
인지 무선 네트워크에서의 기회적 주파수 접근 방식에 관한 성능 분석

심동보* · 이유태

동의대학교

Performance Analysis of Opportunistic Spectrum Access in Cognitive Radio networks

Dong-bo Sim* · Yutae Lee

Donggeui University

E-mail : miyeuni84@deu.ac.kr

요 약

OSA(Opportunistic Spectrum Access)는 주파수의 효율적인 사용을 위해 1차 사용자가 주파수 대역을 사용하지 않을 때, 2차 사용자가 사용할 수 있도록 하는 인지 무선 기술이다. 본 논문에서는 2차 사용자가 주파수를 이용하기 위한 두 가지 OSA 방식을 제안한다. 또한 1차 사용자와 2차 사용자의 성능에 관한 수학적 분석과 시뮬레이션을 통해 다양한 환경에서 시스템 파라미터가 OSA 방식에 끼치는 영향을 분석하여 제안한 OSA 방식을 비교한다.

ABSTRACT

OSA(Opportunistic Spectrum Access) allows secondary users not having a license for spectrum usage to opportunistically occupy an idle spectrum owned by a licensee named primary users. We propose two OSA schemes for un-slotted secondary users exploiting spectrum opportunities in un-slotted primary networks. We provide mathematical analysis and simulation results to reveal the impact of various system parameters.

키워드

OSA(Opportunistic Spectrum Access), CR(Cognitive Radio), performance analysis

I. 서 론

시간적, 공간적으로 사용되지 않고 있는 주파수 대역으로 인해 전체 주파수 효율이 떨어지고 주파수 자원이 낭비되고 있다. 이러한 비효율적인 주파수 사용에 대한 방안으로, 인지 무선(CR) 기술은 IEEE 802.22WG(Working Group)에서 2004년부터 현재까지 표준화 작업 중에 있다. OSA는 일정 주파수에 대한 허가를 가진 1차 사용자가 주파수를 사용하지 않을 때, 주파수 사용에 대한 허가를 갖지 못한 2차 사용자가 해당 주파수를 사용할 수 있도록 하는 인지 무선 기술이다.[1]

본 논문에서는 주파수 자원의 효율을 높이기 위해 2차 사용자가 주파수를 이용하기 위한 두 가

지 OSA 방식을 제안하고, 1차 사용자와 2차 사용자의 성능에 관한 수학적 분석과 C언어를 이용한 시뮬레이션을 통해 다중 채널과 다수의 2차 사용자로 확장된 다양한 환경에서 시스템 파라미터가 OSA 방식에 끼치는 영향을 분석하여 제안한 OSA 방식을 비교한다.

II. OSA 방식

2차 사용자는 정보의 전송에 앞서 채널을 센싱하고, 채널이 사용되고 있지 않으면 정보를 전송한다.[2] 1차 사용자와 2차 사용자 사이의 동기화는 하지 않고, 각각의 2차 사용자는 한 번에 한

채널에서만 정보를 전송한다고 가정한다.[3]

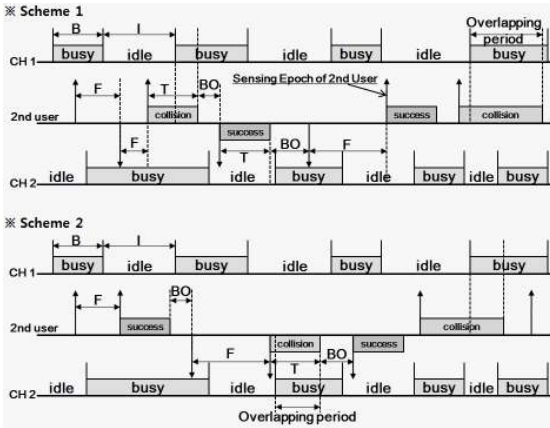


그림 1. 2차 사용자의 두 가지 OSA 방식

2차 사용자는 채널을 센싱하고, 채널이 사용되고 있지 않다면 패킷을 전송하고, 패킷의 전송을 완료한 후에 BO 길이의 backoff 기간 후에 센싱 과정을 반복한다. 반면에, 센싱한 채널이 사용 중이라면 F 길이의 freezing 기간 후에 다시 센싱을 한다. 랜덤한 backoff 또는 freezing 기간 후에 2차 사용자는 센싱 할 채널을 선택한다. [그림1]과 같이 제안한 두 가지 OSA 방식은 다음과 같다.

방식 1 : 2차 사용자가 센싱한 채널이 사용되고 있지 않을 때, 채널에서의 패킷 전송을 완료했다면 랜덤한 backoff 기간 BO 후에 같은 채널을 센싱한다. 반면에 패킷 전송이 실패 하게 되면 랜덤한 backoff 기간 BO 후에 가장 오래전에 선택한 채널을 센싱한다. 또한, 2차 사용자가 센싱한 채널이 사용되고 있다면 랜덤한 freezing 기간 F 후에 가장 오래전에 선택한 채널을 센싱한다.

방식 2 : 2차 사용자가 센싱한 채널이 사용되고 있지 않을 때, 채널에서의 패킷 전송이 완료되면 랜덤한 backoff 기간 BO 후에 가장 오래전에 선택한 채널을 센싱한다. 채널에서의 패킷 전송이 실패하거나, 채널이 사용되고 있다면 각각 랜덤한 backoff 기간 BO 와 freezing 기간 F 후에 같은 채널을 다시 센싱한다.

[그림1]에서 랜덤변수 T 는 2차 사용자의 패킷 전송 시간을 나타내고, 랜덤변수 B 와 I 는 각각 채널이 1차 사용자에게 의해 사용 중인 시간과 사용되지 않는 시간을 나타낸다.

III. 수학적 분석

이 절에서는 두 개의 i.i.d.인 채널로 구성된 네트워크를 고려한다. 1차 사용자에게 의한 채널 i 의 사용은 두 개의 상태 0(사용 중인 상태)과 1(사용되고 있지 않는 상태)을 가진 연속시간 마코프 연

쇄 $\{X_i(t)\}$ 로 모형화한다. 1차 사용자가 채널을 사용하는 기간 B 는 rate이 μ 인 지수분포를 가지며, 사용하지 않는 기간 I 는 rate이 λ 인 지수분포를 가진다고 가정한다. 2차 사용자는 채널에서 주파수 사용기회를 찾기 위해 한 번에 한 채널만 센싱할 수 있다고 가정한다. 완벽하고 즉각적인 센싱을 가정하면, 2차 사용자가 패킷을 전송 중일 때 1차 사용자가 다시 주파수를 사용하는 경우에만 1차 사용자와 2차 사용자 간의 충돌이 발생한다. 또한, 2차 사용자는 전송할 패킷을 항상 가지고 있는 포화 상태를 가정한다.[2]

2차 사용자가 채널을 센싱하는 시점을 관찰한다. k 번째 센싱 포인트 t_k 에서 센싱하는 채널을 $S(t_k)$ 로 나타내면, 확률 과정 $\{(X_1(t_k), X_2(t_k), S(t_k))\}$ 은 3차원 이산 시간 Markov chain이 된다. $Q_{jm}(t) \equiv P(X_i(t) = m | X_i(0) = j)$ 은 $\{X_i(t)\}$ 의 천이확률함수이고,[4] $F_A(t)$ 는 랜덤변수 A 의 누적분포함수이다. 두 가지 OSA 방식에 의한 Markov chain $\{(X_1(t_k), X_2(t_k), S(t_k))\}$ 의 천이확률 $P_{(i,j,q),(l,m,r)} \equiv P(X_1(t_{k+1}) = l, X_2(t_{k+1}) = m, S(t_{k+1}) = r | X_1(t_k) = i, X_2(t_k) = j, S(t_k) = q)$, $i, j, l, m = 0, 1, q, r = 1, 2$ 는 다음과 같이 계산된다.

OSA 방식 1 :

$$\begin{aligned}
 P_{(0,j,1),(l,m,1)} &= 0, \\
 P_{(i,0,2),(l,m,2)} &= 0, \\
 P_{(0,j,1),(l,m,2)} &= \int_0^\infty Q_{0l}(t) Q_{jm}(t) dF_T(t), \\
 P_{(i,0,2),(l,m,1)} &= \int_0^\infty Q_{il}(t) Q_{0m}(t) dF_T(t), \\
 P_{(1,j,1),(l,m,1)} &= \int_0^\infty \int_0^\infty e^{-\lambda t} Q_{0l}(b) Q_{jm}(t+b) dF_T(t) dF_{BO}(b), \\
 P_{(i,1,2),(l,m,2)} &= \int_0^\infty \int_0^\infty e^{-\lambda t} Q_{il}(t+b) Q_{lm}(b) dF_T(t) dF_{BO}(b), \\
 P_{(1,j,1),(l,m,2)} &= \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^t \lambda e^{-\lambda x} Q_{0l}(t-x+b) Q_{jm}(t+b) dx dF_T(t) dF_{BO}(b), \\
 P_{(i,1,2),(l,m,1)} &= \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^t \lambda e^{-\lambda x} Q_{il}(t+b) Q_{0m}(t-x+b) dx dF_T(t) dF_{BO}(b).
 \end{aligned}$$

OSA 방식 2 :

$$\begin{aligned}
 P_{(0,j,1),(l,m,1)} &= \int_0^\infty Q_{0l}(t) Q_{jm}(t) dF_T(t), \\
 P_{(i,0,2),(l,m,2)} &= \int_0^\infty Q_{il}(t) Q_{0m}(t) dF_T(t), \\
 P_{(0,j,1),(l,m,2)} &= 0, \\
 P_{(i,0,2),(l,m,1)} &= 0, \\
 P_{(1,j,1),(l,m,1)} &= \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^t \lambda e^{-\lambda x} Q_{0l}(t-x+b) Q_{jm}(t+b) dx dF_T(t) dF_{BO}(b), \\
 P_{(i,1,2),(l,m,2)} &= \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^t \lambda e^{-\lambda x} Q_{il}(t+b) Q_{0m}(t-x+b) dx dF_T(t) dF_{BO}(b), \\
 P_{(1,j,1),(l,m,2)} &= \int_0^\infty \int_0^\infty e^{-\lambda t} Q_{0l}(b) Q_{jm}(t+b) dF_T(t) dF_{BO}(b), \\
 P_{(i,1,2),(l,m,1)} &= \int_0^\infty \int_0^\infty e^{-\lambda t} Q_{il}(t+b) Q_{0m}(b) dF_T(t) dF_{BO}(b).
 \end{aligned}$$

P 는 $\{(X_1(t_k), X_2(t_k), S(t_k))\}$ 의 천이확률행렬보다 한 단계 전이고, 고정된 확률 $\pi_{jq} \equiv \lim_{k \rightarrow \infty} P(X_1(t_k) = i, X_2(t_k) = j, S(t_k) = q)$, $i, j = 0, 1, q = 1, 2$ 는 $\pi = \pi P$ 및 $\pi e = 1$, $\pi = (\pi_{jq})$ 및 $e = (1, \dots, 1)'$ 를 사용하여 계산할 수 있다.

2차 사용자의 포화 처리량은 충돌 없이 2차 사용자가 전송하는 시간 비율로 정의한다. 포화 처

리량 U 는 다음과 같다.

$$U = \frac{\pi_{idle} E[T1_{\{T < T\}}]}{(1 - \pi_{idle}) E[F] + \pi_{idle} E[T + BO]}$$

$$= \frac{\pi_{idle} \int_0^{\infty} t e^{-\lambda t} dF_T(t)}{E[F] + \pi_{idle} E[T + BO - F]}$$

$\pi_{idle} = \pi_{101} + \pi_{111} + \pi_{012} + \pi_{112}$ 는 사용되고 있지 않는 채널을 센싱하는 확률이다. 1차 사용자는 2차 사용자의 패킷 전송에 영향을 받고, 2차 사용자에 의한 1차 사용자의 사용에 방해가 된 기간은 중복되는 시간으로 정의된다.[2] 확률적인 가정 하에 2차 사용자가 채널을 통해 패킷을 전송하는 사이에 1차 사용자가 채널을 사용하는 이전의 충돌 기간은 중복되는 시간에서 무시한다. 중복되는 시간의 비 $P_{overlap}$ 은 다음과 같다.

$$P_{overlap} = \frac{1}{2} \frac{\lambda + \mu}{\lambda} \frac{\pi_{idle} E[\min(T - I, B) 1_{\{T > I\}}]}{(1 - \pi_{idle}) E[F] + \pi_{idle} E[T + BO]}$$

만약 $\lambda = \mu$ 라면,

$$P_{overlap} = \frac{\pi_{idle} \int_0^{\infty} [\frac{1}{\lambda} (1 - e^{-\lambda t}) - t e^{-\lambda t}] dF_T(t)}{E[F] + \pi_{idle} E[T + BO - F]}$$

수치분석을 위하여, $(\lambda, \mu) = (0.5, 1.0)$ 와 $(1.0, 2.0)$ 으로 설정하고, 측정에 따르면 사용되고 있지 않는 공간의 기간이 주로 채널이 사용되고 있지 않을 확률이 대략 같기 때문에 2/3로 설정한다.

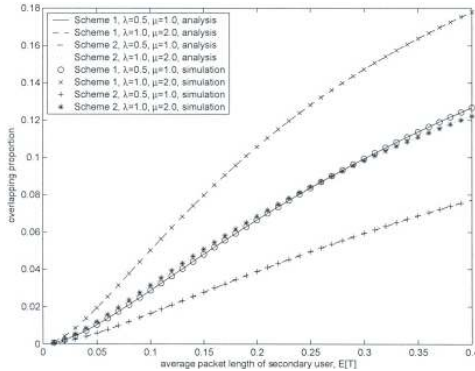


그림 2. 중복되는 시간의 비

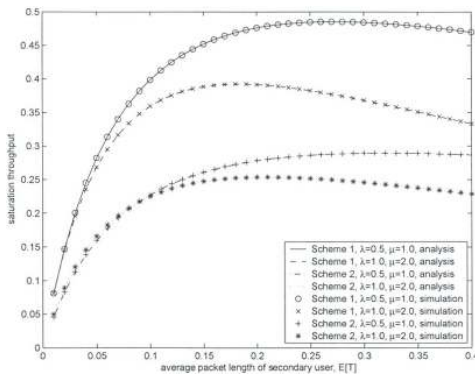


그림 3. 포화 처리량

[그림 2]와 [그림 3]은 2차 사용자가 지수분포를 가지는 패킷을 사용하여 두 가지 OSA 방식을 각각 중복되는 시간의 비와 포화 처리량을 나타낸다. F 를 T 와 같은 분포를 가진다고 가정하고, 0.01에서 0.40까지 $E[T]$ 에 변화를 준다. backoff 시간 BO 는 $E[BO] = 0.1$ 과 같이 지수분포로 가정한다. 이 파라미터들은 오로지 일러스트 목적이므로, 다른 상황을 반영하여 수정할 수 있다. 시뮬레이션 결과는 수학적 분석과 매우 일치한다.

IV. 시뮬레이션

다수의 채널과 2차 사용자로 시스템을 구성하고, 채널의 수는 N , 그리고 2차 사용자의 수는 M 으로 나타낸다. 각각의 2차 사용자는 한 번에 한 채널에서만 패킷을 전송할 수 있고, 다수의 2차 사용자는 N 개의 채널에서 주파수를 사용하기 위해 경쟁한다. 모든 2차 사용자는 동일한 접속 파라미터를 채택하고, 이것은 다른 통신을 하지 못하는 동질성을 볼 수 있다. 추가로 완벽하고 즉각적인 센싱을 가정하며, 2차 사용자는 채널에서 1차 사용자와 다른 2차 사용자에 대한 전송을 알아 낼 수 있고, 채널에서 2차 사용자가 패킷 전송 중에 1차 사용자가 채널을 사용하는 지점에서 충돌이 발생한다.

C언어를 이용한 시뮬레이션에서 파라미터는 채널의 수 $N = 20$, 2차 사용자 $M = 10$ 으로 두고 λ 는 0.1에서 5.0까지 0.1씩 증가하며, μ 는 각각 $\mu = \lambda/2, \lambda, 2\lambda$ 값을, 시뮬레이션 시간은 1000000 slots 으로 설정하였다. 또한, 지수분포를 가지는 랜덤변수 F, T, BO 는 각각 0.2, 0.1, 0.1로 설정하여 두 가지 OSA 방식의 성능에 대한 시뮬레이션 하였다.

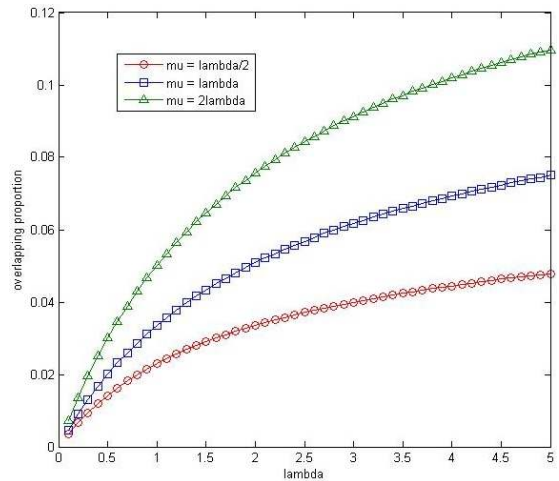


그림 4. OSA 방식 1에서 중복되는 시간의 비

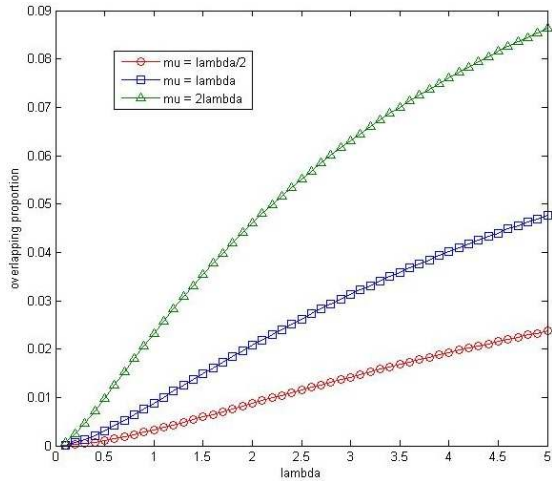


그림 5. OSA 방식 2에서 중복되는 시간의 비

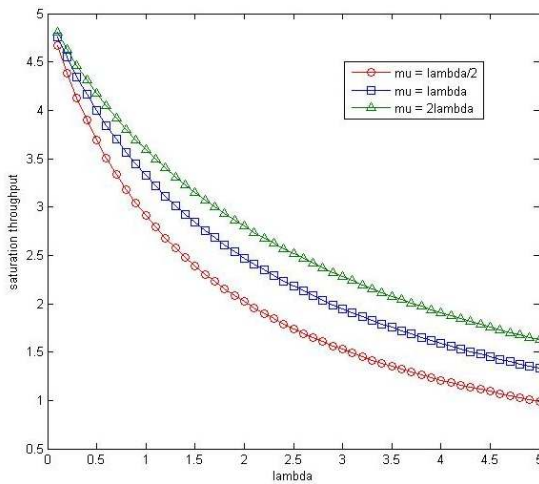


그림 6. OSA 방식 1에서 포화 처리량

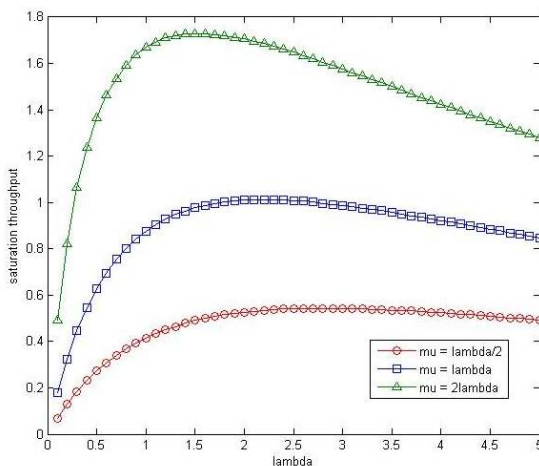


그림 7. OSA 방식 2에서 포화 처리량

[그림4] 및 [그림5]와 같이 중복되는 시간 비는 $\mu = \lambda/2$ 일 때, 두 가지 방식 모두 낮은 비율로 나타났다.

λ 값이 증가할 때, 방식 1의 경우에 [그림6]과 같이 $\mu = 2\lambda$ 에서 최대치(4.8076)를 시작으로 점차 줄어든다. 한편, 방식 2의 경우에는 [그림7]과 같이 $\mu = 2\lambda$, $\lambda = 1.6$ 에서 최대치(1.7297)가 되며 줄어든다. 뿐만 아니라, 이 최대치는 방식 1의 경우의 수렴치(1.6253이하)보다 높을 것이므로 이상적인 값이라 할 수 있다.

V. 결 론

사용 중인 네트워크에서 2차 사용자의 주파수 사용 기회에 대한 두 가지 OSA 방식을 제안하였다. 2차 사용자의 포화 처리량과 1차 사용자와 2차 사용자의 패킷 전송 사이에서 중복되는 시간의 비에 대한 수학적 분석과 시뮬레이션을 통해 파라미터가 끼치는 영향을 확인하였다.

다음 단계는 제안한 두 가지 OSA 방식 중에 효과적인 부분만 사용한 새로운 OSA 방식을 수학적 분석과 시뮬레이션을 통해 확장한다. 게다가, 시스템 파라미터의 설정에서 신뢰성 있는 성능을 결정할 것이다.

참고문헌

- [1] 김현성: '인지무선네트워크를 위한 보안 표준화 현황 - IEEE 802.22 WRAN을 중심으로', 한국정보보호학회, 정보보호학회지, 2009. 10, (5), pp. 68-72
- [2] Huang, S., Liu, X., and Ding, Z.: 'Opportunistic spectrum access in cognitive radio networks'. Proc. IEEE INFOCOM 2008, Arizona, USA, 2008
- [3] Zhao, Q., Geirgofer, S., Tong, L., and Sadler, B.M.: 'Opportunistic spectrum access via periodic channel sensing', IEEE Transactions on Signal Processing, 2008, 56, (2), pp. 785-796
- [4] Ross, S.M.: Introduction to Probability Models, Accademic, 2000