임베디드 마르코프 체인을 이용한 동적 스펙트럼 접속 방식의 성능 분석

이윤탈*

Performance of Dynamic Spectrum Access Scheme Using Embedded Markov Chain

Yutae Lee*

Department of Information and Communication Engineering, Dongeui University, Busan 614-714, Korea

요 약

본 논문은 동일한 확률적 특성을 갖는 두 개의 독립된 채널이 있는 환경에서 동적 스펙트럼 접속 방식의 성능을 수학적으로 분석한다. 여기서 고려하는 동적 스펙트럼 접속 방식은 다음과 같다. 첫 번째 방식은 전송에 성공한 경우 동일한 채널을 다시 센싱하고, 실패한 경우 다른 채널을 센싱하는 방식이다. 두 번째 방식은 전송에 실패한 경우 동일한 채널을 다시 센싱하고, 성공한 경우 다른 채널을 센싱하는 방식이다. 본 논문은 두 번째 방식에서 이차 사용자의 시스템 처리율과 일차 사용자와의 겹침 확률을 3차원 임베디드 마르코프 체인을 이용하여 수학적으로 분석한다. 또한, 두 방식의 성능을 수학적 분석과 시뮬레이션을 통해 비교한다.

ABSTRACT

In this paper, we consider two dynamic spectrum access schemes in cognitive network with two independent and identically distributed channels. Under the first scheme, secondary users switch channel only after transmission failure. On the other hand, under the second one, they switch channel only after successful transmission. We develop a mathematical model to investigate the performance of the second one and analyze the model using 3-dimensional embedded Markov chain. Numerical results and simulations are presented to compare between the two schemes.

키워드 : 동적 스펙트럼 접속, 임베디드 마르코프 체인, 성능 분석, 인지 무선망

Key word : Dynamic Spectrum Access, Embedded Markov Chain, Performance Evaluation, Cognitive Network

접수일자 : 2013. 04. 10 심사완료일자 : 2013. 08. 20 게재확정일자 : 2013. 09. 02

* Corresponding Author Yutae Lee(E-mail:ylee@deu.ac.kr, Tel:+82-51-890-1682)

Department of Information and Communication Engineering, Dongeui University, Busan 614-714, Korea

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2013.17.9.2036>

print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

©This is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0/>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright © The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

I. 서 론

무선통신에 대한 수요가 증가함에 따라 주파수 자원의 부족 문제가 크게 대두되고 있다[1]. 주파수 부족 문제를 해결할 수 있는 기술로써 인지 무선망에 대한 관심이 증가하고 있다[2, 3]. 이러한 인지 무선망을 실현하기 위해서는 효율적인 동적 스펙트럼 접속 기술의 개발이 선행되어야 한다.

논문[4]와 논문[5]는 부분적으로 관찰 가능한 마르코프 결정 과정을 이용하여 동적 스펙트럼 접속 방식을 제안하였다. 이 방식은 주어진 환경에서 목표로 하는 성능을 최대로 보장하는 반면, 스펙트럼 센싱 기능을 복잡하게 한다. 스펙트럼 센싱 기능을 간단하게 하기 위한 방법으로 Zhao 등은 주기적 채널 센싱 방식을 도입했다[6]. Huang 등은 극단적인 두 방식인 랜덤한 센싱 방식과 모든 채널을 센싱하는 방식을 다루었다[7]. Zhao 등은 슬롯 모드에서 동작하는 myopic 방식을 제안하였다[8, 9]. Lee는 myopic 방식에서 이차 사용자간의 충돌을 줄일 수 있는 myopic/CA 방식을 제안하였다[10].

Lee는 비 슬롯 모드에서 동작하는 두 개의 채널이 있는 경우 이차 사용자가 전송을 성공하면 계속해서 동일한 채널을 센싱하는 방식을 제안하고 성능을 분석하였다[11]. 이 방식은 슬롯 모드의 myopic 방식이 positively correlated한 채널 환경에서 동작하는 방식과 유사하다. Lee는 myopic 방식이 negatively correlated한 채널 환경에서 동작하는 방식과 유사한 방식을 추가로 제안하여 시뮬레이션을 통해 분석하였다[12]. 이 방식은 이차 사용자가 전송에 실패하면 동일한 채널을 센싱하고 성공하면 다른 채널을 선택하는 방식이다[12].

본 논문에서는 논문[11]에서의 분석 방법을 사용하여, 논문[12]에서 추가로 제안한 방식의 성능을 독립적이고 동일한 확률적 특성을 갖는 두 개의 채널이 있는 환경에서 수학적으로 분석한다. 3차원 임베디드 마르코프 체인으로 모형화하고, 이 모형을 분석하여 이차 사용자의 시스템 처리율과 일차 사용자와의 겹침 확률을 계산한다. 또한 본 논문에서 고려하는 방식과 논문[11]에서 제안한 방식을 수학적 분석 및 시뮬레이션을 통해 비교한다.

II. 본 론

본 논문에서는 논문[12]에서 제안한 동적 스펙트럼 접속 방식의 성능을 수학적으로 분석하고, 논문[11]에서 제안한 방식의 성능과 비교하고자 한다. 이를 위해 먼저 두 가지 동적 스펙트럼 접속 방식의 동작 원리를 요약한다.

각각의 이차 사용자는 전송할 패킷이 있는 경우 채널 중 하나를 센싱하여 그 채널이 사용되고 있지 않은 것으로 판단되면 패킷을 전송한다[11, 12]. 패킷 전송을 완료한 후에는 전송의 성공과 실패에 관계없이 랜덤한 길이의 백오프 기간을 갖는다. 센싱한 채널이 사용 중인 것으로 판단되면 랜덤한 길이의 freezing 기간을 갖는다[11, 12]. 이와 같은 백오프 또는 freezing 기간 후에 이차 사용자는 센싱할 채널을 다시 선택하게 된다. 이때의 채널을 선택하는 방법에 따라 논문[11]과 논문[12]에서 제안한 두 가지 방식으로 구분할 수 있다. 두 개의 채널이 존재하는 경우 두 방식을 구분하여 설명하면 다음과 같다.

- 방식 1[11] : 이차 사용자가 어떤 채널에서 패킷 전송을 성공적으로 완료했다면, 랜덤한 백오프 기간 후에 동일한 채널을 센싱한다. 반면에 패킷을 전송했으나 실패하게 되면, 랜덤한 백오프 기간 후에 다른 채널을 센싱한다. 또한, 이차 사용자가 센싱한 채널이 일차 사용자나 다른 이차 사용자에 의해 이미 점유되어 있는 것으로 센싱되어 해당 채널에서 전송을 시도하지 못했다면 랜덤한 freezing 기간 후에 다른 채널을 센싱한다.
- 방식 2[12] : 이차 사용자가 어떤 채널에서 패킷을 성공적으로 전송했다면, 랜덤한 백오프 기간 후에 다른 채널을 센싱한다. 반면에 패킷을 전송했으나 실패하게 되면, 랜덤한 백오프 기간 후에 동일한 채널을 센싱한다. 또한, 이차 사용자가 센싱한 채널이 일차 사용자나 다른 이차 사용자에 의해 이미 점유되어 있는 것으로 센싱되어 해당 채널에서 전송을 시도하지 못했다면 랜덤한 freezing 기간 후에 동일한 채널을 센싱한다.

III. 수학적 분석

본 논문에서는 동일한 확률적 특성을 갖는 두 개의 독립된 채널이 있는 환경에서 방식 2를 분석한다. 채널이 일차 사용자에게 의해 점유되어 있지 않는 연속된 기간 I 와 연속적으로 점유되어 있는 기간 B 가 각각 처리율이 λ 와 μ 인 지수 분포를 따른다면, 일차 사용자에게 의한 채널 i 의 점유 여부는 두 상태 0(점유)와 1(미점유)를 갖는 마르코프 체인 $\{X_i(t)\}$ 으로 모형화할 수 있다.

수학적 분석과 관련하여, 논문[7]에서는 극단적인 두 방식인 랜덤한 센싱 방식과 모든 채널을 센싱하는 방식을 논문[13]에서 주어진 확률 모형을 사용하여 각각 수학적으로 분석하였으며, 논문[11]에서는 임베디드 마르코프 체인을 이용하여 방식 1을 분석하였다. 본 절에서는 논문[11]에서의 분석 방법을 사용하여 방식 2를 수학적으로 분석한다. 수학적 분석을 위해 논문[7, 11]에서 가정된 것과 같이, 본 분석에서도 이차 사용자는 포화 트래픽 환경에서 한 번에 하나의 채널만 센싱하고, 센싱은 즉각적으로 이루어지며 오류는 없다고 가정한다.

이차 사용자가 채널을 센싱하는 시점을 임베디드 마르코프 체인의 임베디드 시점으로 정한다. $S(t_k)$ 를 k 번째 임베디드 시점 t_k 에서 센싱할 채널이라고 하면 확률과정 $\{X_1(t_k), X_2(t_k), S(t_k)\}$ 은 마르코프 체인이 된다. 확률과정 $\{X_i(t)\}$ 의 상태 천이 확률 함수를 $q_{jm}(t) \equiv P(X_i(t) = m | X_i(0) = j)$ 라 하면[13], 마르코프 체인 $\{X_1(t_k), X_2(t_k), S(t_k)\}$ 의 상태 (i, j, q) 에서 상태 (l, m, r) 로의 상태 천이 확률 $p_{(i,j,q),(l,m,r)}$ 는 다음과 같다.

$$p_{(0,j,1),(l,m,1)} = \int_0^\infty q_{0l}(t)q_{jm}(t)dF_G(t) \quad (1)$$

$$p_{(0,j,1),(l,m,1)} = \int_0^\infty q_{0l}(t)q_{jm}(t)dF_G(t) \quad (2)$$

$$p_{(0,j,1),(l,m,2)} = 0 \quad (3)$$

$$p_{(i,0,2),(l,m,1)} = 0 \quad (4)$$

$$p_{(1,j,1),(l,m,1)} = \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^t \lambda e^{-\lambda x} \times q_{0l}(t-x+h)q_{jm}(t+h)dx dF_T(t)dF_H(h) \quad (5)$$

$$p_{(i,1,2),(l,m,2)} = \int_0^\infty \int_0^\infty \int_0^t \lambda e^{-\lambda x} \times q_{il}(t+h)q_{0m}(t-x+h)dx dF_T(t)dF_H(h) \quad (6)$$

$$p_{(1,j,1),(l,m,2)} = \int_0^\infty \int_0^\infty e^{-\lambda t} \times q_{il}(h)q_{jm}(t+h)dF_T(t)dF_H(h) \quad (7)$$

$$p_{(i,1,2),(l,m,1)} = \int_0^\infty \int_0^\infty e^{-\lambda t} \times q_{il}(t+h)q_{lm}(h)dF_T(t)dF_H(h) \quad (8)$$

여기서 확률변수 T 는 패킷의 전송 시간을 나타내고, 확률변수 G 와 H 는 각각 freezing 기간과 백오프 기간을 나타낸다. 마르코프 체인 $\{X_1(t_k), X_2(t_k), S(t_k)\}$ 의 한 단계 천이 확률 행렬을 P 라 하면, 정상 상태의 확률

$$\pi_{ijq} \equiv \lim_{k \rightarrow \infty} P(X_1(t_k) = i, X_2(t_k) = j, S(t_k) = q) \quad (9)$$

는

$$\pi = \pi P, \pi e = 1 \quad (10)$$

로부터 계산할 수 있다[13]. 여기서 $\pi = (\pi_{ijq})$ 이고 e 는 모든 성분이 1인 열벡터이다.

포화 트래픽 환경에서 이차 사용자의 시스템 처리율 U 를 이차 사용자가 패킷을 충돌 없이 성공적으로 전송하는 시간의 비율이라고 정의하면

$$U = \frac{\pi_{idle} \int_0^\infty t e^{-\lambda t} dF_T(t)}{E(G) + \pi_{idle} E(T + H - G)} \quad (11)$$

이다[11]. 여기서 π_{idle} 은 이차 사용자가 일차 사용자에게 의해 점유되어 있지 않고 비어 있는 채널을 센싱할 확률로 $\pi_{101} + \pi_{111} + \pi_{012} + \pi_{112}$ 와 같다. 또한 겹침 확률 P_C 를 일차 사용자의 전송이 이차 사용자에게 의해 간섭을 받는 시간의 비율이라고 정의하면

$$P_C = \frac{1}{2} \frac{\lambda + \mu}{\lambda} \frac{E(\min(T - I, B)1_{T > I})}{(1 - \pi_{idle})E(G) + \pi_{idle}E(T + H)} \quad (12)$$

이다[11].

IV. 수치 해석

본 논문에서는 수치 해석을 위해 $\lambda = 0.5$, $\mu = 1.0$ 인 경우와 $\lambda = 1.0$, $\mu = 2.0$ 인 두 가지 경우를 다룬다. 두 경우 모두 채널이 일차 사용자에게 의해 점유되어 있지 않을 확률은 $\frac{2}{3}$ 로 동일하다[7]. 이차 사용자는 전송할 패킷이 항상 존재하는 포화 트래픽 환경을 가정한다. 또한 센싱 결과를 즉시 알 수 있으며, 그 결과에 오류가 없다고 가정한다. 따라서 충돌은 전송 중인 이차 사용자와 새로 도착하는 일차 사용자 사이에서만 발생하게 된다. 이차 사용자 패킷을 전송하는 데 걸리는 시간 T 는 지수 분포를 따르는 것으로 모형화 한다. 랜덤한 freezing 시간 G 는 패킷 전송 시간 T 와 같은 분포를 따르고, 백오프 시간 H 는 평균이 0.1인 지수 분포를 따른다고 가정한다.

그림 1. 평균 패킷 전송 시간에 따른 겹침 확률
Fig. 1 Overlapping probability against $E(T)$

그림 1과 2는 각각 일차 사용자와 이차 사용자가 동일한 채널에서 겹쳐 있는 기간의 비율인 겹침 확률과 이차 사용자의 시스템 처리율을 패킷의 평균 전송 시간에 대한 함수로 나타낸 것이다. 이러한 환경에서 방식 2가 방식 1에 비해 시스템 처리율에 있어서는 낮은 성능이 보이나, 일차 사용자에게 대한 간섭을 많이 줄일 수 있다는 것을 알 수 있다.

그림 2. 평균 패킷 전송 시간에 따른 처리율
Fig. 2 Saturation throughput against $E(T)$

V. 결론

본 논문은 동일한 확률적 특성을 갖는 두 개의 독립된 채널이 있는 환경에서 두 가지 동적 스펙트럼 접근 방식의 성능을 수학적으로 고려하였다. 첫 번째 방식은 전송에 성공한 경우 동일한 채널을 다시 센싱하고, 실패한 경우 다른 채널을 센싱하는 방식이다. 두 번째 방식은 전송에 실패한 경우 동일한 채널을 다시 센싱하고, 성공한 경우 다른 채널을 센싱하는 방식이다. 본 논문은 두 번째 방식에서 이차 사용자의 시스템 처리율과 일차 사용자와의 겹침 확률을 3차원 임베디드 마르코프 체인을 이용하여 수학적으로 계산하였다. 수학적 분석과 시뮬레이션을 통해 비교한 결과, 본 논문의 실험 환경에서 두 번째 방식이 첫 번째에 비해 시스템 처리율에 있어서는 낮은 성능을 보이나, 일차 사용자에게 대한 간섭을 많이 줄일 수 있다는 것을 알 수 있다.

감사의 글

이 논문은 2013년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(NRF-2013R1A1A4A01013094)

REFERENCES

- [1] S. M. Huh, J. H. Choi, S. J. Yu, Y. E. Chang, G. S. Chung, and G. E. Lee, "Policy-based cognitive radio network management technology," *Information and Communications Magazine*, vol. 30, no. 1, pp. 58-66, Jan. 2013.
- [2] Y. Lee and Y. J. Lee, "Modelling and analysis of non-saturated opportunistic spectrum access networks," *Electronics Letters*, vol. 47, no. 15, pp. 883-884, Jul. 2011.
- [3] G. Xiang, J. Lee, and H. Park, "Cooperative node selection for the cognitive radio networks," *The Journal of the Korean Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 17, no. 2, pp. 287-293, Feb. 2013.
- [4] Q. Zhao, L. Tong, A. Swami, and Y. Chen, "Decentralized cognitive MAC for opportunistic spectrum access in ad hoc networks: a POMDP framework," *IEEE Journal in Selected Areas in Communications*, vol. 25, no. 3, pp. 589-600, Apr. 2007.
- [5] Y. Lee, "Opportunistic spectrum access in cognitive networks," *Electronics Letters*, vol. 44, no. 17, pp. 1022-1024, Aug. 2008.
- [6] Q. Zhao, S. Geirhofer, L. Tong, B. Sadler, "Opportunistic spectrum access via periodic channel sensing," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 55, no. 2, pp. 785-796, Feb. 2008.
- [7] S. Huang, X. Liu, and Z. Ding, "Opportunistic spectrum access in cognitive radio networks," in *Proceeding of the 27th Conference on Computer Communications: IEEE INFOCOM 2008*, Phoenix: AZ, pp. 1-6, 2008.
- [8] Q. Zhao, B. Krishnamachari, and K. Liu, "On myopic sensing for multi-channel opportunistic access: structure, optimality, and performance," *IEEE Transactions on Wireless Communications*, vol. 7, no. 12, pp. 5431-5440, Feb. 2008.
- [9] S. H. Ahmad, M. Liu, T. Javaid, Q. Zhao, and B. Krishnamachari, "Optimality of myopic sensing in multichannel opportunistic access," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 55, no. 9, pp. 4040-4050, Sep. 2009.
- [10] Y. Lee, "Modified myopic policy with collision avoidance for opportunistic spectrum access," *Electronics Letters*, vol. 46, no. 12, pp. 871-872, Jun. 2010.
- [11] Y. Lee, "Opportunistic spectrum access in unslotted primary networks," *IEICE Transactions on Communications*, vol. E93B, no. 11, pp. 3141-3143, Nov. 2010.
- [12] Y. Lee, "Performance comparison of opportunistic spectrum access schemes in non-slotted cognitive radio networks through simulation research," *The Journal of the Korean Institute of Information and Communication Engineering*, vol. 17, no. 6, pp. 1318-1323, Jun. 2013.
- [13] S. M. Ross, *Introduction to Probability Models*, 10th ed.: Academic Press, 2009.

이유태(Yutae Lee)

2001년 3월-현재 동의대학교 정보통신공학과 교수

1998년 3월-2001년 2월 한국전자통신연구원 선임연구원

1997년 8월 한국과학기술원 수학과 이학박사

※ 관심분야 : 통신망 perfromability 분석, 복잡계 분석, 동적 스펙트럼 접속