서 본 논문에서는 동일 시간 ($T - \tau_s$) 동안에 수집한 에너지 E_h 와 데이터를 전송하면서 소모하는 에너지 E_c 가 $E_c = mE_h$ 의 관계식을 갖는다고 가정하였으며, 여기서 m 은 양의 정수를 의미한다. 즉, 에너지는 수집 모드를 통해 서서히 축적되고 ST가 데이터를 전송하면서 상대적으로 빨리 소모됨을 나타낸다. 따라서 에너지 상태 공간 $\{(n, j), n = 0, \dots, L, j = 1, \dots, m\}$ 을 갖는 QBD 과정을 활용하여 ST의 에너지 축적 모델을 구축하였으며, 여기서 n 과 j 는 각각 에너지 레벨과 레벨 내의 에너지 상태를 나타낸다. 또한 배터리가 완전히 충전되면 ST는 연속하여 L 번 데이터를 전송할 수 있다고 고려하였다.

레벨 $l(0)$ 을 에너지 부족 상태라고 하면, 이 때 ST는 에너지 수집과 후방산란 모드만을 수행할 수 있다. 임의의 상태 $(0, i)$ ($i = 1, \dots, m$)에서 에너지를 수집하면 상위 에너지 상태인 $(0, j)$ ($j > i$)로 전이할 수 있으며, 그렇지 않으면 상태 $(0, i)$ 에 계속하여 머무르게 된다. 따라서 에너지 레벨 $l(0)$ 에서 상태간 전이가

발생할 확률들로 구성되는 $m \times m$ 행렬 \mathbf{B} 의 원소들은 (11)과 같게 된다. 이 밖에 에너지가 고갈된 상태 (0, 1)에서는 ST가 에너지 수집 모드만 수행할 수 있다고 가정하였기 때문에 $(\mathbf{B})_{11} = 1 - P_d \pi_b$, $(\mathbf{B})_{12} = P_d \pi_b$ 가 된다. 또한 ST가 $(T - \tau_s)$ 동안 축적 가능한 에너지를 E_h 로 일정하다고 가정하였기 때문에 에너지 수집을 통해 인접한 상위 상태로만 전이가 발생하게 된다.

레벨 $l(0)$ 의 최상위 에너지 상태인 $(0, m)$ 에서 에너지를 수집하면 현재 레벨을 이탈하여 상위 에너지 레벨인 $l(1)$ 에 도달하게 되며, 에너지가 완전히 충전된 레벨 $l(L)$ 을 제외한 모든 에너지 레벨 $l(n)$ ($n = 1, \dots, L-1$)에서 동일한 전이가 발생한다. 따라서 에너지 레벨 $l(n)$ ($n = 0, \dots, L-1$)에서 상위 레벨로의 전이확률들로 구성되는 $m \times m$ 행렬 \mathbf{A}_0 은 다음과 같게 된다.

$$(\mathbf{A}_0)_{ij} = \Pr(s_{n+1,j} | s_{n,i}) = \begin{cases} P_a, & i = m, j = 1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

에너지 레벨 $l(n)$ ($n = 1, \dots, L-1$)에서 행렬 \mathbf{B} 와 동일한 의미를 갖는 $m \times m$ 행렬 \mathbf{A}_1 은 (13)과 같게 된다.

에너지 부족 상태를 제외한 모든 에너지 레벨 $l(n)$ ($n = 1, \dots, L$)에서 데이터 전송이 가능하다. $(T - \tau_s)$ 동안에 ST가 데이터를 전송하면서 소모하는 에너지가 E_c 로 일정하다고 가정하였기 때문에 $m \times m$ 행렬 \mathbf{A}_2 는 (14)와 같이 하위 레벨로 전이할 확률들로 구성된다. 즉, $\mathbf{A}_2 = \text{diag}(P_c, \dots, P_c)$ 이다. 유한 용량의 배터리를 고려하였기 때문에 에너지 레벨 $l(L)$ 은 상태 $(L, 1)$ 로만 구성되며, $\tilde{\mathbf{A}}_2 = \text{diag}(P_c, 0, \dots, 0)$, $\tilde{\mathbf{A}}_1 = \text{diag}(1 - P_c, 0, \dots, 0)$ 이다.

따라서 에너지 축적 모델의 전이행렬 (Transition Matrix)은 다음과 같게 된다.

$$\mathbf{P} = \begin{bmatrix} \mathbf{B} & \mathbf{A}_0 & \mathbf{0} & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{A}_2 & \mathbf{A}_1 & \mathbf{A}_0 & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \mathbf{0} & \mathbf{A}_2 & \mathbf{A}_1 & \cdots & \mathbf{0} & \mathbf{0} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \tilde{\mathbf{A}}_1 & \tilde{\mathbf{A}}_0 \\ \mathbf{0} & \mathbf{0} & \mathbf{0} & \cdots & \tilde{\mathbf{A}}_2 & \tilde{\mathbf{A}}_1 \end{bmatrix}, \quad (15)$$

여기서 $\mathbf{0}$ 은 $m \times m$ 영행렬을 의미한다. 이와 같이 레벨 $l(0)$ 과 $l(L)$ 을 제외한 모든 에너지 레벨에서 동일한 전이패턴 $\{\mathbf{A}_2, \mathbf{A}_1, \mathbf{A}_0\}$ 을 반복하기 때문에 에너지 축적 모델은 레벨독립 QBD 과정을 따르게 된다.

IV. 제안하는 에너지 레벨종속 방안

RF 충전 후방산란 CR 네트워크에서 2차 시스템의 성능을 한층 더 개선하고자 다음과 같이 에너지 레벨에 종속적으로 확률 $\alpha^{(n)}$ 을 결정하여 모드를 선택하는 방안을 제안한다.

$$\alpha^{(n)} = \Pr(a_n | \theta = 1, l(n)). \quad (16)$$

즉, 에너지가 많이 축적되면 ST가 후방산란을 자주 수행할 수 있도록 $\alpha^{(n)}$ 이 작은 값을 갖게 하여 보다 많은 데이터 비트를 전송할 수 있게 한다 ($\alpha^{(n+1)} < \alpha^{(n)}$). 따라서 레벨종속 모드 선택 방안을 적용하면 ST의 후방산란 성능은 다음과 같게 된다.

$$R_b^{ld} = \left[\sum_{n=0}^L \pi_n \mathbf{e} (1 - \alpha^{(n)}) - \pi_{0,1} (1 - \alpha^{(0)}) \right] P_d \pi_b. \quad (17)$$

$$(\mathbf{B})_{ij} = \Pr(s_{0,j} | s_{0,i}) = \begin{cases} 1 - P_a, & i = 2, \dots, m, j = i \\ P_a, & i = 2, \dots, (m-1), j = i+1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (11)$$

$$(\mathbf{A}_1)_{ij} = \Pr(s_{n,j} | s_{n,i}) = \begin{cases} P_u, & i = 1, \dots, m, j = i \\ P_a, & i = 1, \dots, (m-1), j = i+1 \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (13)$$

$$(\mathbf{A}_2)_{ij} = \Pr(s_{n-1,j} | s_{n,i}) = \begin{cases} P_c, & i = 1, \dots, m, j = i \\ 0, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (14)$$

에너지 레벨에 따라 수집 모드를 선택할 확률 $\alpha^{(n)}$ 이 결정되면 에너지가 축적될 확률은 $P_a^{(n)} = \alpha^{(n)} P_d \pi_b$, 에너지 상태에 변화가 없을 확률은 $P_u^{(n)} = (1 - \alpha^{(n)}) P_d \pi_b + P_f \pi_i$ 가 된다. 따라서 에너지 축적 모델은 레벨중속 QBD 과정을 따르게 되며, 레벨중속 QBD의 전이행렬은 다음과 같이 주어진다.

$$P^{ld} = \begin{bmatrix} \mathbf{A}_1^{(0)} & \mathbf{A}_0^{(0)} & 0 & \cdots & 0 & 0 \\ \mathbf{A}_2^{(1)} & \mathbf{A}_1^{(1)} & \mathbf{A}_0^{(1)} & \cdots & 0 & 0 \\ 0 & \mathbf{A}_2^{(2)} & \mathbf{A}_1^{(2)} & \cdots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \mathbf{A}_1^{(L-1)} & \mathbf{A}_0^{(L-1)} \\ 0 & 0 & 0 & \cdots & \mathbf{A}_2^{(L)} & \mathbf{A}_1^{(L)} \end{bmatrix}. \quad (18)$$

여기서 $\mathbf{A}_2^{(n)}$, $\mathbf{A}_1^{(n)}$, $\mathbf{A}_0^{(n)}$ 은 모두 $m \times m$ 행렬이다. 레벨독립 QBD 과정과 마찬가지로 $\mathbf{A}_2^{(n)}$, $\mathbf{A}_1^{(n)}$, $\mathbf{A}_0^{(n)}$ 은 각각 하위 레벨로 전이할 확률, 레벨 내의 상태간 전이가 발생할 확률, 상위 레벨로의 전이확률들로 구성되며, 행렬 $\mathbf{A}_0^{(n)}$ 과 $\mathbf{A}_1^{(n)}$ 은 각각 (19)와 (20)과 같게 된다.

$$(\mathbf{A}_0^{(n)})_{ij} = \begin{cases} P_a^{(n)}, & 0 \leq n < L, i = m, j = 1 \\ 0, & otherwise \end{cases}, \quad (19)$$

이 때 에너지 레벨 $l(0)$ 은 레벨독립 QBD에서와 마찬가지로 $(\mathbf{A}_1^{(0)})_{11} = 1 - P_d \pi_b$ 이고 $(\mathbf{A}_1^{(0)})_{12} = P_d \pi_b$ 가 된다. 또한 에너지가 완전히 충전된 레벨 $l(L)$ 에 대해 $\mathbf{A}_1^{(L)} = \tilde{\mathbf{A}}_1$, $\mathbf{A}_2^{(L)} = \tilde{\mathbf{A}}_2$ 이며, 에너지 레벨 $l(n)$ ($n = 1, \dots, L-1$)에서 $\mathbf{A}_2^{(n)} \equiv \mathbf{A}_2$ 이다.

V. 에너지 상태 정상확률

제한하는 QBD 기반 에너지 축적 모델은 더 이상 단순화할 수 없고 비주기적이며 양재귀 (Positive Recurrent) 하기 때문에 정상확률벡터가 다음의 관계식을 만족한다.

$$(\mathbf{A}_1^{(n)})_{ij} = \begin{cases} 1 - P_a^{(n)}, & n = 0, i = 2, \dots, m, j = i \\ P_u^{(n)}, & 0 < n < L, i = 1, \dots, m, j = i \\ P_a^{(n)}, & 0 \leq n < L, i = 1, \dots, (m-1), j = i + 1 \\ 0, & otherwise \end{cases}. \quad (20)$$

$$\boldsymbol{\pi}_n = \boldsymbol{\pi}_{n-1} \mathbf{R}^{(n)} \quad (n \geq 1). \quad (21)$$

여기서 $\boldsymbol{\pi}_n = [\pi_{n,1}, \dots, \pi_{n,m}]$ 은 에너지 레벨 $l(n)$ 의 정상확률벡터를 나타낸다. 또한 $\mathbf{R}^{(n)}$ 은 $m \times m$ 행렬이며, $\mathbf{R}^{(n)}$ 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 평균횟수를 의미한다.

(21)로부터 정상확률벡터 $\boldsymbol{\pi}_n$ 을 구하기 위해 $\mathbf{R}^{(n)}$ 을 먼저 계산해야 하며, 행렬 $\mathbf{R}^{(n)}$ 은 직접 계산할 수 없다. 따라서 QBD 과정의 특징을 가장 잘 표현하면서 다음의 관계식을 갖는 $m \times m$ 행렬 $\mathbf{U}^{(n)}$ 과 $\mathbf{G}^{(n)}$ 을 사용한다^[11].

$$\mathbf{G}^{(n)} = (\mathbf{I} - \mathbf{U}^{(n)})^{-1} \mathbf{A}_2^{(n)}, \quad (22)$$

$$\mathbf{U}^{(n)} = \mathbf{A}_1^{(n)} + \mathbf{A}_0^{(n)} \mathbf{G}^{(n+1)}, \quad (23)$$

$$\mathbf{R}^{(n)} = \mathbf{A}_0^{(n-1)} (\mathbf{I} - \mathbf{U}^{(n)})^{-1}, \quad (24)$$

$$\mathbf{U}^{(n)} = \mathbf{A}_1^{(n)} + \mathbf{R}^{(n+1)} \mathbf{A}_2^{(n+1)}, \quad (25)$$

여기서 행렬 $\mathbf{U}^{(n)}$ 의 (i, j) 원소는 에너지 상태 (n, i) ($0 < n \leq L, i = 1, \dots, m$)에서 출발하여 레벨 $l(0), l(1), \dots, l(n-1)$ 을 거치지 않고 상태 (n, j) 를 통해 에너지 레벨 $l(n)$ 으로 돌아올 타부확률 (Taboo Probability)을 의미한다. 또한 행렬 $\mathbf{G}^{(n)}$ 의 (i, j) 원소는 에너지 상태 (n, i) ($0 < n \leq L, i = 1, \dots, m$)에서 출발하여 언젠가는 에너지 레벨 $l(n-1)$ 에 도달 하되 에너지 상태 $(n-1, j)$ 를 통해 전이할 확률을 나타낸다.

에너지 레벨의 정상확률을 계산하기 위해 에너지 축적 모델을 $\{l(0)\}$ 과 $D = \{l(1), \dots, l(L)\}$ 로 나눈다. 제한하는 QBD 기반 에너지 모델이 양재귀하기 때문에 국소 모델 $\{l(0)\}$ 에 대해서도 다음의 관계식이 성립된다.

$$\boldsymbol{\pi}_0 = \boldsymbol{\pi}_0 \mathbf{P}_0, \quad (26)$$

표 1. 행렬 \mathbf{U} 와 \mathbf{G} 의 계산
Table 1. Computation of matrices \mathbf{U} and \mathbf{G}

1: Initialization $t = 1, \mathbf{G}_0 = \mathbf{0}$
2: if $\ \mathbf{e} - \mathbf{G}_t \mathbf{e}\ > \kappa$ then
3: $\mathbf{U}_t = \mathbf{A}_1 + \mathbf{A}_0 \mathbf{G}_{t-1}$
4: $\mathbf{G}_t = (\mathbf{I} - \mathbf{U}_t)^{-1} \mathbf{A}_2$
5: $t = t + 1$
6: end if
7: $\mathbf{R} = \mathbf{A}_0 (\mathbf{I} - \mathbf{U})^{-1}$

여기서 $\pi_0 = [\pi_{0,1}, \dots, \pi_{0,m}]$ 은 레벨 $l(0)$ 의 정상확률벡터이며, \mathbf{P}_0 은 국소 모델 $\{l(0)\}$ 의 전이행렬을 의미한다. 에너지 레벨 $l(0)$ 에서 출발하면 레벨 내의 상태간 전이가 발생하거나 (a), $l(0)$ 을 이탈하여 상태집단 D 에 도달한 후 (b_1) 계속하여 D 에 머물다가 (b_2) 언젠가는 $l(0)$ 으로 다시 돌아오게 된다 (b_3). 레벨 $l(0)$ 과 상태집단 D 는 $l(1)$ 을 통해서만 상호 도달 가능하기 때문에 $b_1 = \mathbf{A}_0^{(0)}$, $b_3 = \mathbf{A}_2^{(1)}$ 이다. 또한 b_2 는 $l(1)$ 에서 출발하여 $l(0)$ 에 도달하기 전까지 $l(1)$ 을 방문하는 평균횟수와 같다. 행렬 $\mathbf{U}^{(1)}$ 은 $l(1)$ 에서 출발하여 $l(0)$ 에 도달하기 전까지 $l(1)$ 을 방문할 타부 확률이며, k 번 전이하여 $l(1)$ 로 돌아온다고 가정하면 b_2 는 다음과 같게 된다.

$$b_2 = \sum_{k=1}^{\infty} (\mathbf{U}^{(1)})^k = (\mathbf{I} - \mathbf{U}^{(1)})^{-1}. \quad (27)$$

따라서 전이행렬 \mathbf{P}_0 은 다음과 같게 된다.

$$\mathbf{P}_0 = \mathbf{A}_1^{(0)} + \mathbf{A}_0^{(0)} (\mathbf{I} - \mathbf{U}^{(1)})^{-1} \mathbf{A}_2^{(1)}. \quad (28)$$

5.1 레벨독립 QBD

레벨독립 QBD 과정은 동일한 전이패턴 $\{\mathbf{A}_2, \mathbf{A}_1, \mathbf{A}_0\}$ 을 반복하기 때문에, $\mathbf{U}^{(n)} \equiv \mathbf{U}$, $\mathbf{G}^{(n)} \equiv \mathbf{G}$, $\mathbf{R}^{(n)} \equiv \mathbf{R}$ 이 된다. 따라서 (21)은 다음과 같게 된다.

$$\pi_n = \pi_0 \mathbf{R}^n \quad (n \geq 0). \quad (29)$$

모든 정상확률의 합은 1이다 ($\pi \mathbf{e} = 1$). 즉, (29)로부터 정규화 조건 $\pi_0 \sum_{n=0}^{\infty} \mathbf{R}^n \mathbf{e} = 1$ 을 얻을 수 있으며,

(26), (28)을 함께 사용하여 에너지 상태의 정상확률 벡터를 계산할 수 있다. 레벨독립 QBD 과정의 행렬 \mathbf{R} 을 구하기 위해 본 논문에서는 표 1에서 주어지는 알고리즘을 사용한다. 먼저 행렬 \mathbf{U} 와 \mathbf{G} 를 반복하여 계산하며, t 가 커짐에 따라 행렬 \mathbf{U} 와 \mathbf{G} 가 단조증가하여 미리 설정한 κ 를 만족하면 알고리즘을 종료한 후 행렬 \mathbf{R} 을 구할 수 있게 된다.

5.2 레벨종속 QBD

본 논문에서 유한 용량의 배터리를 고려하였기 때문에 레벨 L 은 상위 에너지 레벨이 존재하지 않는다. 따라서 (23) 또는 (25)로부터 에너지 레벨 $l(L)$ 에 대해 행렬 $\mathbf{U}^{(L)}$ 은 다음과 같게 되는 것을 알 수 있다.

$$\mathbf{U}^{(L)} = \mathbf{A}_1^{(L)}. \quad (30)$$

또한 (24)를 (25)에 대입하면 에너지 레벨 $l(n)$ ($n = 1, \dots, (L-1)$)에서의 행렬 $\mathbf{U}^{(n)}$ 을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\mathbf{U}^{(n)} = \mathbf{A}_1^{(n)} + \mathbf{A}_0^{(n)} (\mathbf{I} - \mathbf{U}^{(n+1)})^{-1} \mathbf{A}_2^{(n+1)}. \quad (31)$$

이와 같이 유한개의 레벨을 갖는 레벨종속 QBD 과정은 (30)과 같이 행렬 $\mathbf{U}^{(L)}$ 을 먼저 구한 후, 각 에너지 레벨에 해당되는 $\mathbf{U}^{(n)}$ 을 (31)과 같이 계산하여 행렬 $\mathbf{R}^{(n)}$ 을 얻을 수 있다. 레벨독립 QBD 과정과 동일한 방식으로 에너지 상태의 정상확률벡터를 구할 수 있으며, 레벨종속 QBD 과정의 정규화조건은 다음과 같다.

$$\pi_0 \left(\mathbf{I} + \sum_{n=1}^L \prod_{k=1}^n \mathbf{R}^{(k)} \right) \mathbf{e} = 1. \quad (32)$$

VI. 모의실험 결과

RF 충전 후방산란 CR 네트워크에서 ST는 1차 신호를 흡수하여 에너지를 충전하거나, 후방산란 모드를 선택한 경우에는 안테나에서 수신한 에너지를 반사하거나 흡수하여 데이터 비트 '1' 또는 '0'을 전송할 수 있다. 본 논문에서는 ST가 효율적으로 에너지를 수집하기 위해 점유된 채널에 접근하면 확률 기반으로 에너지 수집과 주변 후방산란 중에서 한 개의 모드를 선택하여 수행하는 방안을 고려하였다. 또한 초기에 선택한 확률을 계속하여 사용하는 레벨독립 방안

$(\alpha^{(n)} \equiv \alpha_0)$ 을 통해 2차 시스템이 달성 가능한 전체 전송 성능 ($R_t + R_b$)을 개선하기 위해 본 논문에서는 레벨중속 방안 ($\alpha^{(n)} = \alpha_0 e^{-n}$)을 제안하였다. 즉, ST가 보유한 에너지의 레벨이 높으면 수집 모드를 선택할 확률을 낮게 하여 후방산란을 통해 더 많은 데이터 비트를 전송할 수 있도록 하였으며, Monte-Carlo 모의실험을 통해 레벨독립 방안과의 성능 비교 및 분석을 진행하였다.

모의실험을 위한 주요 파라미터로는 슬롯 구간 $T = 100$ msec, 센싱 구간 $\tau_s = 2$ msec, 샘플링 주파수 $f_s = 1$ MHz를 사용하였다. 또한 1차 채널의 에너지를 검출하는 과정에서 목표 오경보 확률을 $\bar{P}_f = 0.01$ 로 설정하였으며, 잡음 분산 $\sigma_w^2 = 10$, ST에서 수신한 1차 신호의 SNR $\gamma_p = -10$ dB를 고려하여 ST가 1차 신호를 정확하게 검출할 확률 P_d 를 계산하였다. 에너지 축적 모델에 대해서는 배터리의 사이즈 $L = 5$, 각 에너지 레벨의 상태 개수 $m = 2$ 를 고려하였다.

앞서 언급한 바와 같이 에너지 수집과 주변 후방산란은 1차 신호가 존재하는 경우에만 수행 이득을 얻을 수 있다. 따라서 에너지 축적 모델로부터 도출한 2차 시스템의 전송 성능을 검증 및 비교하기 위해 1차 채널 모델의 전이확률 p_i 는 0.5로 고정시키고 전이확률 p_b 가 0.1부터 0.9까지의 값을 갖도록 고려하였다. 따라서 p_b 가 0.1에 접근하면 1차 채널은 자주 비어 있게 되고 0.9에 가까워질수록 1차 신호가 검출될 확률은 높아진다. 또한 주변 후방산란을 적용하여 개선되는 2차 시스템의 전송 성능을 검증하고 레벨중속 방안과 레벨독립 방안의 성능 비교를 위해 초기 수집 확률 α_0 ($0.1 \leq \alpha_0 \leq 1$)에 따라 변화하는 모의실험 결과를 도출하였다. 이 때 α_0 이 1이면 에너지 수집만을 고려하는 경우를 나타내며, α_0 이 0.1에 가까워질수록 ST는 에너지 수집보다 주변 후방산란을 자주 수행하게 된다.

그림 1부터 3은 각각 1차 채널의 전이확률 p_b 와 초기 에너지 수집 확률 α_0 의 값에 따른 에너지 고갈 상태의 정상확률, 에너지 부족 상태의 정상확률 및 ST의 달성 가능한 전체 전송 성능을 도시한다. 여기서 LD와 LID는 각각 레벨중속 방안과 레벨독립 방안을 의미한다. 1차 채널 전이확률 p_i 가 고정된 경우에 p_b 가 커질수록 ST가 1차 신호를 자주 검출할 수 있게 되어 보다 많은 에너지 수집과 주변 후방산란의

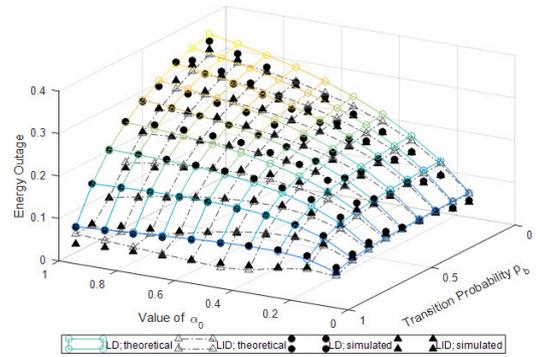


그림 1. 전이확률 p_b 와 에너지 수집 확률 α_0 에 따른 에너지 고갈 상태의 정상확률
Fig. 1. Probability of energy outage corresponding to the transition probability p_b and the value of α_0

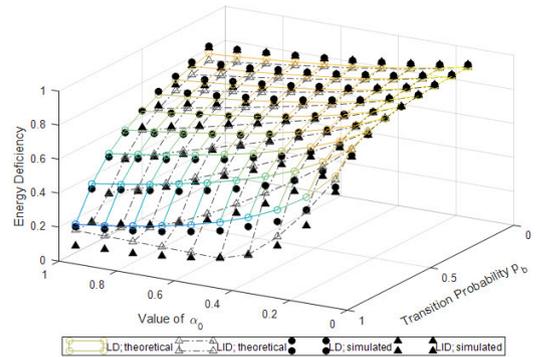


그림 2. 전이확률 p_b 와 초기 에너지 수집 확률 α_0 에 따른 ST의 에너지 부족 상태의 정상확률
Fig. 2. Probability of energy deficiency corresponding to the transition probability p_b and the value of α_0

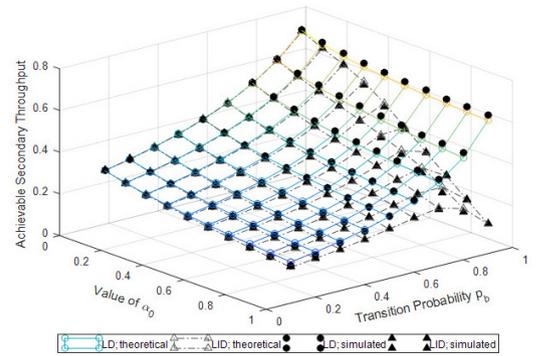


그림 3. 전이확률 p_b 와 초기 에너지 수집 확률 α_0 에 따른 ST의 전체 전송 성능
Fig. 3. Secondary throughput corresponding to the transition probability p_b and the value of α_0

기회가 주어진다. 따라서 그림 1과 2에서 도기한 것과 같이 에너지 고갈 상태와 에너지 부족 상태가 발생할 확률은 감소하고 그림 3에서와 같이 ST가 달성 가능한 성능이 개선되는 추세를 보인다. 이 때 에너지 수집 확률 α_0 이 증가하면 ST가 수집 모드를 통해 더 많은 에너지를 축적할 수 있게 되어 에너지 부족 상태를 이탈하여 데이터 전송이 가능한 에너지 상태로 쉽게 전이하며, 에너지 상태 (0, 2)에서 출발하여 (1, 1)에 도달하게 된다. 따라서 ST가 에너지 상태 (1, 1)에서 데이터를 전송하면서 다시 에너지 고갈 상태로 전이하며, 데이터를 전송 가능한 기회가 상대적으로 많은 경우에 에너지 고갈 상태가 발생할 확률이 다소 크게 증가하는 것을 그림 1로부터 확인할 수 있다. 또한 에너지 고갈 상태가 발생하면 ST는 수집 모드로만 동작 가능하기 때문에 고갈 상태를 이탈할 확률은 α_0 의 영향을 받지 않는다. 하지만 에너지 상태 (0, 2)에서 에너지를 수집하면서 상위 에너지 레벨로 전이하기 때문에, α_0 이 큰 값을 가지면 레벨 $l(0)$ 을 신속하게 이탈 가능하여 에너지 부족 상태가 발생할 정상확률은 그림 2에서와 같이 감소하게 된다. 레벨중속 방안은 ST가 보유한 에너지가 충분하면 초기에 선택한 확률 α_0 보다 작은 $\alpha^{(n)}$ 을 사용하여 동작 모드를 선택하기 때문에 에너지 고갈 상태와 부족 상태가 발생할 정상확률들은 모두 레벨독립 방안에 비해 크게 나타난다. 특히, 1차 신호가 자주 검출되고 초기에 선택한 수집 확률 α_0 이 큰 경우에 레벨중속 방안은 상대적으로 높은 고갈 상태와 부족 상태가 발생할 확률을 갖게 된다. 반면에 1차 신호가 자주 검출되는 경우에 (즉, ST가 비어 있는 1차 채널에 접근할 기회가 적으면) ST가 보유한 에너지의 레벨에 따라 주변 후방산란을 수행하는 빈도가 결정되기 때문에, 그림 3에서와 같이 포화된 ST의 성능이 개선될 수 있음을 확인하였다.

VII. 결 론

RF 충전 후방산란 CR 네트워크에서 ST는 PU가 사용하고 있는 채널에 접근하여 에너지를 수집하거나 주변 후방산란을 통해 데이터 비트를 전송하게 된다. 추가적인 에너지 공급원을 고려하지 않는 경우에 ST는 1차 채널이 비어 있으면 수집한 에너지를 사용하여 데이터를 전송한다. 본 논문에서는 RF 충전 후방산란 CR 네트워크에서 ST의 효율적인 에너지 수집을 위해 점유된 채널을 검출하였을 때 확률 기반으로 에너지 수집과 주변 후방산란 모드를 선택하여 수행하

는 방안을 고려하였다. ST의 동작 모드가 소모하는 에너지와 수집 가능한 에너지를 고려하여 QBD 기반 에너지 축적 모델을 구축하였으며, 해당 모델로부터 데이터 전송이 불가능한 에너지 부족 상태와 에너지 수집만 가능한 에너지 고갈 상태가 발생할 정상확률들을 계산하여 ST의 전송 성능과 후방산란 성능을 도출하였다. 또한 ST가 보유한 에너지의 레벨을 고려하여 수집 확률을 유연하게 제어하는 레벨중속 모드 선택 방안을 제안하였으며, 모의실험을 통해 1차 채널이 자주 사용되는 경우에 레벨중속 모드 선택 방안이 포화된 ST의 성능을 개선 가능하며 초기에 선택한 에너지 수집 확률이 클수록 성능의 개선폭이 크게 나타나는 것을 확인하였다.

References

- [1] 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.
- [2] 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.
- [3] 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.
- [4] 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.
- [5] 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, Sep. 2017.
- [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] 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.
- [8] S. Wu, D. I. Kim, J. Y. Kim, and Y. Shin, "QBD-based energy model for RF-powered backscatter cognitive radio networks," *J. KICS*, vol. 44, no. 1, pp. 180-189, Jan. 2019.
- [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] *ADG902 RF Switch Datasheet*, available online at https://www.analog.com/media/en/technical-documentation/data-sheets/ADG901_902.pdf.
- [11] G. Latouche and V. Ramaswami, *Introduction to Matrix Analytic Methods in Stochastic Modeling*, 5th Ed., Chs. 6 & 12, SIAM, 1999.

오 선 애 (Shanai Wu)

한국통신학회논문지 Vol. 41, No. 9 참조
[ORCID:0000-0001-6572-2838]

김 진 영 (Jin Young Kim)

한국통신학회논문지 Vol. 38C, No. 11 참조
[ORCID:0000-0002-1456-7097]

김 동 인 (Dong In Kim)

한국통신학회논문지 Vol. 41, No. 9 참조
[ORCID:0000-0001-7711-8072]

신 요 안 (Yoan Shin)

한국통신학회논문지 Vol. 41, No. 9 참조
[ORCID:0000-0002-4722-6387]