

모바일 기기의 에너지 소모를 줄이기 위한 인지 무선 통신에서 효율적인 스펙트럼 센싱 방법

Enhanced Energy-efficient Spectrum Sensing Scheme in Cognitive Radio Networks

신 영 환¹ 서 순 호¹ 정 중 문^{1*}
Younghwan Shin Sunho Seo Jong-Moon Chung

요 약

증강현실, 가상현실, 딥러닝 등 최신 어플리케이션들은 재난상황 대처, 게임 등 다양한 분야에서 효율적으로 쓰일 수 있다. 그에 따라 해당 어플리케이션들이 급속도로 개발되고 있다. 그러나 증강현실, 가상현실과 같은 최신 모바일 어플리케이션은 모바일 기기에 에너지 부담을 가중시킨다. 따라서 모바일 기기가 최신 모바일 어플리케이션에만 에너지를 집중하기 위해선 인지무선 통신과 같은 통신 및 네트워킹에는 에너지 소모를 최소화 시켜야 한다. 본 논문은 Stop Reporting Algorithm (SRA)를 고안하여 인지 무선 통신에서 Centralized Cooperative Spectrum Sensing (CCSS) 기법의 에너지 소모를 줄일 수 있는 방안을 제시한다. 시뮬레이션 결과를 통해 SRA가 인지 무선 통신의 에너지 소모를 감소시킬 수 있음을 보인다.

☞ 주제어 : 인지 무선 통신, 증강현실, 가상현실

ABSTRACT

The latest mobile applications such as augmented reality, virtual reality, and deep learning can be used efficiently in various fields such as emergency management and game. Accordingly the corresponding applications have been developed for these purposes. However modern mobile applications such as augmented reality and virtual reality increase the energy burden on mobile devices. In order for mobile devices to focus their energy on the latest mobile applications, energy consumption should be minimized for communication and networking, such as cognitive radio. In this paper, we propose a method to reduce the energy consumption of Centralized Cooperative Spectrum Sensing (CCSS) scheme in cognitive radio by devising Stop Reporting Algorithm (SRA). Simulation results show that SRA can reduce energy consumption of mobile devices using cognitive radio.

☞ keyword : Cognitive Radio, Augmented Reality, Virtual Reality

1. 서 론

모바일 유저에게 다양한 경험을 제공하기 위해 증강현실, 가상현실, 게임 등 고성능 프로세서를 요구하는 어플리케이션이 급속도로 개발되고 있다. [1] 그에 따라 핸드폰, 증강현실 고글, 스마트 시계, 스마트 패드 등 모바일 기기에서 사용되는 에너지 소모량 또한 점차 증가하고 있다. 또한, 모바일 기기의 사용량이 증가하고 5G에 시대

가 도래함에 따라, 네트워크 활동에 소모되는 에너지 또한 증가하고 있어서 모바일기기에 에너지 부담을 가중시키고 있다. [2][3]

에너지 소모량을 심화시키는 네트워크 활동 중에 하나가 바로 인지 무선 통신 (Cognitive Radio)이다. 모바일 기기의 사용량이 증가함에 따라서 주파수 부족 현상이 심화되고 있다. 이 문제를 해결하기 위해서 주파수 유희 자원을 동적으로 활용하는 방안이 제시되었는데 그 것이 바로 인지 무선 통신 기술이다. [4] 미래에는 다수의 모바일 기기가 증강현실과 같은 Quality of Experience (QoE)가 매우 중요한 어플리케이션을 탑재하여 실시간으로 사용할 것으로 예상되므로 주파수가 부족할 것으로 보인다. 따라서 주파수를 동적으로 활용하면서도 안정적인 채널 환경을 제공하는 인지 무선 통신 기술을 사용하는 것은 필수적일 것으로 보인다.

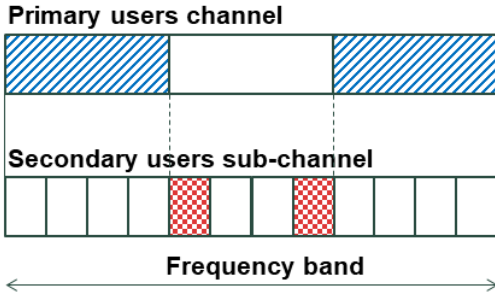
¹ School of Electrical and Electronic Engineering, Yonsei University, Seoul, 03722, Korea.

* Corresponding author (jmc@yonsei.ac.kr)

[Received 16 July 2018, Reviewed 2 August 2018(R2 5 December 2018), Accepted 12 January 2019]

☆ 본 연구는 정부(행정안전부)의 재원으로 재난안전기술개발사업단의 지원을 받아 수행된 연구임 [MOIS-재난-2015-10]

인지 무선 통신에서는 주파수 라이선스 (License)를 확보한 유저인 Primary User (PU)가 주파수를 사용하고 있지 않을 때 주파수 라이선스가 없는 유저 (Secondary User, SU)들이 주파수를 동적으로 사용한다. 그림 1에 해당 과정이 묘사되어있다. 파란색 빗금 친 영역은 PU가 주파수를 사용하고 있음을 나타내고 있다. 따라서 파란색에 해당하는 주파수 대역은 SU가 사용하지 않는다. 반면 PU의 채널중에 하얀색으로 묘사된 부분은 SU들이 sub-channel로 나누어 자유롭게 사용할 수 있다. 그림 1에서는 빨간색 격자무늬로 된 부분이 SU가 사용하고 있다는 것을 나타내고 있다.



(그림 1) 인지 무선 통신에서의 동적인 주파수 채널 활용 (Figure 1) Dynamic Frequency Channel Utilization in Cognitive Radio

인지 무선 통신은 크게 세 가지 과정으로 진행된다. [5] 첫 번째는 네트워크 환경을 조사하는 네트워크 환경 분석 (Radio-scene Analysis) 과정이다. 이 과정에서는 현재 인지 무선 네트워크 환경에 대해서 조사한다. 가장 중점적으로 확보해야할 정보는 스펙트럼 홀 (Spectrum Hole) 이 발생했는지 여부이다. 다양한 방법이 있으나 일반적으로 해당 채널의 신호의 세기를 조사한다. PU가 주파수를 사용하고 있지 않을 때를 일컬어 스펙트럼 홀이 발생했다고 한다. 스펙트럼 홀이 발생했을 때 SU가 그 주파수 대역을 동적으로 사용하는 것이 인지 무선 통신의 핵심 개념이므로 스펙트럼 홀이 발생했는지 여부를 정확하게 알아내는 것은 매우 중요하다.

두 번째 과정은 채널 식별 (Channel Identification) 과정이다. 채널 식별 과정에서는 첫 번째 과정의 정보를 토대로 채널마다 상태를 판단한다. 또한 스펙트럼 홀이 발생한 채널의 정보를 탐색하여 채널의 대역폭 (Bandwidth)등을 조사하여 SU가 채널을 사용할 때 필요한 정보를 제공해 준다.

마지막 과정은 스펙트럼 관리 (Spectrum Management) 과정이다. 첫 번째 과정과 두 번째 과정을 토대로 스펙트럼 홀이 발생한 채널을 사용할지 말지, 사용한다면 어떤 SU가 사용할지 등을 결정하는 과정이다. 스펙트럼 관리에도 다양한 방법이 존재한다. 본 논문에서는 첫 번째 과정인 네트워크 환경 분석 과정인 스펙트럼 홀을 찾는 과정에서 에너지 소모를 줄이는 방안을 제안한다. 스펙트럼 홀을 찾는 과정에서 에너지 소모를 줄이고자 하는 연구는 그동안 많이 진행되어 왔다. [6][7] 그러나 [8]과 같이 스펙트럼 센싱 (Spectrum Sensing)을 수행할 때 개개의 SU가 스펙트럼 홀을 어떻게 찾아낼 것인가 하는 스펙트럼 감지 (Spectrum Detection)의 성능을 올리는 것에 중점을 두거나, [9][10]과 같이 다른 채널 환경을 고려하는 등의 연구만 진행되어 왔으며, CCSS하에서 다수의 SU들에게 스펙트럼 센싱 순위 (Priority)를 부여하는 방안은 논의가 되지 않고 있다. 본 논문에서는 과거 논문들에서 연구되지 않았던 새로운 알고리즘 Stop Reporting Algorithm을 고안하여 스펙트럼 센싱을 수행하는 SU들의 수를 한정시켜 에너지 소모를 줄이는 방안을 제안한다. 앞서 언급한 바와 같이 비슷한 연구가 존재하지 않기에 일반적인 CCSS 상황과의 에너지 소모값을 비교하여 SRA의 에너지 효율성을 증명한다.

2. 에너지 효율적인 인지 무선 통신을 위한 스펙트럼 센싱 모델

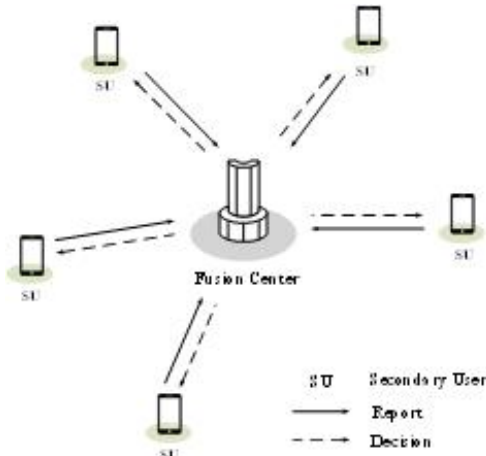
증강현실과 같이 고에너지 소모 어플리케이션을 사용하는 유저들이 다수 포진한 네트워크 환경에서는 주파수 할당 (Spectrum Assignment), 채널 접속 (Channel Access) 등 어플리케이션을 사용하는 데 있어서 필요한 네트워크 활동을 효율적으로 진행해서 에너지를 최소화 시켜야 한다. 에너지 효율적인 네트워크 활동은 모바일 기기에 증강현실과 같은 에너지 사용량이 많은 어플리케이션에 에너지를 집중시킬 수 있는 여력을 제공할 수 있다. 앞서 서론에서 언급한대로, 본 논문에서는 에너지 소모가 심한 네트워크 활동 중 하나인 인지 무선 통신에서의 에너지 사용 최소화에 집중한다.

2.1 Centralized Cooperative Spectrum Sensing

인지 무선 통신에서 스펙트럼 홀을 찾는 과정을 스펙트럼 센싱이라고 한다. 스펙트럼 센싱은 개개의 SU들이

스펙트럼 홀을 찾는 것을 기본 골자로 한다. 그러나 개개의 SU들이 스펙트럼 홀을 찾을 경우 페이딩 (Fading)이나 노이즈 (Noise)와 같은 네트워크 변수들 때문에 스펙트럼 홀을 못 찾거나 혹은 스펙트럼 홀이 아닌데 스펙트럼 홀이라고 판단하는 경우가 많아진다. 따라서 각 SU들의 정보들을 조합하여 스펙트럼 센싱 에러를 최소화 하는 협응적 방법이 고안되었는데 이를 Cooperative Spectrum Sensing (CSS)라고 한다. [11]

CSS는 두 가지 방안으로 나뉘어진다. [12] 첫 번째는 스펙트럼이 비어있는지 조사하는 과정과 어떤 SU가 사용할지 등 스펙트럼 관리 (Spectrum Management)를 개개의 SU가 홀로 수행하는 분산형 방식 Distributed Cooperative Spectrum Sensing (DCSS)이다.



(그림 2) 중앙 집중형 협응적 스펙트럼 센싱

(Figure 2) Centralized Cooperative Spectrum Sensing

또 한 가지 방법은 중앙 집중형인 Centralized Cooperative Spectrum Sensing (CCSS)이다. CCSS에서는 각각의 SU들이 탐색한 채널 정보를 모아서 채널의 상태를 판단하는 Fusion Center (FC)가 존재한다. 그림 2에 CCSS의 과정이 잘 나타나 있다. SU가 해당 채널을 탐색하고 (스펙트럼 센싱) 그 결과를 보고 (Report)한다. 그 후 FC가 SU들의 보고 결과를 보고 해당 스펙트럼을 어떻게 관리할지 결정 (Decision)을 내려 SU들에게 알린다. DCSS에는 SU들에게 스펙트럼 관리까지 수행하게 하므로 에너지 소모가 많다. 따라서 증강현실과 같은 에너지 소모가 많은 어플리케이션을 사용하는 환경에는 맞지 않다. 따라서 본 논문에서는 유저들이 CCSS 방법을 사용한다고 가정하고 CCSS의 에너지 소모량을 줄이는 방안에 대해 서술한다.

2.2 CCSS 방법의 스펙트럼 홀을 발견할 확률

본 네트워크 환경에서는 FC가 K-out-of-N 방법을 사용한다고 가정한다. K-out-of-N 방법이란 N개의 SU의 채널 탐색 정보가 FC에 전달되었을 경우 K개 이상의 SU가 채널이 비어있다고 보고했을 때 FC가 스펙트럼 홀이 발생했다고 판단하는 방법이다. FC가 스펙트럼 홀을 찾을 확률 P_n 은 다음과 같이 정의된다.

$$P_n = \sum_{n=K}^N \binom{N}{n} (P_s(1-q) + (1-P_s)q)^n \times ((1-P_s)(1-q) + P_sq)^{N-n}$$

위 식에서 P_s 는 각각의 SU가 스펙트럼 홀을 찾을 확률을 의미한다. SU가 PU가 점유 중인 채널 상태를 보고 하는 보고 채널 (Reporting Channel)은 Binary Symmetric Channel (BSC)임을 가정한다. q 는 BSC에서 에러가 발생할 확률이다.

2.3 CCSS 방법의 총 에너지 소모량

CCSS 활용 시 각 SU에서 스펙트럼 센싱 후 FC에 보고를 1회 수행하는 데 소모되는 에너지를 E_{SU} 라 정의 하자. N개의 SU가 CCSS를 수행하는 데 소모되는 에너지 E_{tot} 은 다음과 같이 정의된다.

$$E_{tot} = N \cdot E_{SU}$$

그러나 FC가 K-out-of-N 방법을 활용할 때, 스펙트럼 홀이 있다고 판단하기 위해선 오직 K개의 스펙트럼 홀 발견 보고만 필요하다. 따라서 FC에게 N개 SU의 보고가 전부 다 필요하진 않은 경우가 대부분이다. FC에게 불필요한 채널 센싱 정보가 보고된다는 것은 SU에게서 불필요한 에너지 낭비가 발생하고 있다는 의미가 된다.

3. Stop Reporting Algorithm

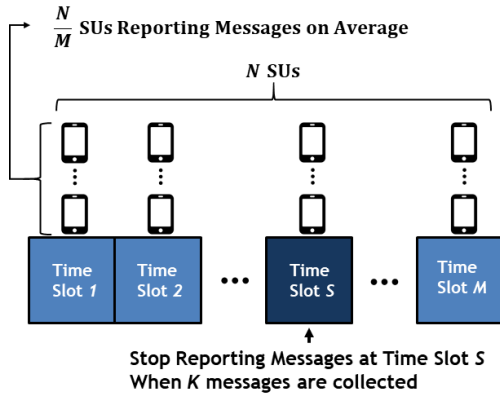
위에서 언급한 SU의 불필요한 에너지 소모 문제를 해결하기 위하여 본 논문에서는 FC가 K-out-of-N 방법을 사용할 때 SU의 CCSS 에너지 소모를 줄일 수 있는 Stop Reporting Algorithm (SRA)를 제안한다.

3.1 SRA 동작 원리

SRA는 스펙트럼 센싱에 주어진 시간보다 실제 수행하는 시간이 적은 상황에서 쓰이는 알고리즘이다. SU에게 스펙트럼 센싱을 수행하는 데 주어진 시간을 τ 라 하자. 또한 SU가 스펙트럼 센싱을 1회 수행하는 데 걸리는 시간을 $\frac{\tau}{M}$ 이라 하자. M 은 자연수이다. 따라서 다음 부등식이 성립된다.

$$\tau \geq \frac{\tau}{M}$$

위 부등식의 조건은 앞서 언급한 SRA가 동작할 수 있는 환경을 제공하기 위해 꼭 필요하다. 각 SU가 스펙트럼 센싱을 1회 수행하는 데 $\frac{\tau}{M}$ 시간만큼 걸리므로 N 개의 SU를 M 개의 타임 슬롯 (Time Slot)에 적절히 배치하면 τ 시간 안에 모든 SU가 스펙트럼 센싱을 마칠 수 있다. SRA 동작의 핵심원리는 그림 3과 같다.



(그림 3) SRA 동작원리
(Figure 3) SRA Process

SU들을 M 개의 타임슬롯에 배치하고 SU들이 차례대로 스펙트럼 센싱 및 FC에 센싱 정보 보고를 수행한다. FC에 K 개 이상의 스펙트럼 홀 발견 메시지가 전달된다면 FC가 스펙트럼 센싱을 그만 하라는 Stop Reporting Message (SRM)을 각 SU에 보낸다. 따라서 그 이후의 타임슬롯에 배치된 SU들은 스펙트럼 센싱을 수행하지 않음으로써 에너지 소모를 줄일 수 있다.

3.2 SRA의 에너지 감소 효과

특정 타임슬롯에 m 개의 SU가 배치되었다고 가정하자. 해당 타임슬롯에서 스펙트럼 홀을 발견했다는 메시지 개수의 평균값 I_{avg} 은 다음과 같이 정의된다.

$$I_{avg} = \sum_{j=0}^m j(P_s(1-q) + (1-P_s)q)^j \times ((1-P_s)(1-q) + P_sq)^{m-j}$$

위 식은 멱급수이므로 멱급수의 합을 풀어내면 다음과 같이 얻어낼 수 있다.

$$I_{avg} = \left(\frac{r(1-r^m)}{(1-r)^2} - \frac{mr^{m+1}}{1-r} \right) \times (1-P_s)(1-q) + P_sq^m$$

위 식에서 r 은 공비를 의미하며 다음과 같이 정의된다.

$$r = \frac{P_s(1-q) + (1-P_s)q}{(1-P_s)(1-q) + P_sq}$$

SRA에서는 각 SU가 특정 타임 슬롯에 배치될 확률은 $\frac{1}{M}$ 로 설정된다. 다시 말해서 특정 타임 슬롯에 배치되는 SU의 숫자 m 은 이항 분포를 따르며 다음과 같이 정의된다.

$$m \sim B(N, \frac{1}{M})$$

그러므로 m 의 평균값은 다음과 같다.

$$E[m] = \frac{N}{M}$$

따라서 특정 타임 슬롯에서 스펙트럼 홀을 발견했다는 메시지 개수의 평균값의 기댓값 $E[I_{avg}]$ 은 다음과 같다.

$$E[I_{avg}] = \left(\frac{r(1-r^{\frac{N}{M}})}{(1-r)^2} - \frac{\frac{N}{M}r^{\frac{N}{M}+1}}{1-r} \right) \times (1-P_s)(1-q) + P_sq^{\frac{N}{M}}$$

한편 SRM를 보내서 스펙트럼 센싱 수행을 중단하라는 지점 (Stopping Point) S 의 평균값은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$S = \min(i), i = \{i | K \leq i \cdot E[I_{avg}], i \leq M\}$$

위 식에서 i 는 자연수이다. S 번째 지점에서 스펙트럼 센싱 수행이 멈추지면 SRA를 사용한 SU들의 전체 에너지 소모량 E_{SRA} 은 다음과 같다.

$$E_{SRA} = \frac{S \times N}{M} E_{SU}$$

위 식을 적용하면 다음 부등식은 자연스럽게 만족된다.

$$\frac{S \times N}{M} E_{SU} \leq N \cdot E_{SU}$$

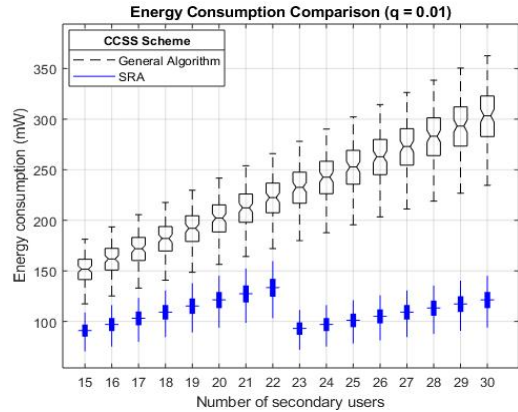
따라서 $E_{SRA} \leq E_{tot}$ 이 만족되므로 SRA를 사용하면 일반적인 CCSS를 사용할 때 보다 에너지 소모량이 줄어든다는 것이 증명된다.

3. 시뮬레이션 및 결과

본 논문에서 사용된 시뮬레이션은 MATLAB R2018a에서 이루어졌다. 파라미터들은 다음과 같이 설정하였다. 각각의 SU가 스펙트럼 홀을 찾을 확률 P_s 를 0.9, K-out-of-N 방법의 기준값 K 를 6, M 값을 5로 설정하였다. 또한 각각의 SU가 스펙트럼 센싱에 소모하는 에너지 E_{SU} 는 평균 10mW, 분산 1에 가우시안 분포를 따르는 동적인 에너지 소모 상황을 설정하였다. SU 유저의 수 N 을 15명의 유저부터 30명의 유저까지 변화시키며 SRA와 일반적인 CCSS와의 에너지 소모값을 비교하는 실험을 진행하였다. BSC에서 에러가 발생할 확률 q 를 0.01, 0.03, 0.05으로 변화시키며 실험을 진행하였으며 그에 따른 결과는 그림 4, 5, 6에 나타나있다.

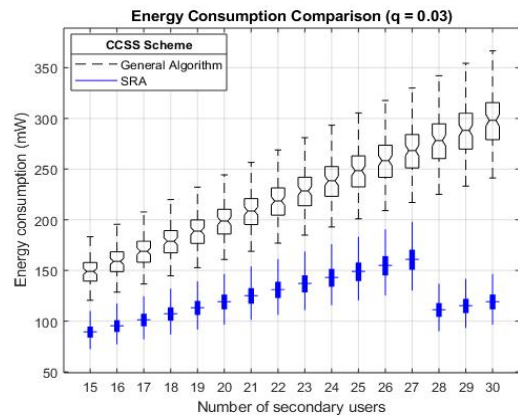
그림 4는 BSC에서 에러가 발생할 확률 q 가 0.01일 때 실험을 진행한 결과이다. 본 논문에서 제안한 SRA를 사용했을 때 에너지 소모량이 확연히 감소되는 것을 확인할 수 있다. 23개의 SU가 있는 상황에서 에너지 소모량이 더욱 급격하게 감소하는 것은 23명 이전에서는 중

단점 S 가 타임슬롯 3 일 때 SRM이 전송되었던 반면 23명 이상일 때부터는 한 타임 슬롯마다 스펙트럼 센싱을 수행하는 SU가 충분히 많아졌기 때문에 중단점 S 가 타임슬롯 2일 때로 설정되었기 때문이다. 그림 5는 BSC에서 에러가 발생할 확률 q 가 0.03일 때 실험을 진행한 결과이다. 그림 4에서와 비슷한 결과가 나왔으나, 23개의



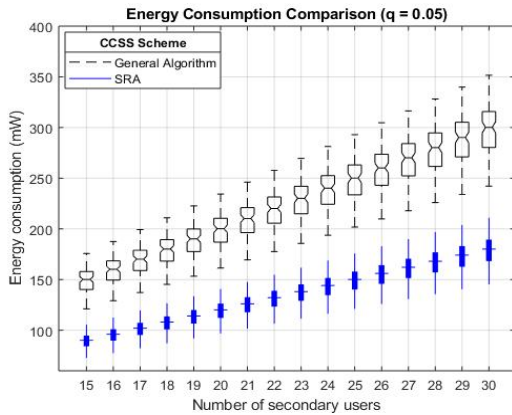
(그림 4) 일반적인 CCSS 방법과 SRA의 에너지 소모량 비교 ($q = 0.01$)

(Figure 4) Comparison of Energy Consumption of General CCSS Algorithm and SRA ($q = 0.01$)



(그림 5) 일반적인 CCSS 방법과 SRA의 에너지 소모량 비교 ($q = 0.03$)

(Figure 5) Comparison of Energy Consumption of General CCSS Algorithm and SRA ($q = 0.03$)



(그림 6) 일반적인 CCSS 방법과 SRA의 에너지 소모량 비교 ($q = 0.05$)

(Figure 6) Comparison of Energy Consumption of General CCSS Algorithm and SRA ($q = 0.05$)

SU일 때가 아닌 28개의 SU에서 중단점 S가 타임슬롯 2로 줄어드는 것을 볼 수 있었다. 이 현상이 나타나는 이유는 그림 4에서 수행한 실험보다 채널 에러 확률이 높아서 충분한 정보를 모으지 못했기 때문이다. 따라서 타임슬롯 2까지 K개의 메시지를 모으려면 그림 4에서보다 더 많은 SU가 필요했다. 그림 6은 BSC에서 에러가 발생할 확률 q 를 0.05로 설정하고 수행한 실험의 결과가 나타나 있다. 그림 4나 5와 달리 특정 지점에서부터 중단점 S가 타임슬롯 3에서 타임슬롯 2로 줄어들었던 결과가 나타나 있지 않다. BSC에서 에러가 발생할 확률이 0.05로 늘어났기 때문에, K개 이상의 충분한 정보가 모이지 않았기 때문이다. 따라서 SRA는 BSC에서 에러가 발생할 확률이 적을 때 더 효과적임을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 SRA 방법을 고안하여 CCSS에서 소모되는 에너지를 감소시키는 방안을 제안하였다. 시뮬레이션을 통하여 SRA가 SU의 에너지 소모를 매우 효과적으로 줄일 수 있다는 것이 증명되었다. 따라서 본 논문에서 제안한 SRA를 사용한다면 인지무선통신에서의 에너지 소모를 줄일 수 있으므로 모바일 기기가 증강현실, 가상현실 등 모바일 기기의 에너지 부담을 가중 시키는 미래 기술들에 에너지를 더욱 투입할 수 있는 여력이 생길 것이다.

참고문헌(Reference)

- [1] S. Kim, S. Kang, Y. Choi, M. Choi, and M. Hong, "Augmented-Reality Survey: from Concept to Application," *KSII Trans. Internet and Information Systemes.*, vol. 11, no. 2, pp. 982-1004, Feb. 2017. <https://doi.org/10.3837/tiis.2017.02.019>
- [2] J. Chung, Y. Park, J. Park, and H. Cho, "Adaptive Cloud Offloading of Augmented Reality Applications on Smart Devices for Minimum Energy Consumption," *KSII Trans. Internet and Information Systemes.*, vol. 9, no. 8, pp. 3090-3102, Aug. 2015. <https://doi.org/10.3837/tiis.2015.08.020>
- [3] J. Chung, T. Ha, S. Jo, T. Kyung, and S. Park, "Augmented Reality based Low Power Consuming Smartphone Control Scheme," *KSII Trans. Internet and Information Systemes.*, vol. 11, no. 10, pp. 3090-3102, Oct. 2017. <https://doi.org/10.3837/tiis.2017.10.026>
- [4] J. Mitola, and G. Maguire, "Cognitive radio: making software radios more personal," *IEEE Personal Commun.*, vol. 6, no. 4, pp. 13-18, Aug. 1999. <https://doi.org/10.1109/98.788210>
- [5] S. Haykin, "Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 23, no. 2, pp. 201-220, Feb. 2005. <https://doi.org/10.1109/jisac.2004.839380>
- [6] K. Cichon, A. Dliks, and H. Bogucka "Energy-Efficient Cooperative Spectrum Sensing: A Survey," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 18, no. 3, pp. 1861-1886, 3rd Quart., 2016. <https://doi.org/10.23919/fruct.2017.8250160>
- [7] S. Sharma, T. Bogale, L. Le, S. Chatzinotas, X. Wang, and B. Ottersten, "Dynamic Spectrum Sharing in 5G Wireless Networks With Full-Duplex Technology: Recent Advances and Research Challenges," *IEEE Commun. Surveys Tuts.*, vol. 20, no. 1, pp. 674-707, 1st Quart., 2018. <https://doi.org/10.1109/comst.2017.2773628>
- [8] M. Tavana, A. Rahmati, and V. Shah-Mansouri, "Cooperative Sensing With Joint Energy and Correlation Detection in Cognitive Radio Networks" *IEEE Commun. Letters*, vol. 21, no. 1, pp. 132-135,

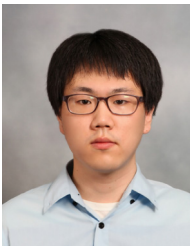
- Jan. 2017.
<https://doi.org/10.1109/LCOMM.2016.2613858>
- [9] M. Ghorbel, H. Nam, and M.-S. Alouini, "Soft Cooperative Spectrum Sensing Performance Under Imperfect and Non Identical Reporting Channels" *IEEE Commun. Letters*, vol. 19, no. 2, pp. 227-230, Feb. 2015.
<https://doi.org/10.1109/LCOMM.2014.2377231>
- [10] G. Chandrasekaran, and S. Kalyani, "Performance Analysis of Cooperative Spectrum Sensing Over α - μ Shadowed Fading" *IEEE Commun. Letters*, vol. 4, no. 5, pp. 553-556, Oct. 2015.
<https://doi.org/10.1109/ICCC.2013.6731664>
- [11] G. Ganesan, and Y. Li, "Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio, Part II: Multiuser Networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 6, no. 6, pp. 2214-2222, Jun. 2007.
<https://doi.org/10.1109/twc.2007.05776>
- [12] I. Akyildiz, B. Lo, and R. Balakrishnan, "Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks: A survey," *Physical Commun.*, vol. 4, no. 1, pp. 40-62, Mar. 2011
<https://doi.org/10.1016/j.phycom.2010.12.003>

● 저 자 소 개 ●



신 영 환(Youngwan Shin)

2016년 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)
2016년~현재 연세대학교 대학원 전기전자공학과 석박사통합과정
관심분야 : Cognitive Radio, Deep Learning, etc.
E-mail : shinyh1115@yonsei.ac.kr



서 순 호(Sunho Seo)

2014년 연세대학교 전기전자공학과 (공학사)
2014년~현재 연세대학교 대학원 전기전자공학과 석박사통합과정
관심분야 : Trust, Augmented Reality, etc.
E-mail : trial@yonsei.ac.kr



정 종 문(Jong-Moon Chung)

1992년 연세대학교 전자공학과 (공학사)
1994년 연세대학교 대학원 전자공학과 (공학석사)
1999년 Pennsylvania State University, Dept. of Electrical Engineering (공학박사)
1997년~1999년 Assistant Professor & Instructor, Pennsylvania State University, Dept. of Electrical Engineering
2000년~2005년 Director, Advanced Communication Systems Engineering Laboratory (ACSEL)
2000년~2005년 Director, Oklahoma Communication Laboratory for Networking & Bioengineering (OCLNB)
2000년~2005년 Associate Professor (Tenured), Oklahoma State University, School of Electrical & Computer Engineering
2005년~현재 연세대학교 전기전자공학과 교수
관심분야 : IoT & Smartphones, Smart Cars & ITS, Military Communications, NFV / ICN / SDN, LTE-A / 5G Networks, Cloud Computing & Big Data, Public Safety AR Simulators and Networking.
E-mail : jmc@yonsei.ac.kr