

논문 2010-6-1

# 불완전 센싱 기회적 인지 전파망의 Markov Chain 분석

## Markov Chain Analysis of Opportunistic Cognitive Radio with Imperfect Sensing

안홍영\*

Hong-Young Ahn

요 약 무선 접속을 통한 이동통신망이나 데이터망의 멀티미디어 서비스는 이제 현대 생활의 중요한 일부가 되었으며 유비쿼터스 컴퓨팅이 확산됨에 따라 새로운 서비스에 필요한 주파수 스펙트럼에 대한 수요는 급증할 전망이다. 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 인지 전파 망에서 오검출과 오경보의 불완전한 센싱이 주 사용자와 부 사용자의 스펙트럼 사용에 어떤 영향을 미치는지를 연속시간 마르코프 체인 분석을 통하여 규명하였다. 연속시간 마르코프 체인의 닫힌 해(Closed Form Solution)를 통하여 센싱 오류, 제공 부하 등의 파라미터들이 시스템 성능에 미치는 영향을 분석하였다.

**Abstract** Wireless multimedia service through the access to mobile telephone network or data network is a vital part of contemporary life, and the demand for frequency spectrum for new services is expected to explode as the ubiquitous computing proliferate. 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, we investigate the effects of imperfect sensing, misdetection and false alarm, on the primary and secondary users' spectrum usage through the analysis of continuous time Markov Chain. We analyzed the effects of the parameters such as sensing error, offered load on the system performance.

**Key Words :** 기회적 인지전파망, 연속시간 마르코프 체인, 센싱 오류, 제공 부하, 시스템 성능

### I. 서 론

무선 접속을 통한 이동통신망이나 데이터망의 멀티미디어 서비스는 이제 현대 생활의 중요한 일부가 되었으며 유비쿼터스 컴퓨팅이 확산됨에 따라 새로운 서비스에 필요한 주파수 스펙트럼에 대한 수요는 급증할 전망이다.<sup>[2,4,5]</sup>

이러한 상황에서 현재의 주파수 분배 상황을 살펴보

면 거의 모든 주파수 대역이 고정 할당되어 있고 특히 무선통신 환경이 가장 좋은 낮은 주파수 대역은 거의 사용할 여지가 없다. 최근의 측정 연구 보고에 따르면 30~300MHz 대역에서 일부 무선 채널의 이용율은 1%도 되지 않으며 모든 주파수 대역에서 평균 사용 점유 비는 5.2%밖에 되지 않는 것으로 조사되었다<sup>[4]</sup>. 따라서 주파수 부족의 문제가 스펙트럼의 유한성 문제뿐 아니라 비효율적인 운영에도 기인함을 알 수 있다.

이런 주파수 부족 문제를 해결하기 위해 각국의 통신 감독 기구들은 주파수할당 정책을 재고하게 되었고 그

\*정회원, 홍익대학교 컴퓨터정보통신공학과  
접수일자 2010.10.24 수정일자 2010.11.24  
게재확정일자 2010.12.15

결과가 동적 주파수 접근(DSA)정책이다<sup>[2,3]</sup>. 동적 주파수 접근은 기존의 인가된 사용자(주 사용자)의 권리를 존중 하면서 주 사용자가 시공간적으로 사용하지 않는 대역을 비인가 사용자(부 사용자)들이 잠시 사용할 수 있게 해서 주파수 사용 효율을 높이는 주파수 할당 정책이다. DSA 정책에 따른 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 인지 전파 망에서 오검출과 오경보의 불완전한 센싱이 주 사용자와 부 사용자의 스펙트럼 사용에 어떤 영향을 미치는지를 연속시간 마르코프 체인 분석을 통하여 규명하였다. 연속시간 마르코프 체인의 닫힌 해(Closed Form Solution)를 통하여 센싱 오류, 부하 등이 시스템 성능에 미치는 영향을 분석하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 본 논문에서 다루는 인지 전파망의 마르코프 체인과 그 해에 대해, 3장에서는 airtime과 블록킹 확률에 대해, 4장에서는 제안한 방법의 실험 및 결과에 대해, 5장에서는 결론을 맺는다.

## II. 연속시간 마르코프 체인

### 1. 버퍼가 없는 연속시간 마르코프 체인

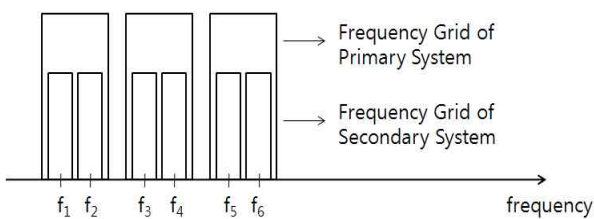


그림 1. 두 전파 시스템의 채널 사용 예  
Fig. 1. Example of Channel Usage of Two Radio Type

그림 1과 같은 서로 다른 타입의 두 전파 시스템이 스펙트럼을 공유하는 시나리오를 생각해 보자. 주 사용자인 A형 시스템은 3개의 주파수 채널을, 부 사용자인 B형 시스템은 6개의 주파수 채널을 사용한다. A형 시스템은 B형 시스템보다 채널 대역폭이 2배 더 필요하다. A형 시

스템은 같은 형의 사용자가 채널을 사용하고 있으면 미사용 채널을 찾아서 사용한다. B형 시스템은 주 사용자가 사용하지 않는 미사용 채널을 기회적으로 찾아서 이용한다.

본 논문에서는 센싱 오류의 영향에 집중하기 위해 A형과 B형 시스템이 같은 채널에서 동작하는 시나리오만 고려한다. 또한 주 사용자가 경고신호 등을 통해 채널 사용을 예고하고 이를 감지한 부사용자는 채널 사용을 즉시 중지한다고 가정한다. 부 사용자는 주 사용자가 채널을 사용 중인 한 채널을 사용할 수 없다. 주 사용자가 전파 사용중일 때 도착하는 주·부 사용자의 모든 세션 요청은 버퍼가 없으므로 폐기한다.

센싱 오류에는 채널이 미사용인데 사용 중으로 센싱하는 오경보(False Alarm)와 사용중인 채널을 미사용으로 센싱하는 오검출(Misdetection)이 있다.

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  $\mu_i$ 인 Poisson 과정이다. 여기서 주의할 점은 랜덤과정이 패킷 도착율과 이탈율이 아니라 전파사용 세션의 도착율과 이탈율인 점이다. 따라서 세션의 충돌이 일더라도 패킷 충돌 시처럼 전 시간이 낭비되지 않고 겹친 부분만 낭비된다는 점이다. 그림 2의 상태와 변수들에 대한 설명은 표 1, 2에 있다.

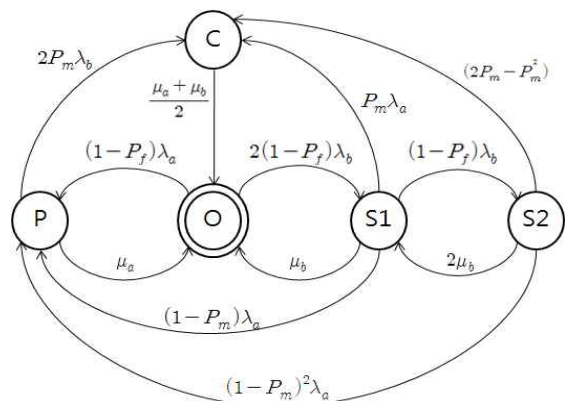


그림 2. 연속시간 마르코프 체인 모델  
Fig. 2. Continuous Time Markov Chain Model

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

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

상태	설명
P	주 사용자가 채널 사용
0	채널 미사용 상태
S1	부 사용자 1명이 채널 사용
S2	부 사용자 2명이 채널 사용
C	센싱 오검출에 의해 세션 충돌이 일어남

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

변수	설명
$\lambda_a, \mu_a$	주 사용자 세션 도착율, 이탈율
$\lambda_b, \mu_b$	부 사용자 세션 도착율, 이탈율
$P_f$	오경보 확률(false alarm)
$P_m$	오검출 확률(misdetection)

그림 2의 Markov Chain에 대한 극미 생성 매트릭스 A는 상단의 식 (1)과 같다. A의 각 행의 합은 0이다. 그러면 다음식이 성립한다.

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

여기서  $\Pi = [\Pi_p, \Pi_0, \Pi_1, \Pi_2, \Pi_c]$ 는 시스템이 P, 0, S1, S2, C 상태에 있을 정상상태 확률 벡터이며, 각 상태에 있을 확률을 나타내고  $\sum_i \Pi_i = 1$ 이다.

$A^T$ 의 Null Space의 정규화하지 않은 basis vector의 닫힌 해(Closed Form Solution)를 구하면, (3)식의 형태로 주어진다

$$N_{\text{basis}} = [P_p, P_0, P_1, P_2, P_c] \quad (3)$$

이 벡터의 성분들은 아래의 (4)식으로 주어지며 이를 정규화하면  $\Pi$ 를 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_p &= \lambda_a(\mu_a + \mu_b)(1 - P_f) \\ &\quad (\lambda_a^2 + 2(\mu_b^2 - 2\lambda_b\mu_b(P_m - 1) - \lambda_b^2(P_m - 1)^2(P_f - 1)) + \\ &\quad \lambda_a(3\mu_b - \lambda_b(-3 + 2P_m + P_f))) \\ P_0 &= (\mu_a + \mu_b)(\mu_a + 2\lambda_b P_m) \\ &\quad (\lambda_a^2 + 2\mu_b^2 + \lambda_a(\lambda_b + 3\mu_b - \lambda_b P_f)) \\ P_1 &= 2\lambda_b(1 - P_f)(\mu_a + \mu_b)(\lambda_a + 2\mu_b)(\mu_a + 2\lambda_b P_m) \\ P_2 &= 2\lambda_b^2(1 - P_f)^2(\mu_a + \mu_b)(\mu_a + 2\lambda_b P_m) \\ P_c &= 4\lambda_a\lambda_b P_m(1 - P_f)(\lambda_a^2 + 2\mu_b(\mu_a + \mu_b) + \\ &\quad \lambda_a(\mu_a + 3\mu_b - \lambda_b(P_f - 3)) + \\ &\quad \lambda_b(4\mu_b + \mu_a(P_m - 2)(P_f - 1)) - 2 \\ &\quad \lambda_b^2(P_f - 1)) \end{aligned} \quad (4)$$

$P_p, P_0, P_1, P_2, P_c$ 들을 정규화하면 정상상태 확률  $\Pi = [\Pi_p, \Pi_0, \Pi_1, \Pi_2, \Pi_c]$ 를 얻는다.

$$T = P_p + P_0 + P_1 + P_2 + P_c \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \Pi_p &= P_p/T, \quad \Pi_0 = P_0/T, \quad \Pi_1 = P_1/T, \\ \Pi_2 &= P_2/T, \quad \Pi_c = P_c/T \end{aligned} \quad (6)$$

## 2. 오검출에 의한 영향

우리는 오검출(misdetection) 센싱 오류가 정상상태 확률에 어떤 영향을 끼치는지를 조사하고자 한다.  $\Pi_i$ 들은 다변수 함수들이므로, 예를 들어 주 사용자의 정상상태 확률  $\Pi_p$ 에 대한 식을 얻기 위해  $P_m$ 을 제외한 다른 변수들을 다음과 같이 고정시키면 (7)식을 얻는다.

$$\begin{aligned} (\lambda_a = 10, \lambda_b = 20, \mu_a = 20, \mu_b = 20, P_f = 0.05) \\ \Pi_p = \frac{0.3268 - 0.1619P_m + 0.0223P_m^2}{1 + P_m} \end{aligned} \quad (7)$$

$\Pi_p$ 는  $P_m$  값이 구간 (0, 1)사이에서 변하는 동안 단조 감소하는 함수이다.

즉 misdetection이 클수록 Primary의 세션이 부사용자 세션과 겹쳐 방해받지 않는 세션 시간은 줄어든다.

$\Pi_p$ 를  $\lambda_b = 10, \mu_a = 20, \mu_b = 20, P_f = 0.05$ 로 고정하고,  $\lambda_a$ 와  $P_m$ 의 2변수 함수로 표시하면 그림 3과 같다.

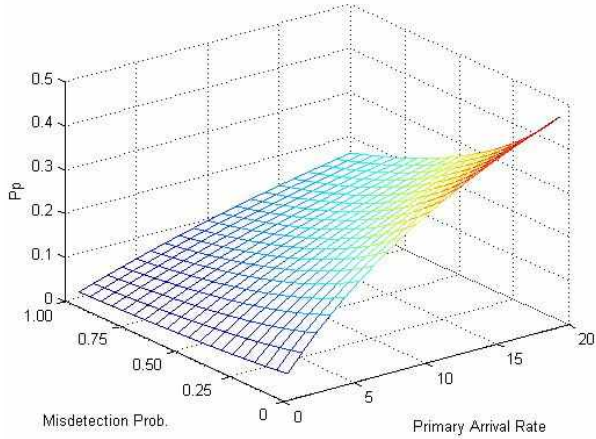


그림 3.  $\lambda_a, P_m$ 의 함수로서  $\Pi_p$   
Fig. 3.  $\Pi_p$  as a Function of  $\lambda_a, P_m$

그림 3에서 보듯이 모든  $\lambda_a$ 에 대해  $\Pi_p$ 는 구간 (0, 1)에서  $P_m$ 의 단조 감소 함수이다. 그림 2의 연속시간 마르코프 체인 모델을 보면  $P_m$ 의 변화에 도착율이 달라지는 상태는 P와 C 상태뿐이므로 이는 당연한 결과이다.

$$\begin{aligned} \text{또한 } \Pi_0 &= \frac{1.276(1 + P_m)}{3.2387(1 + P_m)} = 0.3940 \\ \Pi_1 &= \frac{0.7600(1 + P_m)}{3.2387(1 + P_m)} = 0.2314 \\ \Pi_2 &= \frac{0.1444(1 + P_m)}{3.2387(1 + P_m)} = 0.0440 \\ \Pi_c &= \frac{(0.4887 - 0.0223P_m)P_m}{3.2387(1 + P_m)} \end{aligned} \quad (8)$$

세션 충돌확률  $\Pi_c$ 는 구간 (0, 1)에서  $P_m$ 의 단조 증가함수이다. 즉 misdetection이 클수록 세션 충돌 시간이 길어진다는 의미다.  $\Pi_c$ 를  $\lambda_b = 10, \mu_a = 20, \mu_b = 20, P_f = 0.05$ 로 고정하고,  $\lambda_a$ 와  $P_m$ 의 2변수 함수로 표시하면 그림 4와 같다.

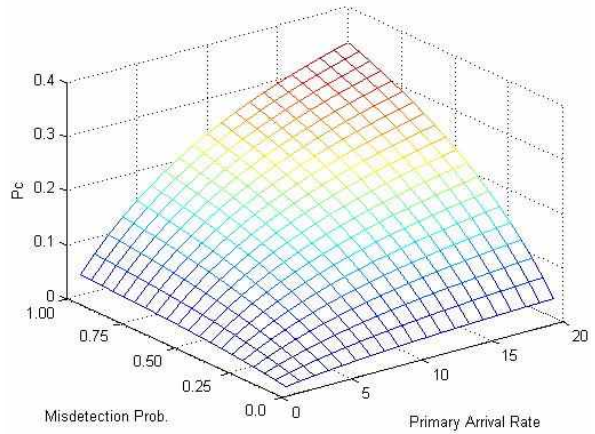


그림 4.  $\lambda_a, P_m$ 의 함수로서  $\Pi_c$   
Fig. 4.  $\Pi_c$  as a Function of  $\lambda_a, P_m$

모든  $\lambda_a$ 에 대해서  $P_m$ 이 증가할수록  $\Pi_c$ 가 단조 증가함을 알 수 있다. 트래픽이 증가할수록 충돌 확률은 높아지기 때문이다.

### 3. 오경보에 의한 영향

오경보( $P_f$ )의 영향을 보기위해  $P_f$ 을 제외한 다른 변수들을  $\lambda_a = 10, \lambda_b = 10, \mu_a = 20, \mu_b = 20, P_m = 0.05$ 로 고정시키고  $\Pi_i$ 를  $P_f$ 의 함수로 나타내면

$$\begin{aligned} \Pi_p &= \frac{0.3816(9.7344 - P_f)(1 - P_f)}{12 - 8.7143P_f + P_f^2} \\ \Pi_0 &= \frac{4.5714 - 0.2857P_f}{12 - 8.7143P_f + P_f^2} \\ \Pi_1 &= \frac{2.85714(1 - P_f)}{12 - 8.7143P_f + P_f^2} \\ \Pi_2 &= \frac{0.5714(1 - P_f)^2}{12 - 8.7143P_f + P_f^2} \\ \Pi_c &= \frac{0.0469(6.0725 - P_f)(1 - P_f)}{12 - 8.7143P_f + P_f^2} \end{aligned} \quad (9)$$

로 주어진다.  $P_f$ 가 구간 (0, 1)에서 변하는 동안  $\Pi_0$ 는 단조 증가하고,  $\Pi_p, \Pi_1, \Pi_2, \Pi_c$ 는 단조 감소한다. 오경

보가 증가함에 따라 주 사용자, 부사용자의 세션 도착율이 감소하는 것과 같은 효과를 가지므로 극단적으로 오경보 확률이 1인 경우  $\Pi_p, \Pi_1, \Pi_2, \Pi_c$  값은 0이고  $\Pi_0$ 는 1이다.

$\Pi_p, \Pi_0$ 를  $\lambda_b = 10, \mu_a = 20, \mu_b = 20, P_m = 0.05$ 로 고정하고,  $\lambda_a$ 와  $P_f$ 의 2변수 함수로 표시하면 그림 5, 그림 6과 같다.

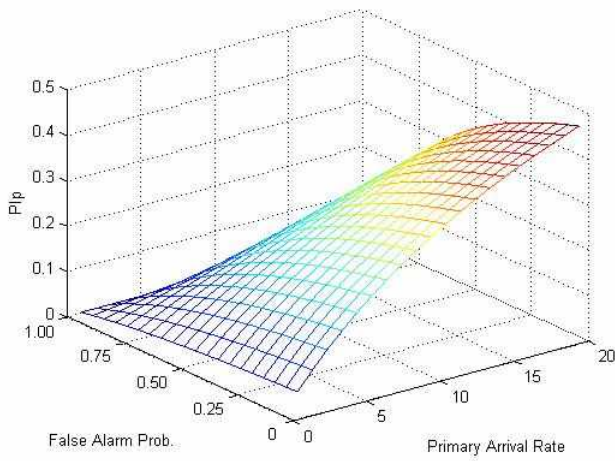


그림 5.  $\lambda_a, P_f$ 의 함수로서  $\Pi_p$   
Fig. 5.  $\Pi_p$  as a Function of  $\lambda_a, P_f$

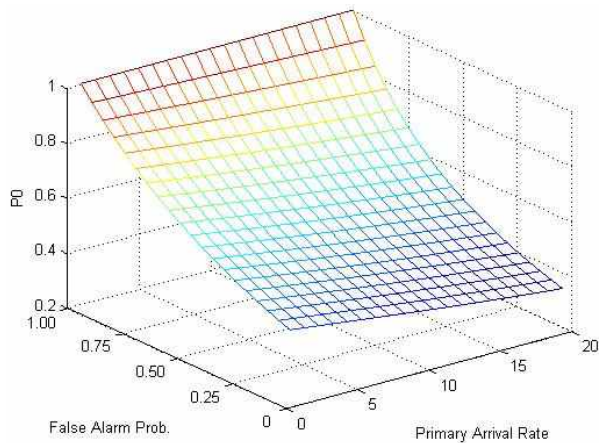


그림 6.  $\lambda_a, P_f$ 의 함수로서  $\Pi_0$   
Fig. 6.  $\Pi_0$  as a Function of  $\lambda_a, P_f$

### III. Airtime과 블록킹 확률

#### 1. Airtime

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

$$airtime_{type=A,B} = \frac{1}{N_{type}} \sum_{i=1}^{N_{type}} \frac{\text{전파할당시간}(i)}{\text{기준시간}}$$

여기서  $N_{type}$ 은  $i$  전파시스템 개수다

$$airtime_{primary} = \Pi_p$$

$$airtime_{secondary} = \frac{1}{2} \Pi_1 + \Pi_2 \quad (10)$$

#### 2. 블록킹 확률

사용자의 관점에서는 필요시 즉시 무선 시스템에 접속할 수 있는지의 여부가 중요하므로 블록킹 확률 또한 주파수 공유 시스템의 중요한 메트릭이다. 정상상태에서 시스템이 상태  $j$ 에 있을 확률이  $\pi_j$ 이므로, 아주 긴 시간  $T$  동안 상태  $j$ 에 평균  $\pi_j T$  시간을 머무른다고 볼 수 있다. 이 시간 동안 도착한  $\lambda_j \pi_j T$ 개의 세션들은 시스템이 상태  $j$ 에 있는 것을 발견하게 된다. 시간  $T$  동안 도착하는 모든 세션들의 수는 평균적으로  $T \sum_{k=0}^s \lambda_k \pi_k$ 이다. 따라서 특정 도착 세션이 시스템이  $j$  상태인 것을 발견할 확률은 다음과 같다.

$$\pi_j^* = \frac{\lambda_j \pi_j}{\sum_{k=0}^s \lambda_k \pi_k} \quad (\text{여기서 } s+1 \text{ 은 총 상태수})$$

### IV. 실험 및 결과

3장에서 유도한 닫힌 해를 통해 수치적 결과를 얻었다. 그림 7은  $P_m = 0.05, P_f = 0.05$ 일 때 Erlang으로 표현된 주사용자와 부사용자의 제곱 부하(Equal Load) 0.05에서 1로 변할때의 각 상태의 정상상태 확률 변화이다. 부하가 증가함에 따라 주사용자의 점유 확률은 높아짐에 반해 부사용자의 점유확률은 낮아짐을 알 수 있다. 이는 주사용자가 우선권을 가지고 있기 때문이다.

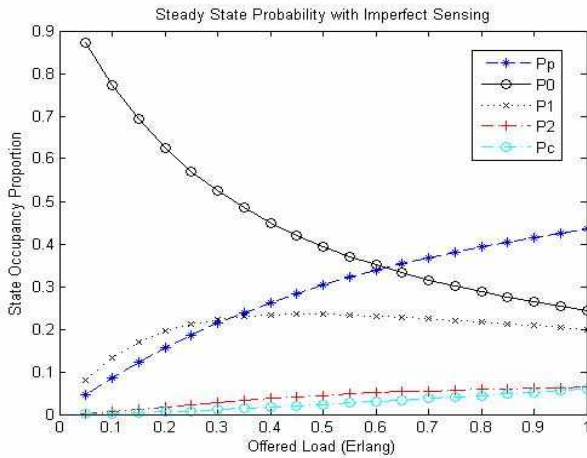


그림 7. 정상상태 확률  
Fig. 7. Steady State Probability

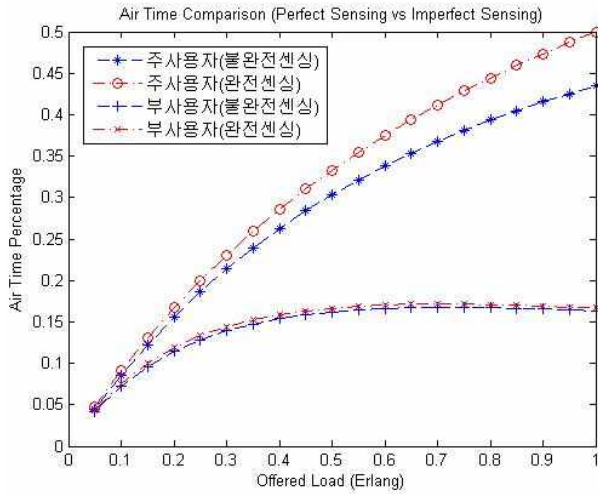


그림 8. 두 전파 타입의 Airtime  
Fig. 8. Airtime of Two Radio Types

그림 8은 두 종류의 사용자간 Airtime을 보여준다. 완전한 센싱과 불완전 센싱 두 경우를 비교했는데, 부사용자 보다는 주 사용자가 불완전 센싱의 영향을 더 받을 것을 알 수 있다. 주 사용자의 제공 부하가 1이 되어도 전파 점유율은 1이 넘지 않는데 이는 현재의 모델에서는 큐가 없어 전송중 도착한 세션들은 버려지기 때문이다. 그림 9는  $P_m = 0.05$ ,  $P_f = 0.05$ ,  $\mu_a = 20$ ,  $\mu_b = 20$  일 때  $\lambda_a$ ,  $\lambda_b$ 의 함수로서  $\Pi_p$ 를 보여준다. 그림 7의  $P_p$ 는 그림 9를 원점에서 대각선 방향으로 이동한  $\Pi_p$ 의 값이다.

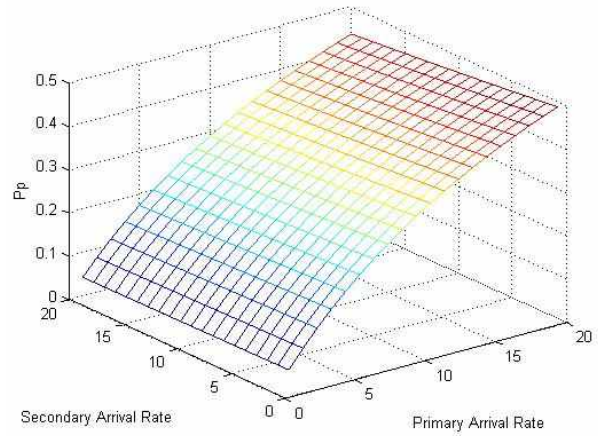


그림 9.  $\lambda_a$ ,  $\lambda_b$ 의 함수로서  $\Pi_p$   
Fig. 9.  $\Pi_p$  as a Function of  $\lambda_a$ ,  $\lambda_b$

그림 10은  $P_m = 0.05$ ,  $P_f = 0.05$ ,  $\mu_a = 20$ ,  $\mu_b = 20$  일 때  $\lambda_a$ ,  $\lambda_b$ 의 함수로서 부사용자의 airtime을 보여준다. 그림 8의 부사용자의 airtime은 그림 10을 원점에서 대각선 방향으로 이동한  $\frac{\Pi_1}{2} + \Pi_2$ 의 값이다.

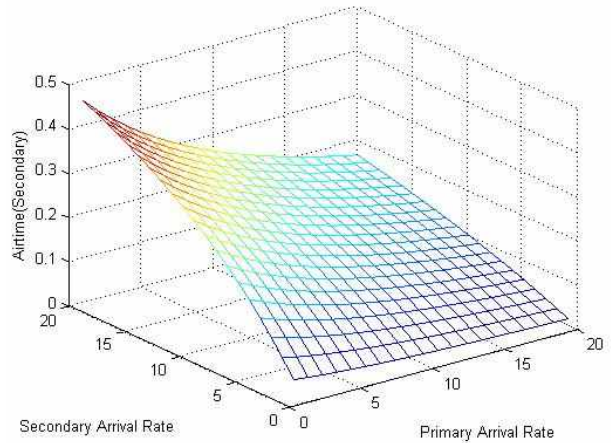


그림 10.  $\lambda_a$ ,  $\lambda_b$ 의 함수로서 부 사용자 Airtime  
Fig. 10. Secondary Airtime as a Function of  $\lambda_a$ ,  $\lambda_b$

그림 11는 정상상태 확률을 오검출의 함수로서 나타내었다.  $\Pi_0$ ,  $\Pi_1$ ,  $\Pi_2$ 의 값이 오검출에 독립적인 반면, 오검출로 인한  $\Pi_p$ 의 손실은 고스란히  $\Pi_c$ 의 증가로 나타난다.

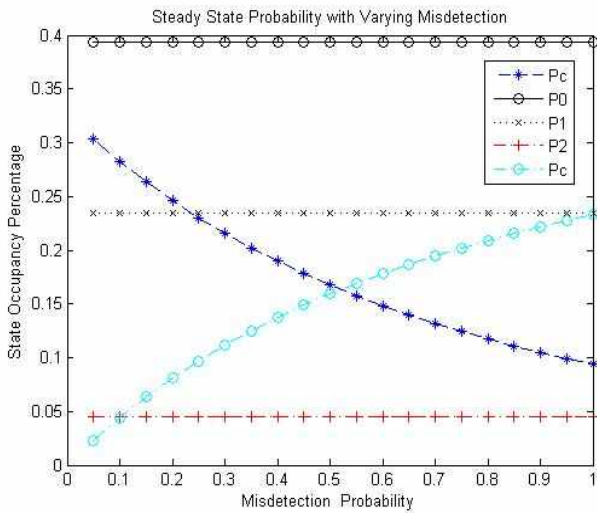


그림 11. 오검출 함수로의 정상상태 확률  
Fig. 11. SS Prob. as a Function of Misdetection

그림 12는 오경보 함수로의 정상상태 확률을 보여준다. 오경보가 증가함에 따라 0 상태에서 P, S1 상태로의 천이는 줄어들고 궁극적으로 0이 됨을 확인 할 수 있다.

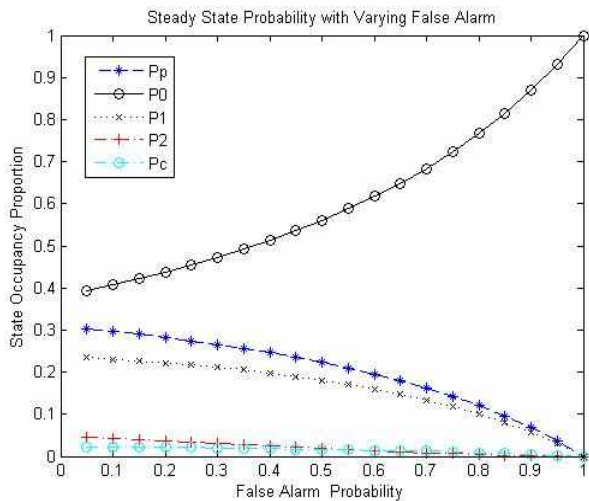


그림 12. 오경보 함수로의 정상상태 확률  
Fig. 12. SS Prob. as a Function of False Alarm

그림 13은  $P_m = 0.05, P_f = 0.05, \mu_a = 20, \mu_b = 20, \lambda_a = 10$ 으로 주어졌을 때(주 사용자의 제공 부하는 1/2) 부사용자의 제공 부하에 따른 정상상태 확률 변화를 보여준다.

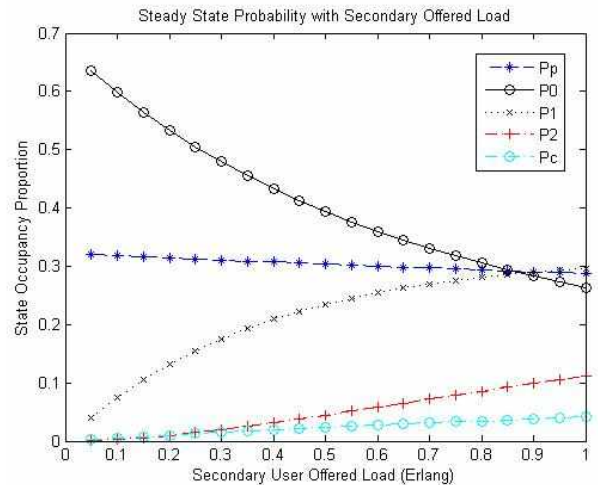


그림 13. 부사용자 제공 부하에 따른 정상상태 확률  
Fig. 13. SS Prob, as a Fn of 2nd Offered Load

## V. 결론

본 논문에서는 인지 전파 망에서 오검출과 오경보의 불완전한 센싱이 주 사용자와 부 사용자의 스펙트럼 사용에 어떤 영향을 미치는지를 연속시간 마르코프 체인 분석을 통하여 규명하였다.

주어진  $P_m, P_f$  하에서 제공 부하가 증가함에 따라 주 사용자가 우선권을 가지므로 주 사용자의 전파 점유 확률은 증가하는데 비해 부 사용자의 점유확률은 다소 감소함을 보였다. 주·부 사용자의 제공부하(1/2)와  $P_f$ 가 주어졌을 때 오검출의 함수로서 정상상태 확률변화는 오검출이 증가함에 따라 P상태로의 천이는 줄고 C상태로의 천이는 늘어나게 되므로  $\Pi_p(P_p)$ 는 작아지고 그만큼  $\Pi_c(P_c)$ 는 커지게 된다. 주·부 사용자의 제공부하(1/2)와  $P_m$ 이 주어졌을 때 오경보의 함수로서 정상상태 확률변화는 오경보의 증가가 유효세션 도착율이 감소하는 역할을 하므로  $\Pi_p, \Pi_1, \Pi_2, \Pi_c$ 는 모두 감소하고 채널 유희상태  $\Pi_0(P_0)$ 만 증가한다. 주 사용자 제공부하와  $P_m, P_f$ 가 고정되었을 때 부 사용자의 채널 사용확률은 부사용자의 제공부하가 증가함에 따라 증가한다.

본 논문에서는 인지 전파망의 상태에 대한 닫힌 해를 구함으로서 어떠한 파라미터의 변화도 그 영향을 정량적으로 분석할 수 있었다.

## 참 고 문 헌

- [1] 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.
- [2] FCC, "Facilitating opportunities for flexible, efficient and reliable spectrum use employing cognitive radio technologies: notice of proposed rule making and order," FCC Document ET Docket No. 03-108, Dec. 2003.
- [3] T. Clancy, "Achievable capacity under the interference temperature model," in *Proc. IEEE INFOCOM 2007*, pp. 794-802, Anchorage, AK, May 2007.
- [4] 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.
- [5] 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.

※ 이 논문은 2008학년도 홍익대학교 학술연구진흥비에 의하여 지원되었음.

## 저자 소개

### 안 흥 영(정회원)



- 1975년: 서울대학교 공과대학 전자공학과 (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>