

레터논문 (Letter Paper)

방송공학회논문지 제21권 제1호, 2016년 1월 (JBE Vol. 21, No. 1, January 2016)

<http://dx.doi.org/10.5909/JBE.2016.21.1.113>

ISSN 2287-9137 (Online) ISSN 1226-7953 (Print)

스펙트럼 감지 무선 인지 네트워크에서 이차 사용자들의 다중 접속 성능 분석

홍 승 근^{a)†}, 이 재 홍^{a)}

Performance Analysis of Multiple Access for Secondary Users in The Spectrum Sensing Cognitive Radio

Seung Geun Hong^{a)†} and Jae Hong Lee^{a)}

요 약

무선 인지 네트워크(cognitive radio network)는 주파수 사용을 허가받지 않은 이차 사용자들이 일차 사용자의 통신을 방해하지 않으면서 일차 사용자의 주파수를 사용하도록 하는 기술이다. 본 논문에서는 무선 인지 네트워크에서 다수의 이차 사용자(secondary user)가 하나의 일차 사용자(primary user)의 주파수를 사용할 때 이차 사용자들 간의 충돌을 줄이면서 스펙트럼을 사용할 수 있는 다중 접속(multiple access)을 제안한다. 다중 접속은 p-persistent와 non-persistent 방법을 이차 사용자 네트워크에 적합하게 변형하여 사용하였다. 각 다중 접속 방식에 대해서 전체 이차 사용자의 처리율(throughput)을 수식으로 유도하였고, 이를 몬테카를로(Monte Carlo) 모의실험을 통해 검증하였다. 모의실험 결과 채널 접속 확률 및 최대 대기 프레임 숫자를 적절하게 잡아야 처리율이 최대가 됨을 확인하였다.

Abstract

Cognitive radio network technology is that secondary (unlicensed) users use the spectrum of primary (licensed) users without interfering primary communication. In this paper, we propose multiple access scheme for a cognitive radio network, where multiple secondary users access spectrum of one primary user. We consider two types of multiple access scheme, one is p-persistent and one is non-persistent, and apply these two schemes in the secondary network. For each multiple access scheme, total throughput of secondary network is derived and verified by Monte Carlo simulation. Simulation results show that maximum total throughput of the secondary network is achieved when channel access probability or the number of maximum waiting frames is chosen appropriately.

Keyword : cognitive radio, spectrum sensing, multiple access, CSMA, p-persistent, non-persistent

a) 서울대학교 전기정보공학부, 뉴미디어통신공동연구소 (Department of Electrical and Computer Engineering and INMC, Seoul National Univ.)

† Corresponding Author : 홍승근(Seung Geun Hong)

E-mail: hsg403@snu.ac.kr

Tel: +82-2-880-8430

ORCID: <http://orcid.org/0000-0002-9803-8386>

※ 이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부, 교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2009-0083495, 2011-0017437, 2015R1D1A1A01057563).

· Manuscript received November 13, 2015; Revised January, 13, 2016; accepted January, 13, 2016.

1. 서 론

2003년 미국연방통신위원회(FCC : Federal Communications Commission)는 현재 주파수들이 매우 비효율적으로 사용된다고 발표하였다^[1]. 이러한 주파수를 효율적으로 사용하기 위해 무선 인지 네트워크(cognitive radio network)가 소개되었다^{[2][4]}. 스펙트럼 감지(spectrum sensing) 무선 인지 네트워크에서는 주파수 사용을 허가받지 않은 이차

사용자(secondary user)가 주파수 사용이 허가된 일차 사용자(primary user)의 신호를 감지하여 일차 사용자가 주파수를 사용하지 않는다고 판단하면 그 때 해당 주파수를 사용하는 방법이다.

기존에는 협력 스펙트럼 감지(cooperative spectrum sensing)에 대한 연구가 주를 이루었는데^[54], 이차 사용자간 협력을 하지 않는 경우는 고려하지 않았고, 이 경우 이차 사용자 간의 충돌이 발생할 수 있는 문제점이 있다. 이러한 충돌을 줄이기 위해서는 이차 사용자 네트워크에서 다중 접속(multiple access)을 통하여 주파수를 사용하여야 한다. 본 논문에서는 충돌을 피하기 위한 기법으로 CSMA(carrier sense multiple access) 방법 중 하나인 p -persistent 방법과 non-persistent 방법을 이차 사용자 네트워크에 적용하고 그때의 전체 이차 사용자 처리율(throughput)을 분석할 것이다.

논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 시스템 모델을 설명하고, 3장에서는 이차 사용자들의 전송 확률 및 처리율을 분석한다. 4장에서는 모의실험을 통하여 분석된 결과를 검증하고 마지막 5장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델

본 논문은 하나의 일차 송신기-수신기 쌍, PT-PR 과 N 개의 이차 송신기 수신기 쌍, ST_n-SR_n , $n=1,2,\dots,N$, 으로 이루어진 스펙트럼 감지 무선 인지 네트워크를 고려한다.

본 모델에서는 블록 페이딩(block fading)을 가정하고 ST_n 과 SR_l , $n=1,2,\dots,N$, $l=1,2,\dots,N$, 사이의 채널 계수 h_{nl} 은 평균이 0이고 분산이 σ_n^2 인 복소 가우시안 확률 변수를 따른다고 가정한다^[8].

일차 사용자 네트워크와 이차 사용자 네트워크의 프레임 길이는 모두 T 이고 이때 두 네트워크가 동기화되어 있다고 가정한다^[9]. 이차 사용자의 프레임은 감지 구간과 전송 구간으로 이루어진다. 스펙트럼을 한번 감지하는 데에는 τ 시간을 소요하며 이때 시간이 충분히 길어 에러가 없는 완벽한 스펙트럼 감지(perfect spectrum sensing)를 가정한다.

이차 사용자 네트워크에서는 다중 접속 기법을 사용하여 이차 사용자간의 충돌을 피하도록 한다. 본 모델에서는 CSMA 방법 중 p -persistent 방법과 non-persistent 방법을

이차 사용자 네트워크에 적용하여 충돌을 피하도록 한다.

1. p -persistent

p -persistent를 적용하면 다음과 같은 방법으로 스펙트럼을 사용한다. ST_n 은 스펙트럼을 감지하여 채널이 사용 중이면 해당 프레임에서는 데이터를 보내지 않고 다음 프레임까지 기다리고 비어 있으면 p 의 확률로 데이터를 전송하고 $1-p$ 의 확률로 다시 스펙트럼을 감지한다. ST_n 은 각 프레임에서 데이터를 전송하거나 다음 프레임까지 대기할 것으로 결정 할 때까지 스펙트럼을 계속 감지한다.

2. Non-persistent

Non-persistent를 적용하면 다음과 같은 방법으로 스펙트럼을 사용한다. ST_n 은 스펙트럼 감지하여 채널이 사용 중이면 해당 프레임에서는 데이터를 보내지 않고 비어있으면 해당 프레임에서 데이터를 전송한다. 해당 프레임이 끝나면 임의의 시간동안 스펙트럼 감지를 하지 않고 대기를 한 후, 그 이후에 다시 같은 방법으로 스펙트럼을 사용하도록 한다.

III. 전송 확률 및 처리율(throughput) 분석

1. 이차 사용자의 처리율

ST_n 의 데이터 전송 상태를 나타내는 변수 $I_n \in \{0,1\}$ 을 정의하자. ST_n 이 데이터를 전송하지 않으면 $I_n=0$, 데이터를 전송하면 $I_n=1$ 로 나타낸다. ST_n 이 데이터를 전송할 때 SR_n 의 수신 신호는 다음과 같이 주어진다.

$$y_n = h_{nn}x_n + \sum_{\substack{l=1 \\ l \neq n}}^N h_{nl}x_l I_l + w_n. \quad (1)$$

이때 x_n 은 전력이 P_{ST_n} 인 ST_n 의 전송신호이고 w_n 은 평균이 0이고 분산이 N_0 인 백색 가우시안 잡음(AWGN : additive white Gaussian noise)이다. ST_n 의 감지 구간의 길이를 τ_n 으로 두면 전송 구간의 길이는 $T-\tau_n$ 이 되고 이때 ST_n 의 처리율은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \eta_n &= \left(\frac{T - \tau_n}{T} \right) \log_2(1 + \gamma_n) \\ &= \left(\frac{T - \tau_n}{T} \right) \log_2 \left(1 + \frac{P_{ST_n} |h_{nm}|^2}{\sum_{\substack{l=1 \\ l \neq n}}^N P_{ST_l} |h_{ln}|^2 I_l + N_0} \right). \end{aligned} \quad (2)$$

여기서 γ_n 은 ST_n 의 SINR(signal-to-interference-plus-noise ratio)이다.

2. p -persistent

해당 프레임이 비어있을 때 N 명의 이차 사용자들이 한번 스펙트럼을 감지한 후 모두 전송을 하지 않을 확률은 $(1-p)^N$ 로 주어지게 되므로 모든 이차 사용자가 $m-1$ 번 스펙트럼을 감지하는 동안은 데이터를 전송하지 않고 m 번째 스펙트럼 감지 후에 n 명의 이차 사용자가 동시에 데이터를 전송할 확률은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} P_{n,m}^p &= \{(1-p)^N\}^{(m-1)} \binom{N}{n} p^n (1-p)^{N-n} \\ &= \binom{N}{n} p^n (1-p)^{Nm-n}. \end{aligned} \quad (3)$$

이차 사용자가 m 번 스펙트럼을 감지하면 감지 구간의 길이는 $\tau_n = m\tau$ 가 된다. 최대 $\lfloor T/\tau \rfloor$ 번 스펙트럼을 감지할 수 있으므로 m 번째 스펙트럼 감지 후 데이터를 전송하는 n 명의 이차 사용자의 집합을 $U_{n,m}$ 으로 두었을 때, 전체 이차 사용자의 처리율은 아래 수식 (4)와 같다.

3. Non-persistent

Non-persistent를 사용하는 하나의 이차 사용자를 생각하자. 이때 최대 대기할 프레임의 숫자는 M 으로 정해둔다. 이차 사용자가 처음으로 스펙트럼을 감지하는 프레임은 0번으로 두고 m 번째 프레임에서 스펙트럼을 감지할 확률을

p_m 으로 두자. 이차 사용자는 m 번째 프레임에서 스펙트럼 감지를 하면 그 이후 M 이하의 자연수 m' 을 임의로 선택하여 $m+m'$ 번째 프레임에서 다시 스펙트럼을 감지한다. 각 프레임에서 스펙트럼을 감지할 확률은 마르코프 사슬(Markov chain)을 이용하면 다음과 같이 구할 수 있다.

$$p_m = \begin{cases} 1, & m = 0, \\ \frac{1}{M}(p_0 + p_1 + \dots + p_{m-1}), & 0 < m \leq M, \\ \frac{1}{M}(p_{m-M} + p_{m-M+1} + \dots + p_{m-1}), & m > M. \end{cases} \quad (5)$$

여기서 p_i 을 1부터 m 까지 더하면 다음을 얻는다.

$$\sum_{i=1}^m p_i = p_0 + \sum_{i=1}^{m-M} p_i + \sum_{i=m-M+1}^{m-1} \frac{m-i}{M} p_i \quad (6)$$

또한 non-persistent 프로세스를 계속 진행하게 되면 각 프레임에서 스펙트럼을 감지할 확률은 수렴하게 되므로 이것을 $\lim_{m \rightarrow \infty} p_m = p'$ 라 두고 (6)을 풀면 다음과 같은 결과를 얻는다.

$$p' = \frac{2}{M+1}. \quad (7)$$

(7)을 이용하면 비어있는 프레임에서 N 명의 이차 사용자 중 n 명의 이차 사용자가 데이터를 전송할 확률은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_n^N &= \binom{N}{n} p'^n (1-p')^{N-n} \\ &= \binom{N}{n} \left(\frac{2}{M+1} \right)^n \left(\frac{M-1}{M+1} \right)^{N-n}. \end{aligned} \quad (8)$$

임의의 비어있는 프레임에서 데이터를 전송하는 n 명의 이차 사용자의 집합을 U_n 으로 두었을 때, 전체 이차 사용자의 처리율은 다음 페이지 위 수식 (9)와 같다.

$$\begin{aligned} \eta_p &= \sum_{m=1}^{\lfloor T/\tau \rfloor} \sum_{n=1}^N P_{n,m}^p \sum_{i \in U_{n,m}} \eta_i \\ &= \sum_{m=1}^{\lfloor T/\tau \rfloor} \sum_{n=1}^N \binom{N}{n} p^n (1-p)^{Nm-n} \sum_{i \in U_{n,m}} \left(\frac{T - m\tau}{T} \right) \log_2 \left(1 + \frac{P_{ST_i} |h_{ii}|^2}{\sum_{\substack{j \in U_{n,m} \\ j \neq i}}^N P_{ST_j} |h_{ji}|^2 + N_0} \right). \end{aligned} \quad (9)$$

$$\eta_N = \sum_1^N \binom{M}{n} \left(\frac{2}{M+1} \right)^n \left(\frac{M-1}{M+1} \right)^{N-n} \sum_{i \in U_n} \left(\frac{T-\tau}{T} \right) \log_2 \left(1 + \frac{P_{ST_i} |h_{ii}|^2}{\sum_{j \in U_n \setminus ST_j} P_{ST_j} |h_{ji}|^2 + N_0} \right) \quad (9)$$

IV. 모의실험

모의실험에서는 이차 사용자의 수 $N=4$ 로 설정하였고 채널과 잡음의 분산을 각각 $\sigma_h^2 = 1$ 과 $N_0 = 0.1$ 로 가정하였다. 이차 사용자의 전송 전력은 20dB로 설정하였다.

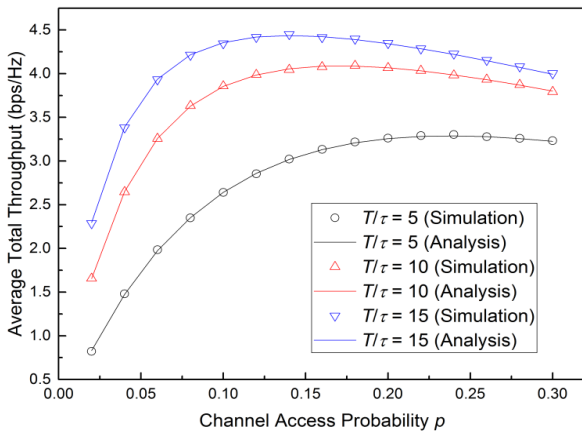


그림 1. p -persistent 방법에서 채널 접속 확률 p 에 따른 전체 처리율의 평균값
Fig. 1. In p -persistent scheme, average total throughput versus channel access probability p

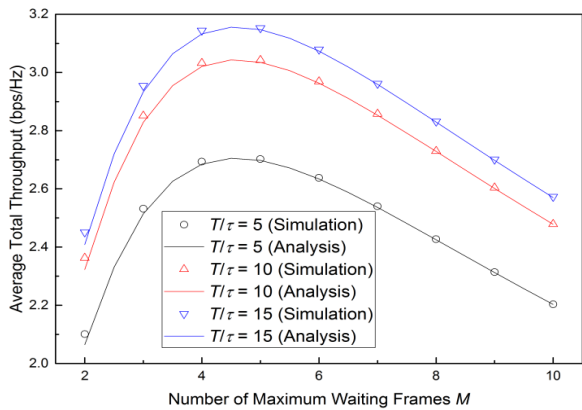


그림 2. Non-persistent 방법에서 최대 대기하는 프레임 수 M 따른 전체 처리율의 평균값
Fig. 2. In non-persistent scheme, average total throughput versus number of maximum waiting frames M

그림 1과 그림 2는 모두 몬테카를로(Monte Carlo) 방법을 이용하여 모의실험 결과(simulation)를 얻고 분석 결과(analysis)와 비교한 것으로, 각각 p -persistent 방법과 non-persistent 방법을 적용하였을 때의 이차 사용자 전체 처리율의 평균을 나타낸다. 그래프를 보면 분석한 결과가 모의실험 결과와 잘 맞음을 확인할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 스펙트럼 감지 무선 인지 네트워크에서 이차 사용자들이 다중접속을 통하여 주파수를 사용할 때의 성능을 분석하였다. p -persistent 방법과 non-persistent 방법을 제안하고 이에 대해 이차 사용자의 처리율을 구하였고 모의실험을 통해 분석된 처리율이 정확함을 확인하였다.

참고 문헌 (References)

- [1] "Spectrum policy task force," Federal Communications Commission (FCC), ET Docket No. 02-135, Tech. Rep., Nov. 2002.
- [2] J. Mitola and G. Q. Maguire, "Cognitive radio: making software radios more personal," IEEE Personal Commun., vol. 6, pp. 13-18, 1999.
- [3] S. Haykin, "Cognitive radio: brain-empowered wireless communications," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 23, no. 2, pp. 201-220, 2005.
- [4] I. F. Akyildiz, W. Y. Lee, M. C. Vuran, and S. Mohanty, "NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: a survey," Computer Netw., vol. 50, pp. 2127-2159, 2006.
- [5] G. Ganesan and Y. G. Li, "Cooperative spectrum sensing in cognitive radio-part I: two user networks," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 6, pp. 2204-2213, June 2007.
- [6] C. Jang and J. H. Lee, "Sum of discrete IID random variables and its application to cooperative spectrum sensing," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 62, no. 3, pp. 1383-1389, Mar. 2013.
- [7] D.-J. Lee, "Adaptive random access for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks," IEEE Trans. Wireless Commun., vol. 14, no. 2, pp. 831-840, Feb. 2015.
- [8] G. Kramer, M. Gastpar, and P. Gupta, "Cooperative strategies and capacity theorems for relay networks," IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 51, no. 9, pp. 3037-3063, Sept. 2005.
- [9] T. Yücek and H. Arslan, "A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications," IEEE Commun. Surveys and Tutorial, vol. 11, no. 1, pp. 116-130, Mar. 2009.