

논문 2010-6-2

주·부사용자 Queue가 있는 기회적 인지 전파망의 Markov Chain 분석

Markov Chain Analysis of Opportunistic Cognitive Radio with Primary and Secondary User's Queue

안홍영*

Hong-Young Ahn

요 약 인지전파 기술은 지역과 시간에 따라 일시적으로 사용하지 않는 주파수 대역을 자동으로 인지하고 찾아서 환경에 맞게 통신방식, 주파수 대역폭 등을 능동적으로 판단하여 통신함으로써 한정적인 주파수 자원을 효율적으로 사용하고자 하는 기술이다. 본 논문에서는 오검출과 오경보의 불완전한 센싱 환경하의 인지 전파망에서 주사용자나 부사용자의 세션 큐가 스펙트럼 사용효율에 어떤 영향을 미치는 지를 연속시간 마르코프 체인 분석을 통하여 정량적으로 규명하였다. 큐가 있을 경우 주 사용자는 최대 18% 까지, 부 사용자는 최대 50% 까지 스펙트럼 사용 효율을 높일 수 있었다.

Abstract Cognitive radio is a technology, which automatically recognizes and searches for temporally and spatially unused frequency spectrum, then actively determines the communication method, bandwidth, etc. according to the environment, thus utilizing the limited spectrum resources efficiently. In this paper, with the imperfect sensing of misdetection and false alarm, we quantitatively investigate the effects of primary and secondary user's queue on the primary and secondary users' spectrum usage through the analysis of continuous time Markov Chain. With the queue primary user's spectrum usage improved up to 18%, and the secondary user's spectrum usage improved up to 50%.

Key Words : 기회적 인지전파망, 연속시간 마르코프 체인, 큐, 제공 부하, 시스템 성능

I. 서 론

언제 어디서나 고속, 광대역 멀티미디어 무선 서비스를 받고자 하는 사용자들이 늘어남에 따라, 한정된 주파수 자원에 대한 수요는 앞으로 계속 증가하리라 예상된다. 동적 주파수할당(DSA)을 가능하게 하는 인지전파(CR) 기술은 지역과 시간에 따라 일시적으로 사용하지 않는 주파수 대역을 자동으로 인지하고 찾아서 환경에 맞게 통신방식, 주파수 대역폭 등을 능동적으로 판단하

여 통신함으로써 한정적인 주파수 자원을 효율적으로 사용하고자 하는 기술이다. 부사용자들이 주사용자들의 스펙트럼을 기회적으로 이용하기 위해서는 동적이고 효율적인 스펙트럼 관리가 필수적이다. 부사용들은 스펙트럼 센싱, 결정, 공유, 이동의 인지전파 기능을 갖추어야 한다. 제한된 스펙트럼 자원을 완전히 활용하기 위해서는 이중일수도 있는 부사용자들이 스펙트럼을 공정하고 효율적으로 공유하는 것이 중요한 문제가 된다.

Xing^[3] 등은 개방 스펙트럼 무선망에서 연속시간 마르코프 체인(CTMC) 분석을 통해 서로 다른 타입의 부사용자들이 airtime 공정성을 제공하는 분산 임의접근 프

*정회원, 홍익대학교 컴퓨터정보통신공학과
접수일자 2010.11.14 수정일자 2010.12.10
게재확정일자 2010.12.15

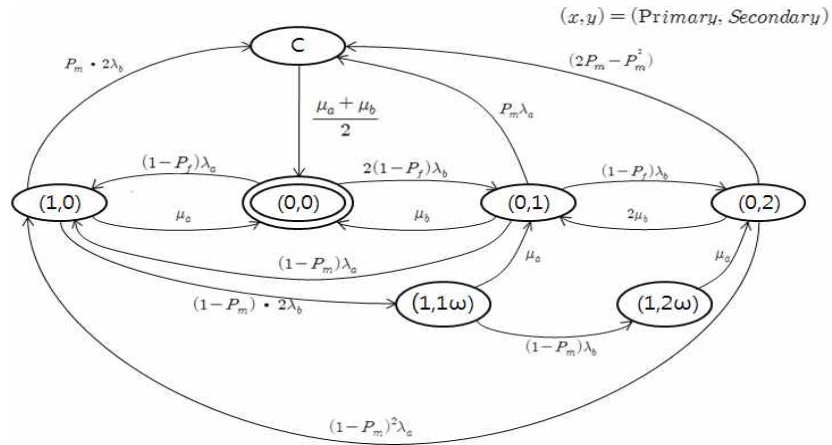


그림 1. 부사용자만 큐가 있는 연속시간 마르코프 체인
 Fig. 1. Continuous Time Markov Chain with Secondary User Queue

로토콜을 제안하였다. Keshavamurphy^[5] 등은 부사용자들의 전파사용 패턴이 블록킹 확률에 미치는 영향을 분석하고 통계적 다중화를 통해 스펙트럼 이용율을 개선하는 방법을 보였다. 또한 Markov적 접근^[4,6,7]을 통해 부사용자들에게 스펙트럼을 할당하고자 하는 많은 연구들이 진행되고 있다. 그러나 위의 모델들은 오류가 없는 완벽한 스펙트럼 센싱을 가정하였다.

본 논문에서는 오검출과 오경보의 불완전한 센싱 환경하의 인지 전파 망에서 주·부사용자의 큐가 스펙트럼 사용에 어떤 영향을 미치는지를 연속시간 마르코프 체인 분석을 통하여 정량적으로 규명하였다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 부사용자만 큐가 있는 인지 전파망의 마르코프 체인과 그 해에 대해, 3장에서는 주·부사용자 모두 세션 큐가 있는 인지 전파망의 마르코프 체인과 그 해에 대해, 4장에서는 제안한 방법의 실험 및 결과에 대해, 5장에서는 결론을 맺는다.

II. 부사용자만 큐가 있는 연속시간 마르코프 체인

서로 다른 타입의 두 전파 시스템이 스펙트럼을 공유하는 다음의 시나리오를 생각해 보자. 주사용자인 A형 시스템은 B형 시스템보다 채널 대역폭이 2배 더 필요하다. 따라서 주사용자가 채널을 사용하지 않으면 2명의 부사용자가 채널을 동시에 사용할 수 있다. B형 시스템은 주 사용자가 사용하지 않는 미사용 채널을 기회적으로 찾아서 이용한다.

본 논문에서는 주·부사용자의 큐의 영향에 집중하기 위해 A형과 B형 시스템이 같은 채널대에서 동작하는 시나리오만 고려한다. 부 사용자는 주 사용자가 채널을 사용 중일 때 도착한 세션은 1개 까지 큐에 보관했다가 주 사용자 세션이 끝나면 기회적으로 세션을 시작한다. 주 사용자는 큐가 없기 때문에 주사용자가 전파 사용중일 때 도착하는 주사용자의 모든 세션 요청은 폐기된다.

두 전파시스템의 사용 패턴(세션)은 두 개의 랜덤과정으로 모델 한다. 도착 세션은 Poisson 랜덤과정이며 도착 간격은 전파 타입 i 에 대해 평균 시간 $\frac{1}{\lambda_i}$ 인 음지수 분포를 가진다. 전파타입 i 의 채널 사용 시간은 평균 $\frac{1}{\mu_i}$ 인 음지수 분포를 가지며 따라서 이탈율 μ_i 인 Poisson 과정이다.

그림 1은 부사용자만 큐가 있는 시스템의 CTMC 모델이다. 그림 1의 상태와 변수들에 대한 설명은 표 1, 2에 있다.

표 1. 마르코프 체인의 상태
 Table 1. Markov Chain state

상태	설명
(1,0)	주 사용자가 채널 사용
(0,0)	채널 미사용 상태
(0,1)	부 사용자 1명이 채널 사용
(0,2)	부 사용자 2명이 채널 사용
(1,1w)	주 사용자가 채널 사용중 부사용자 세션 도착 부사용자 큐에 대기
(1,2w)	주 사용자가 채널 사용중 2명의 부사용자 세션이 각각의 큐에 대기
(c)	센싱 오검출에 의해 세션 충돌이 일어남

표 2. 마르코프 체인 파라미터들
 Table 2. Markov Chain Parameters

변수	설명
λ_a, μ_a	주사용자 세션 도착율, 이탈율
λ_b, μ_b	부사용자 세션 도착율, 이탈율
P_f	오경보 확률(false alarm)
P_m	오검출 확률(misdetection)

$P_{m1} = (1 - P_m)$, $P_{f1} = (1 - P_f)$ 로 하면 그림 1의 Markov Chain에 대한 극미 생성 매트릭스 A는 아래의 식 (2)와 같다. A의 각 행의 합은 0이다. $\Sigma=0$ 항은 행의 나머지 항을 합한것에 -1을 곱한 것이다.

$$A = \begin{bmatrix} \Sigma=0 & \mu_a & 0 & 0 & 2P_{m1}\lambda_b & 0 & 2P_m\lambda_b \\ P_{f1}\lambda_a & \Sigma=0 & 2P_{f1}\lambda_b & 0 & 0 & 0 & 0 \\ P_{m1}\lambda_a & \mu_b & \Sigma=0 & P_{f1}\lambda_b & 0 & 0 & P_m\lambda_a \\ P_{m1}^2\lambda_a & 0 & 2\mu_b & \Sigma=0 & 0 & 0 & (2P_m - P_m^2)\lambda_a \\ 0 & 0 & \mu_a & 0 & \Sigma=0 & P_{m1}\lambda_b & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \mu_a & 0 & -\mu_a & 0 \\ 0 & (\mu_a + \mu_b)/2 & 0 & 0 & 0 & 0 & \Sigma=0 \end{bmatrix} \quad (1)$$

그러면 다음식이 성립한다.

$$\Pi A = 0 \quad (2)$$

A^T의 Null Space의 정규화하지 않은 basis vector의 성분들은 아래의 (3)식으로 주어진다.

$$\begin{aligned} P_1 &= P_{m1}^2(3 - 3P_m + P_m^2), \quad P_2 = -3 + 6P_m - 4P_m^2 + P_m^3 \\ P_3 &= -7 + 12P_m - 6P_m^2 + P_m^3, \\ P_4 &= (\lambda_a^2 + 2(\mu_b^2 + 2\lambda_b\mu_bP_{m1} + \lambda_b^2P_{m1}^2P_{f1}) \\ &\quad + \lambda(3\mu_b - \lambda_b(-3 + 2P_m + P_f))) \text{로 놓으면} \\ S_1 &= -\lambda_a\mu_a(\mu_a + \mu_b)(\lambda_b + \mu_a - \lambda_bP_m)(-1 + P_f)P_4 \\ S_2 &= \mu_a(\mu_a + \mu_b)(-2(2\lambda_b + \mu_a)\mu_b^2(-\lambda_b - \mu_a + \lambda_bP_m) \\ &\quad + \lambda_a^2(\mu_a^2 + \lambda_b\mu_a(1 + 3P_m - 2P_m^2) - 2\lambda_b^2P_mP_2 + \\ &\quad \lambda_a(3\mu_a^2\mu_b + \lambda_b^2(-2\mu_bP_mP_3 - \mu_a(1 + 5P_m - 6P_m^2) \\ &\quad + 2P_m^3)(-1 + P_f)) + 2\lambda_b^3P_mP_2(-1 + P_f) + \\ &\quad \lambda_b\mu_a(\mu_a + \mu_b(5 + 5P_m - 4P_m^2) - \mu_aP_f)) \\ S_3 &= -2\lambda_b\mu_a(\mu_a + \mu_b)(-2(2\lambda_b + \mu_a)\mu_b(-\lambda_b - \mu_a + \\ &\quad \lambda_bP_m) + \lambda_a^2(\mu_a - \mu_aP_m) + \lambda_a(\mu_a(\mu_a - 2\mu_b(-1 + \\ &\quad P_m)) + \lambda_b(-\mu_a(-3 + P_m) + 2\mu_b(-1 + P_m)^2) - \\ &\quad 2\lambda_b^2P_mP_2))(-1 + P_f) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} S_4 &= -2\lambda_b^2\mu_a(\mu_a + \mu_b)(-1 + P_f)(\lambda_a^2(-1 + P_m)^2 + (2\lambda_b \\ &\quad + \mu_a)(-\lambda_b - \mu_a + \lambda_bP_m)(-1 + P_f) - \lambda_a(-1 + \\ &\quad P_m)(\mu_a + \mu_b - \mu_bP_m - \mu_aP_f + \lambda_b(-1 + P_m)(-3 \\ &\quad + 2P_m + P_f))) \\ S_5 &= 2\lambda_a\lambda_b\mu_a(\mu_a + \mu_b)(-1 + P_m)(-1 + P_f)P_4 \\ S_6 &= -2\lambda_a\lambda_b^2(\mu_a + \mu_b)(-1 + P_m)^2(-1 + P_f)P_4 \\ S_7 &= \lambda_a\lambda_b\mu_aP_m(-1 + P_f)(\lambda_a^2(\mu_a(-2 + P_m) + \lambda_bP_2) - \\ &\quad \lambda_a(\mu_a(\mu_a + \mu_b(5 - 2P_m)) + \lambda_b(-\mu_bP_3) + \mu_a(8 + \\ &\quad 3P_m(-2 + P_f) - P_m^2(-1 + P_f) - 3P_f)) + \lambda_b^2P_2 \\ &\quad (-3 + P_f)) - (-\lambda_b - \mu_a + \lambda_bP_m)(-2\mu_b(\mu_a + \mu_b) \\ &\quad + 2\lambda_b^2(3 - 3P_m + P_m^2)(-1 + P_f) + \lambda_b(-2 + P_m) \\ &\quad (\mu_a + 4\mu_b - \mu_aP_f))) \quad (3) \end{aligned}$$

$S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6, S_7$ 들을 정규화하면 정상상태 확률 식 (5)을 얻는다.

$$T = S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5 + S_6 + S_7 \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \Pi_{(1,0)} &= S_1/T, \quad \Pi_{(0,0)} = S_2/T, \quad \Pi_{(0,1)} = S_3/T, \quad \Pi_{(0,2)} = S_4/T \\ \Pi_{(1,1w)} &= S_5/T, \quad \Pi_{(1,2w)} = S_6/T, \quad \Pi_{(c)} = S_7/T \quad (5) \end{aligned}$$

주파수 공유 시스템의 가장 중요한 매트릭중 하나는 평균 airtime이다. airtime은 기준시간(예를 들면 1시간)과 기준시간 동안 전파 사용시간과의 비이며 부사용자 큐만 있는 경우 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} \text{airtime}_{\text{primary}} &= \Pi_{(1,0)} + \Pi_{(1,1w)} + \Pi_{(1,2w)} \\ \text{airtime}_{\text{secondary}} &= \frac{1}{2}\Pi_{(0,1)} + \Pi_{(0,2)} \quad (6) \end{aligned}$$

III. 주·부사용자 모두 큐가 있는 연속시간 마르코프 체인

1. 연속시간 마르코프 체인 모델

그림 2는 주·부사용자 모두 큐가 있는 시스템의 CTMC 모델이다. 새로이 추가된 상태에 대한 설명은 표 3에 있다.

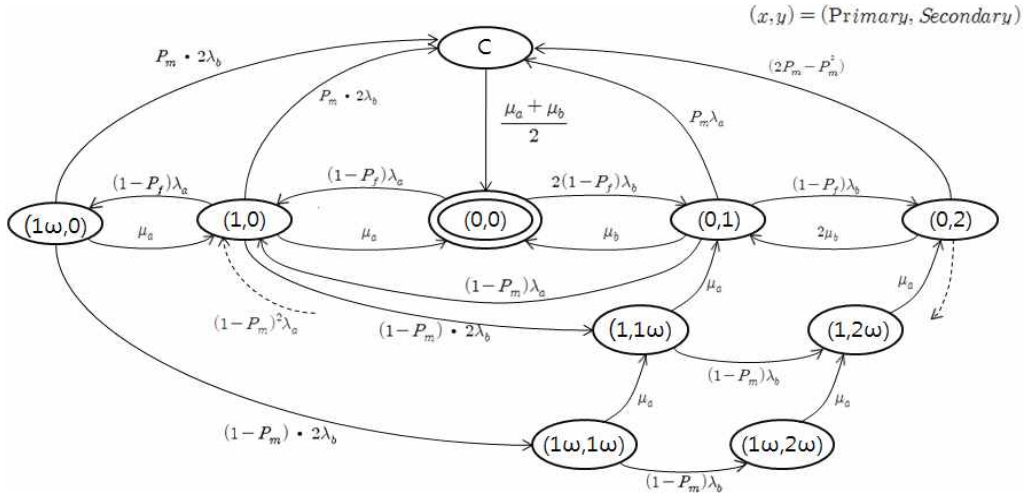


그림 2. 주·부사용자 모두 큐가 있는 연속시간 마르코프 체인
Fig. 2. Continuous Time Markov Chain with Primary and Secondary User Queue

표 3. 추가된 마르코프 체인의 상태
Table 3. Additional Markov Chain States

상태	설명
(1w,0)	주사용자가 채널 사용중 주사용자 세션 도착. 주 사용자 큐에 대기
(1,1w)	주 사용자가 채널 사용중 부사용자 세션 도착. 부 사용자 큐에 대기
(1,2w)	주 사용자가 채널 사용중 2명의 부사용자 세션이 도착. 각각의 큐에 대기

그림 2의 Markov Chain에 대한 극미 생성 매트릭스 A 를 II장에서처럼 풀면 식 (7)을 얻는다.

$$\begin{aligned}
 S_1 &= \lambda_a \mu_a (2\lambda_b + \mu_a) (\lambda_b + \mu_a - \lambda_b P_m)^2 P_{f1} P_4 \\
 S_2 &= -\mu_a (2(2\lambda_b + \mu_a)^2 \mu_b^2 (\lambda_b + \mu_a - \lambda_b P_m)^2 + \\
 &\quad 2\lambda_a^3 \lambda_b P_m (-\mu_a^2 (-2 + P_m) + \lambda_b^2 P_1 - 2\lambda_b \mu_a P_2) - \\
 &\quad \lambda_a (-\lambda_b - \mu_a + \lambda_b P_m) (3\mu_a^2 \mu_b + \lambda_b \mu_a (4\mu_b^2 + \\
 &\quad \mu_a \mu_b (11 + 5P_m - 4P_m^2) - \mu_a^2 P_{f1} + \lambda_b^2 (-4\mu_b^2 P_{m1} - \\
 &\quad 2\mu_a \mu_b (-5 - 12P_m + 16P_m^2 - 6P_m^3 + P_m^4) - \\
 &\quad \mu_a^2 (3 + 5P_m - 6P_m^2 + 2P_m^3) P_{f1} + \\
 &\quad 2\lambda_b^3 (-2\mu_b P_m P_3 + \mu_a (-1 - 8P_m + 12P_m^2 - 6P_m^3 + P_m^4) P_{f1}) \\
 &\quad + 4\lambda_b^4 P_m P_2 P_{f1}) + \lambda_a^2 (\mu_a^4 + 2\lambda_b \mu_a^2 (\mu_b + 4\mu_b P_m - 2\mu_b P_m^2 + \\
 &\quad \mu_a (2 + P_m - P_m^2)) + 2\lambda_b P_{m1} (\mu_b P_m P_3 + \mu_a (-1 + P_m^4 + \\
 &\quad P_m^2 (20 - 6P_f) + 2P_m^2 (-4 + P_f) + 6P_m (-3 + P_f))) - \\
 &\quad 2\lambda_b^4 P_m P_1 (-3 + P_f) + \lambda_b^2 \mu_a (-4\mu_b P_m P_3 + \mu_a (5 - 2P_m^4 -
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 &2P_m^3 (-6 + P_f) - 6P_m (-3 + P_f) + 3P_m^2 (-9 + 2P_f)))) \\
 S_3 &= 2\lambda_b \mu_a (-\lambda_a^3 \mu_a^2 P_{m1} + 2(2\lambda_b + \mu_a)^2 \mu_b P_5^2 + \lambda_a^2 (-\mu_a^2 (\mu_a + \\
 &2\mu_b) P_{m1} + 2\lambda_b^2 P_{m1} P_1 + \lambda_b \mu_a (4\mu_b P_{m1}^2 + \mu_a (5 - 4P_m + P_m^2)) \\
 &2\lambda_b^2 P_{m1} (\mu_b P_{m1}^2 + \mu_a (1 - 5P_m - 6P_m^2 + 2P_m^3))) - \lambda_a P_5 (\\
 &-\mu_a^2 (\mu_a - 2\mu_b P_{m1}) + 4\lambda_b^3 P_m P_2 + \lambda_b \mu_a (\mu_a (-5 + P_m) - \\
 &2\mu_b (5 - 4P_m + P_m^2)) + 2\lambda_b^2 (-2\mu_b (2 - 3P_m + P_m^2) + \\
 &\mu_a (-3 - 2P_m + 6P_m^2 - 4P_m^3 + P_m^4))) P_{f1} \\
 S_4 &= -2\lambda_b^2 \mu_a P_{f1} (\lambda_a^3 (-2\mu_a + \lambda_b P_{m1}) P_{m1}^2 + (2\lambda_b + \mu_a)^2 P_5^2 P_{f1} \\
 &-\lambda_a^2 P_{m1} (\lambda_b^2 P_{m1}^2 (5 - 2P_m + P_f) + \mu_a (2\mu_b P_{m1} + \mu_a (-2 + \\
 &P_m + P_f)) - \lambda_b P_{m1} (\mu_b P_{m1} + \mu_a (-9 + 5P_m + 2P_f))) - \\
 &\lambda_a P_5 (-\mu_a P_{m1} (\mu_b P_{m1} + \mu_a P_{f1}) - 2\lambda_b^2 P_{m1} (4 + 2P_m^2 + \\
 &P_m (-5 + P_f) - 2P_f) + \lambda_b (-2\mu_b P_{m1}^2 + \mu_a (-7 + 2P_m^2 + \\
 &P_m (10 - 4P_f) + P_m^2 (-7 + P_f) + 5P_f))) \\
 S_5 &= -2\lambda_a \lambda_b \mu_a (\mu_a (\lambda_a + \mu_a) - \lambda_b \mu_a (-3 + P_m) - \\
 &2\lambda_b^2 P_{m1}) P_{m1} P_{f1} P_4 \\
 S_6 &= -2\lambda_a \lambda_b^2 P_{m1}^2 P_{f1} (\lambda_a (-2\mu_a + \lambda_b P_{m1}) + (2\lambda_b + \mu_a) P_5 P_4 \\
 S_7 &= \frac{1}{(\mu_a + \mu_b)} (4\lambda_a \lambda_b \mu_a P_m P_{f1} (\lambda_a^3 (-\mu_a^2 (-2 + P_m) + \lambda_b^2 P_{m1}^2 P_1 \\
 &- 2\lambda_b \mu_a P_2) - \lambda_a P_5 (\mu_a (\mu_a^2 + 2\mu_b^2 + \mu_a \mu_b (5 - 2P_m)) + \lambda_b^2 (\\
 &- 2\mu_b (-11 + 18P_m - 8P_m^2 + P_m^3) + \mu_a (31 + P_m^3 (-3 + P_f) \\
 &+ 18P_m (-2 + P_f) - 8P_m^2 (-2 + P_f) - 15P_f)) + \lambda_b (-2\mu_b^2 P_{m1} \\
 &- \mu_a \mu_b (-25 + 20P_m - 6P_m^2 + P_m^3) + \mu_a^2 (10 + 3P_m (-2 + P_f)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 & -P_m^2 P_{f1} - 3P_f)) + 4\lambda_b^3 P_2 (-2 + P_f) - (2\lambda_b + \mu_a) P_5^2 (-2\mu_b \\
 & (\mu_a + \mu_b) + 2\lambda_b^2 (3 - 3P_m + P_m^2) P_{f1} + (-2 + P_m) \\
 & (\mu_a + 4\mu_b - \mu_a P_f)) + \lambda_a^2 (\mu_a^2 (\mu_b (5 - 2P_m) - \mu_a (-2 \\
 & + P_m) - \lambda_b^3 P_1 (-5 + P_f) - \lambda_b \mu_a (2\mu_b P_3 + \mu_a (-16 \\
 & P_m^3 + P_m (16 - 3P_f) + P_m^2 (-6 + P_f) + 3P_f)) + \\
 & \lambda_b^2 P_{m1} (\mu_b P_3 + \mu_a (-31 + P_m^3 + P_m (32 - 6P_f) + \\
 & 2P_m^2 (-6 + P_f) + 6P_f)))))) \\
 & S_8 = \lambda_a^2 \mu_a P_5^2 P_{f1} P_4 \\
 & S_9 = 2\lambda_a^2 \lambda_b \mu_a P_{m1} P_5 P_{f1} P_4 \\
 & S_{10} = 2\lambda_a^2 \lambda_b^2 P_{m1}^2 P_5 P_{f1} P_4 \quad (7)
 \end{aligned}$$

$S_1, S_2, S_3, S_4, S_5, S_6, S_7, S_8, S_9, S_{10}$ 들을 정규화하면 정상상태 확률 식 (8)을 얻는다.

$$\begin{aligned}
 T &= S_1 + S_2 + S_3 + S_4 + S_5 + S_6 + S_7 + S_8 + S_9 + S_{10} \\
 \Pi_{(1,0)} &= S_1/T, \Pi_{(0,0)} = S_2/T, \Pi_{(0,1)} = S_3/T, \Pi_{(0,2)} = S_4/T \\
 \Pi_{(1,1w)} &= S_5/T, \Pi_{(1,2w)} = S_6/T, \Pi_{(c)} = S_7/T \\
 \Pi_{(1w,0)} &= S_8/T, \Pi_{(1w,1w)} = S_9/T, \Pi_{(1w,2w)} = S_{10}/T \quad (8)
 \end{aligned}$$

주부사용자 모두 큐가 있는 경우 airtime은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned}
 \text{airtime}_{\text{primary}} &= \Pi_{(1,0)} + \Pi_{(1,1w)} + \Pi_{(1,2w)} \\
 &+ \Pi_{(1w,0)} + \Pi_{(1w,1w)} + \Pi_{(1w,2w)} \\
 \text{airtime}_{\text{secondary}} &= \frac{1}{2} \Pi_{(0,1)} + \Pi_{(0,2)} \quad (9)
 \end{aligned}$$

IV. 실험 및 결과

2, 3장에서 유도한 닫힌 해를 통해 수치적 결과를 얻었다. 그림 3은 부사용자만 큐가 있을 때 $P_m = 0.05$, $P_f = 0.05$, $\mu_a = 20$, $\mu_b = 20$ 로 고정하고 λ_a, λ_b 의 함수로서 부사용자의 airtime 개선비를 보여준다. 동일한 제공부하일 때 주사용자의 트래픽이 증가함에 따라 부사용자의 airtime이 50%정도 개선됨을 볼 수 있다. 부사용자의 큐가 없다면 주사용자의 트래픽이 증가함에 따라 부사용자의 airtime은 다소 감소한다. 주사용자가 채널을 사용할 때 폐기되던 부사용자 트래픽이 큐에 저장

되어 부사용자가 채널 사용이 가능할 때 즉시 트래픽을 전송할 수 있기 때문에 부사용자의 airtime은 큐가 없을 때 보다 많은 개선이 있게 된다.

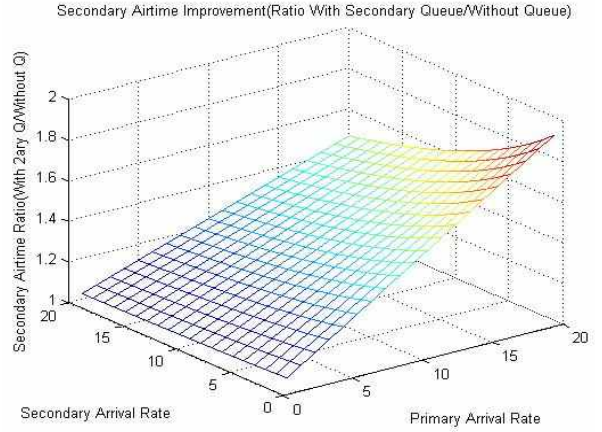


그림 3. λ_a, λ_b 의 함수로서 부사용자 airtime 개선비
Fig. 3. Secondary User Airtime Improvement Ratio

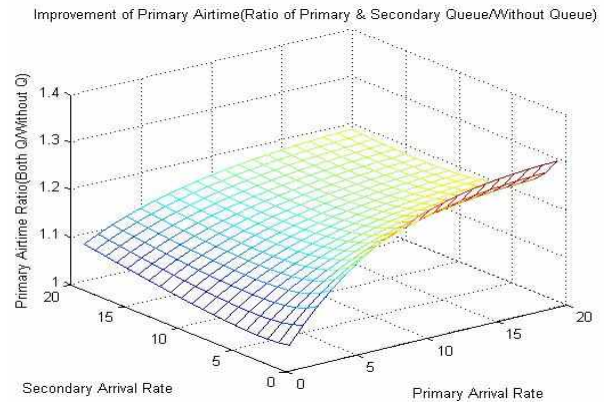


그림 4. λ_a, λ_b 의 함수로서 주사용자 airtime 개선비
Fig. 4. Primary User Airtime Improvement Ratio

그림 4는 주·부사용자 큐가 있을 때 $P_m = 0.05$, $P_f = 0.05$, $\mu_a = 20$, $\mu_b = 20$ 로 고정하고 λ_a, λ_b 의 함수로서 주사용자의 airtime 개선비를 보여준다. 동일한 제공부하일 때 주사용자의 트래픽이 증가함에 따라 주사용자의 airtime이 18%정도 개선됨을 볼 수 있다. 다른 파라미터들을 고정시키면 모든 λ_a 에 대하여 주사용자 airtime 개선비는 단조 증가한다. 부사용자 큐만 있을 때 보다 개선이 더욱 뚜렷하다. 부사용자 트래픽이 줄수록 또한 개선비는 더 좋아진다. 이는 주사용자도 큐가 있기 때문에

채널 사용중 도착하는 세션은 큐에 대기하다가 즉시 전송될 수 있기 때문이다.

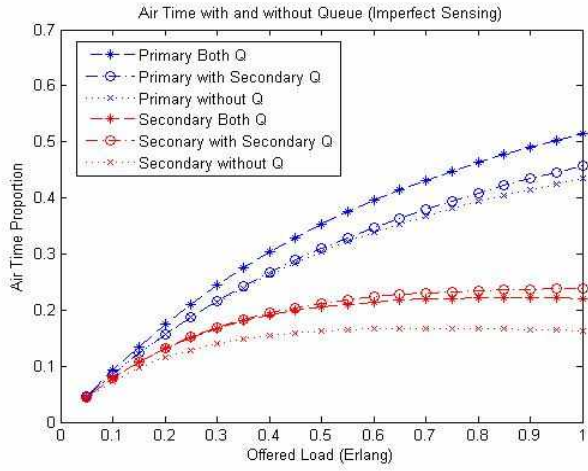


그림 5 큐에 따른 주·부사용자 Airtime 변화
Fig. 5. Change of Airtime of PU and SU with Q

그림 5는 두 종류의 사용자간 Airtime을 보여준다. 부사용자 큐만 있을 때 부사용자의 airtime은 많은 개선을 보인데 비해 주사용자 airtime 개선은 미미하다. 주사용자도 큐가 있으면 주사용자의 airtime은 뚜렷이 개선 되는 것을 알 수 있다. 부사용자의 airtime은 부사용자만 큐가 있을 때 보다 주부사용자 모두 큐가 있을 때 오히려 감소하는데 이는 주사용자가 우선권이 있고 또한 큐도 있으므로 대기중인 주사용자 트래픽이 먼저 처리되기 때문이다.

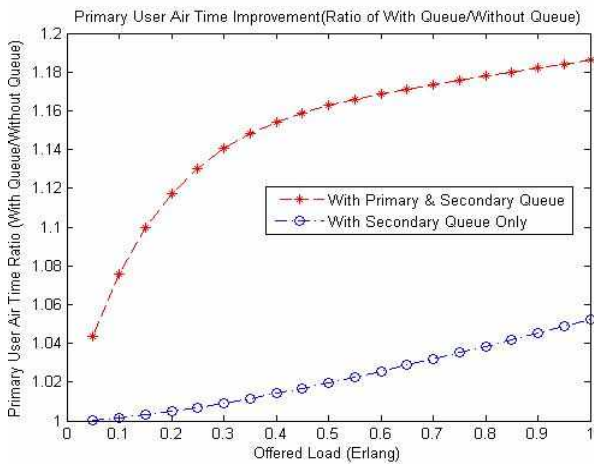


그림 6. 큐에 따른 주사용자 Airtime 개선 비율
Fig. 6. PU Airtime Improvement Ratio with Q

그림 6은 주·부사용자의 큐 유무와 제공부하에 따른 airtime 개선비이다.

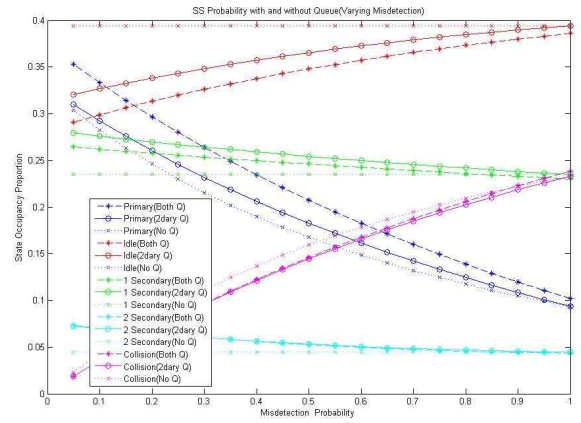


그림 7. 큐와 오검출의 함수로 정상상태 확률변화
Fig. 7. SS Probability as a Fn of Q & Misdetection

그림 7은 정상상태 확률을 오검출의 함수로서 나타내었다. 주·부사용자의 큐에 따라 모든 오검출 확률에 대해 큐가 없을때보다 주·부사용자의 정상상태 확률이 커짐을 확인할 수 있다.

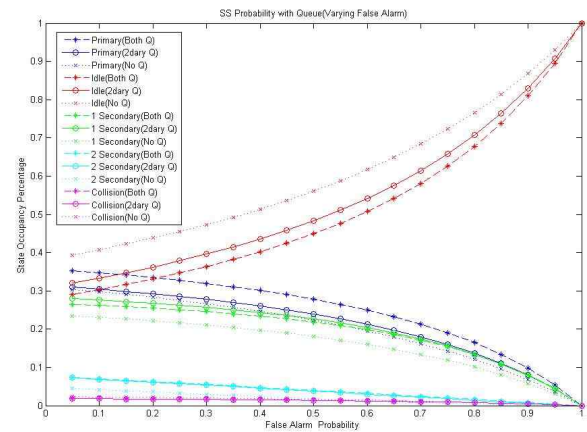


그림 8. 큐와 오경보의 함수로 정상상태 확률변화
Fig. 8. SS Probability as a Fn of Q & False Alarm

그림 8은 오경보 함수로의 정상상태 확률을 보여준다. 오검출과 마찬가지로 모든 오경보 확률에 대해 큐가 없을때보다 주·부사용자의 정상상태 확률이 커짐을 확인할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 오검출과 오경보의 불완전한 센싱하의 인지 전파 망에서 주·부사용자 큐가 스펙트럼 사용 효율에 어떤 영향을 미치는지를 연속시간 마르코프 체인의 닫힌해를 구해서 정량적으로 규명하였다. 주·부사용자가 동일한 제공부하일 때 부사용자의 airtime은 50% 정도 개선되었고, 주사용자는 18% 까지 개선되었다.

본 논문에서 유도한 닫힌해를 이용해 어떠한 파라미터 변화에 대해서도 정량적인 해석적 분석이 가능하다. 트래픽 패턴에 따라 큐의 크기를 조절해 주부사용자의 MAC 프로토콜 설계의 지침으로 활용할 수 있다.

참고 문헌

- [1] Q. Zhao and B. M. Sadler, "A survey of dynamic spectrum access," *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 24, no. 3, pp. 79 - 89, May 2007.
- [2] I. Akyildiz, W. Lee, M. Vuran, and S. Mohanty, "NeXt generation/dynamic spectrum access/cognitive radio wireless networks: A survey," *Comput. Netw.*, vol. 50, no. 13, pp. 2127 - 2159, Sep. 2006.
- [3] Y. Xing, R. Chandramouli, S. Mangold and S. Shankar N., "Dynamic Spectrum Access in Open Spectrum Wireless Networks" *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 24, no. 3, pp. 626-637, March 2006.
- [4] Beibei Wang, Zhu Ji, Liu, K, Clancy, T. C., "Primary-Prioritized Markov Approach for Dynamic Spectrum Allocation ", *IEEE Trans. Commun.*, Volume 8, Issue 4, PP.1854 - 1865, April 2009.
- [5] S. Keshavamurthy and K. Chandra, "Multiplexing analysis for spectrum sharing," in *Proc. IEEE MILCOMM'06*, pp. 1-7, Washington, DC, Oct. 2006.

- [6] Z. Ji and K. J. R. Liu, "Dynamic spectrum sharing: a game theoretical overview," *IEEE Commun. Mag.*, pp. 88-94, May 2007.
- [7] R. Etkin, A. Parekh, and D. Tse, "Spectrum sharing for unlicensed bands," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 25, no. 3, pp. 517-528, Apr. 2007.

저자 소개

안 홍 영(정회원)



- 1975년: 서울대학교 공과대학 전자공학 학과 (BS)
 - 1986년: University of Florida, Department of Electrical and Computer Engineering (MS)
 - 1991년: University of Florida, Department of Electrical and Computer Engineering (Ph. D.)
 - 1975년-1984년: 국방과학연구소(ADD) 선임연구원
 - 1991년-현재: 홍익대학교 컴퓨터정보통신공학과 교수
- <주관심분야 : Wireless Networks, Ad-hoc Networks, Sensor Networks, Wireless Internet, VoIP, 4세대 이동통신, MIMO, OFDM, Cognitive Networks, 협업통신>

※ 이 논문은 2009학년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었음.