

상관된 국부 결정을 사용하는 협력 스펙트럼 감지

중신회원 임창헌*

Collaborative Spectrum Sensing with Correlated Local Decisions

Chang-Heon Lim* *Lifelong Member*

요약

협력 스펙트럼 감지 방식은 페이딩이 존재하는 환경에서 1차 사용자의 활동 유무를 알아내는 효과적인 방식으로 알려져 있다. 지금까지 협력 스펙트럼 감지에 관해 이루어진 대부분의 연구는 2차 사용자가 내린 국부 스펙트럼 감지 결정들이 통계적으로 서로 독립이라는 가정에 기초한 것이다. 그러나 실제 환경에서는 이러한 전제가 성립하지 않을 수 있다. 이 논문에서는 지역적으로 이웃한 2차 사용자의 국부 스펙트럼 감지 결정들 사이에 동일한 상관도가 존재하고, 이웃하지 않은 경우에는 통계적으로 독립인 인지 무선 네트워크를 대상으로 하여, AND 규칙과 OR 규칙을 사용하는 협력 스펙트럼 감지 방식의 성능을 분석하였다. 분석 결과, 상관 정도가 강할 때 AND 방식이 OR 방식에 비해 우수한 성능을 나타냄을 확인할 수 있었다.

Key Words : Cognitive Radio, Spectrum Sensing, Energy Detection, Decision Fusion

ABSTRACT

Collaborative spectrum sensing has been found to be an effective means for detecting the activity of primary users in a fading environment. Most previous works on collaborative spectrum sensing are based on the assumption that the local spectrum sensing decisions of secondary users are statistically independent. However, it may not hold in some practical situations. In this paper, we consider a cognitive radio network where the local spectrum sensing decisions of secondary users are statistically correlated with the same level of correlation if they are next to each other in location and statistically independent, otherwise. Then, for the system, we analyzed the performance of the collaborative spectrum sensing with the AND and the OR fusion rules and found that the scheme with the AND fusion rule performs better than the one with OR fusion rule when the degree of correlation is significant.

I. 서론

인지 무선(cognitive radio) 기술^[1]은 스펙트럼 이용 상황에 따라 스펙트럼 접근 기회를 유연하게 부여할 수 있는 방안을 실현할 수 있는 기술로서 기존의 고정된 스펙트럼 할당 방식으로 인해 야기되는 주파수 자원의 고갈 문제를 해결할 수 있는 유력한 수단으로 인식되고 있다.

인지 무선 시스템은 실시간으로 주변 전파 환경

을 인식하고 그에 따라 시스템의 동작 방식을 변경할 수 있는 기술이기 때문에, 기본적으로 스펙트럼 감지 기능^{[2]-[4]}을 보유하고 있어야 하는데, 가장 기본적인 스펙트럼 감지 형태는 인지 무선 단말 차원에서 개별적으로 스펙트럼 감지를 수행하는 것이다. 그러나 페이딩이 존재하는 환경에서는 페이딩의 영향으로 인하여 1차 사용자로부터 수신한 신호의 강도가 매우 약해질 수 있기 때문에 개별 단말 차원에서 이루어지는 스펙트럼 감지 성능이 심각하게

* 부경대학교 전자공학과(chlim@pknu.ac.kr)

논문번호: KICS2009-11-574, 접수일자: 2009년 11월 12일, 최종논문접수일자: 2010년 7월 2일

저하될 수 있다. 이러한 어려움을 해소할 수 있는 방안으로 여러 개의 인지 무선 단말이 스펙트럼 감지 결과를 서로 공유하는 협력 스펙트럼 감지 방식^{[5],[11]}이 제안되었고, 이는 페이딩으로 인한 스펙트럼 감지 성능의 저하 문제를 상당 부분 해결할 수 있는 것으로 알려져 있다.

인지 무선 네트워크에서 협력 스펙트럼 감지 기술을 사용하는 가장 일반적인 형태는 2차 사용자의 국부 스펙트럼 감지 결과를 융합 센터(기지국)가 수집하고, 이를 토대로 1차 사용자의 활동 유무를 판정하는 방식이다. 이때 융합 센터가 수집하는 국부 스펙트럼 감지 결과가 스펙트럼 분석 데이터인지 아니면 스펙트럼 감지 결정인지에 따라 융합 방식을 연판정 융합과 경판정 융합 방식으로 구분한다^[10]. 일반적으로 연판정 융합 방식은 융합 센터에 전달되는 데이터의 양이 경판정 방식에 비해 많기 때문에 구현 측면에서 경판정 방식이 유리하다고 알려져 있다. 이 논문에서 다루는 협력 스펙트럼 감지 방식도 경판정 융합 방식을 사용하는 것을 전제로 한다.

협력 스펙트럼 감지 기술에 대한 기존의 연구 결과들은 대개 2차 사용자가 경험하는 페이딩 현상이 통계적으로 독립이라는 가정에 기초하고 있다. 그러나 실제 환경에서는 지리적으로 이웃한 2차 사용자 단말은 유사한 페이딩 현상을 겪기 때문에 이 가정이 유효하지 않을 수 있다^{[6],[10],[11]}. 이 논문에서는 이러한 현상이 협력 스펙트럼 감지 시스템에 어느 정도의 영향을 미치는지를 분석하고자 한다. 과거에 페이딩의 상관 관계를 고려한 연구로는 [10], [11]이 있는데, [11]의 경우에는 연판정을 전제로 하여 협력 스펙트럼 감지에 참여하는 2차 사용자가 많아질 때 감지 성능의 접근적 특성을 분석한 것이고, [10]의 경우에는 경판정 융합의 경우를 대상으로 페이딩의 상관 관계에 따른 영향을 살펴본 것으로 컴퓨터 실험을 사용하여 성능을 평가하였으며 특정 페이딩 모델을 전제로 한 연구 결과이다.

이 논문에서는 지리적으로 이웃한 2차 사용자의 국부 스펙트럼 감지 결과 사이에 일정한 상관 관계가 존재하며, 그렇지 않은 경우에는 통계적으로 독립인 경우를 대상으로 하여 협력 스펙트럼 감지 방식의 성능을 수학적으로 분석한 결과를 제시하고자 한다. 이때 융합 규칙으로는 AND 규칙과 OR 규칙을 고려하였다. 이 결과는 수학적 분석에 의한 것이라는 점에서 이점이 있으며, 2차 사용자의 국부 스펙트럼 감지 결과 사이의 상관 정도만을 설정한 뒤 스펙트럼 감

지 성능을 분석한 것이기 때문에 특정 페이딩 모델에 종속된 결과가 아니라는 장점을 갖는다.

이 논문은 1절의 서론에 이어 2절에서는 논문에서 다루고자 하는 시스템의 구성을 소개한다. 그리고 3절에서는 융합 규칙으로 AND와 OR 규칙을 사용하는 협력 스펙트럼 감지 방식의 성능을 수학적으로 분석하고, 이를 이용한 분석 사례를 제시한다. 그리고 마지막으로 4절에서 결론을 맺는 형태로 구성되어 있다.

II. 시스템 구성

이 논문에서 다루고자 하는 시스템은 N 명의 2차 사용자 단말기와 융합 센터로 구성된 인지 무선 네트워크이다. 그리고 N 명의 2차 사용자 중에서 인지 무선 네트워크의 외곽에 위치한 K 명의 2차 사용자가 협력 스펙트럼 감지에 참여하는 것으로 설정하였다. 일반적으로 1차 사용자 단말기는 인지 무선 네트워크의 외부에 위치하기 때문에 2차 사용자 단말기 간의 거리를 일정 수준 이상으로 확보하면서 1차 사용자의 활동을 탐지하기 위해서는 인지 무선 네트워크의 가장자리에 있는 2차 사용자가 협력 스펙트럼 감지에 참여하는 것이 적절하다. 협력 스펙트럼 감지에 참여하는 2차 사용자가 지나치게 많아지면 이웃하는 2차 사용자의 국부 스펙트럼 감지 결정 사이의 상관 정도가 커지게 되어 협력 스펙트럼 감지 성능의 개선폭이 줄어드는 동시에 스펙트럼 감지 결과를 전달하는데 따른 추가 부담이 증가한다는 점을 감안하여 인지 무선 네트워크의 테두리에 있는 2차 사용자만으로 협력 스펙트럼 감지를 수행하는 것으로 설정하였다. 예를 들어, 융합 센터가 관리하는 지역의 모양이 원의 형태라면 이 경우 협력 스펙트럼 감지에 참여하는 2차 사용자 단말은 원주에 위치하고, 어떤 임의의 2차 사용자 단말에 대하여 이웃하는 2차 사용자 단말은 항상 2개가 된다. 지금부터 언급하는 2차 사용자는 모두 스펙트럼 감지에 참여하는 2차 사용자를 가리키는 것으로 한다.

개별 2차 사용자는 1차 사용자의 활동 유무에 대한 판단을 한 뒤, 이를 융합 센터에 전달하며, 융합 센터는 이를 토대로 1차 사용자의 활동 유무를 최종적으로 판단한다. 이때 지역적으로 이웃한 2차 사용자의 국부 스펙트럼 감지 결정 사이에는 일정한 상관 관계가 존재하고, 그렇지 않은 경우에는 통계

적으로 독립인 것으로 가정한다. [6], [10], [11]에서 언급한 바와 같이 페이딩의 상관 정도는 거리가 증가함에 따라 지수적으로 감소하는 것으로 알려져 있다. 이 논문에서는 이러한 특성을 감안하여 이웃한 2차 사용자 단말기들은 일정한 상관 정도의 페이딩을 경험하고, 이웃이 아닌 경우에는 상관 정도가 0인 것으로 설정하였다. 그리고 1차 사용자의 송신기와 2차 사용자의 단말기 사이에 존재하는 채널은 레일리 페이딩 특성을 가지는 것으로 가정하였다. 또한 2차 사용자 단말기는 전송 오류가 없는 이상적인 채널을 사용하여 스펙트럼 감지 결정을 융합 센터로 전달하는 것으로 가정하였다.

개별 2차 사용자가 수행하는 스펙트럼 감지 활동은 일종의 가설 검정 문제로서 여기에는 2가지 가설이 사용된다. 첫 번째 가설은 1차 사용자가 활동하지 않는다는 가설로서 이를 H_0 로 나타내고, 두 번째 가설은 1차 사용자가 활동한다는 가설로서 H_1 으로 표시한다. 그러면 i 번째 2차 사용자 단말기가 수신하는 신호 $r_i(t)$ 는 어느 가설이 유효한가에 따라 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$r_i(t) = \begin{cases} \alpha_i s(t) + w_i(t) & H_1 \\ w_i(t) & H_0 \end{cases} \quad (1)$$

위 식에서 $s(t)$ 은 1차 사용자 신호를 나타내고, $w_i(t)$ 는 평균이 0이고 전력 스펙트럼 밀도가 $N_0/2$ 인 백색 가우시안 잡음을 나타내며, α_i 는 1차 사용자의 송신기와 2차 사용자 단말기 사이에 존재하는 통신 채널의 채널 이득을 나타내는데, 스펙트럼 감지 기간 T 동안에는 그 값이 변하지 않고 일정하다고 가정한다.

2차 사용자가 사용하는 스펙트럼 감지 방법으로는 에너지 검파 방식을 사용하는 것으로 가정한다. 에너지 검파에 사용되는 수신 신호의 대역폭을 W 라 하고, 그 신호의 측정 길이를 T 초라고 할 때, α_i 가 주어져 있다면 어느 가설이 유효한가에 따라 i 번째 2차 사용자가 추출한 에너지 y_i 의 통계적 분포는 다음과 같이 표현할 수 있는 것으로 알려져 있다⁵⁾.

$$y_i \sim \begin{cases} \chi_{2TW}^2 & H_0 \\ \chi_{2TW}^2(2\gamma_i) & H_1 \end{cases} \quad (2)$$

위 식에서 γ_i 는 수신한 1차 사용자의 에너지와 N_0

의 비율을 가리키며, χ_{2TW}^2 는 자유도가 $2TW$ 인 central chi-square 분포를 나타내고, $\chi_{2TW}^2(2\gamma_i)$ 는 자유도가 $2TW$ 이고 noncentral parameter가 $2\gamma_i$ 인 noncentral chi-square 분포를 나타낸다. 그리고 레일리 페이딩 환경에서 γ_i 는 지수 분포를 갖기 때문에, 이를 이용하여 2차 사용자 차원에서 달성할 수 있는 오류 정보 확률 P_{FA} 과 검파 확률 P_D 을 계산하면 다음과 같다¹²⁾.

$$P_{FA} = \frac{\Gamma(m, \lambda/2)}{\Gamma(m, 0)} \quad (3)$$

$$P_D = e^{-\lambda/2} \sum_{k=0}^{m-2} \frac{1}{k!} \left(\frac{\lambda}{2}\right)^k + \left(\frac{1+\bar{\gamma}}{\bar{\gamma}}\right)^{m-1} \times \left\{ e^{-\frac{\lambda}{2(1+\bar{\gamma})}} - e^{-\frac{\lambda}{2}} \sum_{k=0}^{m-2} \frac{1}{k!} \left(\frac{\lambda\bar{\gamma}}{2(1+\bar{\gamma})}\right)^k \right\} \quad (4)$$

위 식에서 m 은 TW 의 값을 근사적으로 표현한 정수이고, $\bar{\gamma}$ 는 γ_i 의 평균값을 의미하며, λ 는 검파 임계값을 가리킨다. 그리고 $\Gamma(a, b) \equiv \int_b^{\infty} t^{a-1} e^{-t} dt$ 로 정의한다.

III. 성능 분석

i 번째 2차 사용자의 국부 스펙트럼 감지 결정을 u_i 로 나타내고, 이 값을 1차 사용자가 활동한다고 판단되었을 때는 1로, 그렇지 않을 때는 0이라고 정하기로 한다. 그리고 가설 H_n 이 유효한 상황에서 u_i 와 u_j 의 통계적 상관 정도를 나타내는 상관 계수 ρ_{ij, H_n} 를 다음과 같이 정의한다¹³⁾.

$$\rho_{ij, H_n} = \frac{E_{H_n}[u_i u_j] - E_{H_n}[u_i] E_{H_n}[u_j]}{\sqrt{\{E_{H_n}[u_i^2] - E_{H_n}^2[u_i]\} \{E_{H_n}[u_j^2] - E_{H_n}^2[u_j]\}}} \quad (5)$$

위 식에서 $E_{H_n}[\cdot]$ 는 가설 H_n 이 유효하다는 조건에서 평균 연산을 의미한다.

가설 H_0 가 유효한 상황에서는 식 (1)에서 보듯이 페이딩 영향이 없고 잡음만 있기 때문에 이를 감안할 때 $\rho_{ij, H_0} = 0$ 이 되어야 한다. 그리고 2절에서 가정한 바와 같이 H_1 가설이 유효한 환경에서는 이웃

한 2차 사용자 단말기들은 일정한 상관 정도의 페이딩을 경험하고 그렇지 않은 경우에는 상관 정도가 0인 것으로 설정하였는데, 여기에서 지리적으로 이웃하다는 것은 이웃한 두 사용자의 번호 i, j 의 차이가 1이라는 의미이기 때문에, 이를 종합하여 2차 사용자의 국부 스펙트럼 감지 결정 사이의 통계적 상관 관계를 수학적으로 표현하면 다음과 같은 형태가 된다.

$$\rho_{ij,H_n} = \begin{cases} \rho & |i-j|=1 \text{ 이고 } n=1 \text{ 일때} \\ 0 & n=0 \text{ 일때} \end{cases} \quad (6)$$

위 식에서 ρ 는 그 크기가 1 이하인 임의의 실수이다.

u_i 의 정의에 따르면 $u_i^2 = u_i$ 라는 관계가 성립하기 때문에, 이를 이용하면 식 (5)로부터 다음과 같은 표현을 유도할 수 있다.

$$\begin{aligned} E_{H_n}[u_i u_j] \\ = \rho_{ij,H_n} \sqrt{(1-E_{H_n}[u_i])(1-E_{H_n}[u_j])E_{H_n}[u_i]E_{H_n}[u_j]} \\ + E_{H_n}[u_i]E_{H_n}[u_j] \end{aligned} \quad (7)$$

개별 2차 사용자 단말이 달성하는 1차 사용자 검파 확률을 P_D 라고 하면, 앞에서 가정한 바와 같이 2차 사용자 단말은 스펙트럼 감지에 동일한 검파 임계값을 채용하기 때문에 평균 연산자의 정의를 이용하면 $E_{H_n}[u_i] = P_D$ 가 되고, 이를 식 (7)에 적용하면 $E_{H_n}[u_i u_j]$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_{H_n}[u_i u_j] = \rho_{ij,H_n} P_D(1-P_D) + P_D^2 \quad (8)$$

또한 평균 연산자의 정의를 이용하면 $E_{H_n}[u_i u_j]$ 를 다음과 같이 확률로도 표현할 수 있다.

$$E_{H_n}[u_i u_j] = P_{H_n}[u_i = 1, u_j = 1] \quad (9)$$

위 식에서 $P_{H_n}[A]$ 는 가설 H_n 이 유효한 상황에서 사건 A 가 발생할 확률을 표시한 것이다.

3.1 AND 융합 규칙을 사용하는 경우

AND 융합 규칙을 사용하여 달성할 수 있는 검파 확률을 $P_{D,AND}$ 라고 하면, AND 융합 규칙은 모든 국부 결정이 1일때만 최종 결정을 1로 하고 그

이외의 경우에는 0으로 처리하기 때문에 $P_{D,AND}$ 를 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{D,AND} = P_{H_1}[u_1 = 1, u_2 = 1, \dots, u_K = 1] \quad (10)$$

여기에 식 (6)으로 표현한 상관 관계를 적용하면 $P_{D,AND}$ 는 다음과 같이 전개가 가능하다.

$$\begin{aligned} P_{D,AND} \\ = P_{H_1}[u_K = 1] \prod_{i=1}^{K-1} P_{H_1}[u_i = 1 | u_{i+1} = 1] \end{aligned} \quad (11)$$

그리고 조건부 확률의 정의를 활용하면 $P[u_i = 1, u_{i+1} = 1] = P[u_i = 1 | u_{i+1} = 1]P[u_{i+1} = 1]$ 이므로 식 (11)은 다음과 같이 바꾸어 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{D,AND} \\ = P_{H_1}[u_K = 1] \prod_{i=1}^{K-1} \frac{P_{H_1}[u_i = 1, u_{i+1} = 1]}{P_{H_1}[u_{i+1} = 1]} \end{aligned} \quad (12)$$

또한 식 (8)과 식 (9)를 식 (12)에 적용하면 $P_{D,AND}$ 는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$P_{D,AND} = \frac{\{\rho P_D(1-P_D) + P_D^2\}^{K-1}}{P_D^{K-2}} \quad (13)$$

식 (13)에서 상관 계수 ρ 의 값이 0이 되는 경우는 $P_{D,AND} = P_D^K$ 가 되는데, 상관 계수 $\rho = 0$ 이라는 것은 모든 2차 사용자의 감지 결정이 통계적으로 독립이라는 것을 의미하므로 이 경우에 대한 $P_{D,AND}$ 의 수학적 표현이 적절하다는 것을 확인할 수 있으며, 이는 식 (13)의 유효성을 뒷받침하는 사례라고 할 수 있다.

한편 가설 H_0 가 유효한 상황에서는 모든 2차 사용자의 감지 결정이 통계적으로 독립이므로 AND 융합 과정을 반영한 최종 오류 경보 확률 $P_{FA,AND}$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{FA,AND} = P_{FA}^K \quad (14)$$

만약 1차 사용자 활동 유무에 대한 검파 확률이 주어진다면, 식 (13)을 이용하여 2차 사용자의 스펙

트럼 감지에 대한 검파 확률 P_D 를 결정할 수 있고 이와 함께 식 (4)로부터 검파 임계값 λ 또한 유추할 수 있다. 그리고 이를 이용하면 식 (3)과 식 (14)로부터 최종 오류 경보 확률 $P_{FA,AND}$ 를 알아낼 수 있다.

3.2 OR 융합 규칙을 사용하는 경우

OR 융합 규칙의 경우에는 국부 결정 중에서 어느 하나라도 1이면 최종 결정을 1로 처리하기 때문에, 융합 과정을 반영한 최종 검파 확률 $P_{D,OR}$ 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{D,OR} = 1 - P_{H_1}[u_1 = 0, u_2 = 0, \dots, u_K = 0] \quad (15)$$

식 (12)를 유도할 때와 유사한 과정을 거치면 $P_{H_1}[u_1 = 0, u_2 = 0, \dots, u_K = 0]$ 는 다음과 같이 바뀌어 표현할 수 있다.

$$P_{H_1}[u_1 = 0, u_2 = 0, \dots, u_K = 0] = P_{H_1}[u_K = 0] \prod_{i=1}^{K-1} \frac{P_{H_1}[u_i = 0, u_{i+1} = 0]}{P_{H_1}[u_{i+1} = 0]} \quad (16)$$

그리고 전체 확률 정리^[14]를 이용하면 $P_{H_1}[u_{i+1} = p]P_{H_1}[u_i = p, u_{i+1} = q]$ 은 각각 다음과 같이 전개할 수 있다.

$$P_{H_1}[u_{i+1} = p] = 1 - P_{H_1}[u_{i+1} = 1 - p] \quad (17)$$

$$P_{H_1}[u_i = p, u_{i+1} = q] = P_{H_1}[u_{i+1} = q] - P_{H_1}[u_i = 1 - p, u_{i+1} = q] \quad (18)$$

위 식에서 p, q 는 0 또는 1을 나타낸다. 이런 관계를 활용하면 식 (16)에 포함된 $P_{H_1}[u_{i+1} = 0]$ 나 $P_{H_1}[u_i = 0, u_{i+1} = 0]$ 을 $P_{H_1}[u_i = 1], P_{H_1}[u_{i+1} = 1], P_{H_1}[u_i = 1, u_{i+1} = 1]$ 로 표현할 수 있다. 따라서 최종 검파 확률 $P_{D,OR}$ 는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$P_{D,OR} = 1 - \frac{\{1 - 2P_D + \rho P_D(1 - P_D) + P_D^2\}^{K-1}}{(1 - P_D)^{K-2}} \quad (19)$$

AND 융합 규칙을 사용하는 경우와 마찬가지로

OR 융합 규칙의 경우에도 상관 계수 ρ 가 0인 경우는 $P_{D,OR} = 1 - (1 - P_D)^K$ 가 되어, 모든 2차 사용자의 스펙트럼 감지 결정이 독립적인 경우의 검파 확률과 일치한다는 것을 확인할 수 있다.

가설 H_0 가 유효한 상황에서 최종 오류 경보 확률 $P_{FA,OR}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{FA,OR} = 1 - (1 - P_{FA})^K \quad (20)$$

이 경우에도 AND 융합 규칙을 사용하는 경우에서 기술한 바와 마찬가지로 목표로 하는 최종 검파 확률 $P_{D,OR}$ 이 주어지면 최종 오류 경보 확률 $P_{FA,OR}$ 를 결정할 수 있다.

IV. 수치 분석 사례

3절에서 도출한 수식을 토대로 상관 계수 ρ 가 협력 스펙트럼 감지 성능에 어떠한 영향을 미치는지를 살펴보고자 한다. 먼저 분석 환경을 나타내는 파라미터로 목표 검파 확률 P_D 를 0.9로 하고 $m = 5, \bar{\gamma} = 0$ dB 설정하였다. 그리고 협력 스펙트럼 감지에 참여하는 2차 사용자들 간에는 일정 거리 이상을 확보하여 국부 스펙트럼 감지 결정간의 상관 정도를 낮은 수준으로 유지하는 것이 바람직하고 이때 식 (6)의 표현이 적절하기 때문에 상관 계수 ρ 의 범위를 0 ~ 0.5인 경우로 한정하여 수치 분석 결과를 살펴보고자 한다.

그림 1은 K 명의 2차 사용자가 협력 스펙트럼 감지에 참여할 때 상관 계수 ρ 에 따라서 검파 임계값 λ 가 어떻게 달라지는지를 보여주고 있다. AND

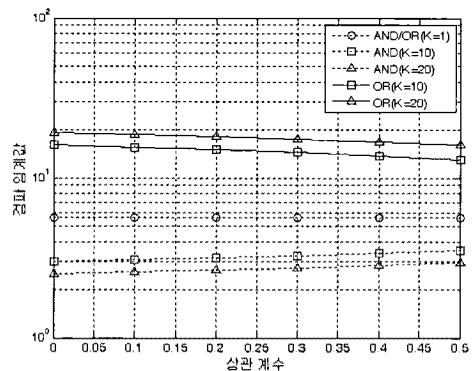


그림 1. 상관 계수에 따른 검파 임계값

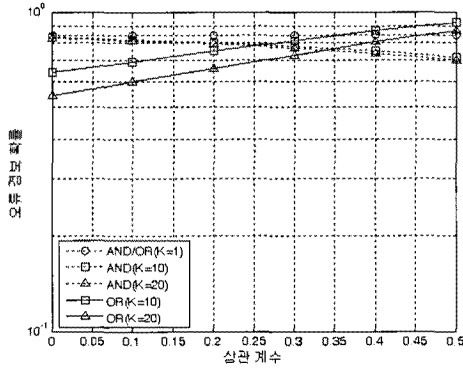


그림 2. 상관 계수에 따른 오류 정보 확률

융합 규칙을 사용하는 경우에는 일정한 검파 확률을 달성하기 위해 검파 임계값 λ 를 K 가 증가함에 따라 감소시켜야 하고, OR 융합 규칙을 사용하는 경우에는 그 반대인 것으로 알려져 있는데, 이러한 현상을 그림에서 확인할 수 있다. 그리고 상관 계수 ρ 가 증가하면 통계적으로 독립인 스펙트럼 감지 결정의 개수가 실질적으로 줄어드는 것으로 생각할 수 있기 때문에, 임의의 K 에 대하여 상관 계수 ρ 가 증가하면 AND 융합 규칙의 경우에는 검파 임계값 λ 를 높여야 하고, OR 규칙에 대해서는 λ 를 낮추어야 하는 것을 예상할 수 있는데, 이를 그림에서도 확인할 수 있다.

그림 2는 K 명의 2차 사용자가 협력 스펙트럼 감지에 참여할 때 상관 계수 ρ 에 따라서 최종 오류 정보 확률이 어떻게 달라지는 지를 보여주고 있다. 이미 그림 1의 결과를 통해서 AND 융합 규칙을 사용하는 경우 임의의 K 에 대하여 상관 계수 ρ 가 증가하면 검파 임계값이 커진다는 것을 확인하였다. 이는 상관 계수 ρ 가 증가하면 최종 오류 정보 확률 $P_{FA,AND}$ 이 작아진다는 것을 의미하는데, 이를 그림에서 확인할 수 있다. 그리고 OR 융합 규칙을 사용하는 경우에도 유사한 설명을 할 수 있다.

V. 결론

이 논문에서는 지리적으로 이웃한 2차 사용자의 스펙트럼 감지 결정 사이에 일정한 상관 관계가 있고, 그 이외의 경우에는 통계적으로 독립인 경우에 대하여 협력 스펙트럼 감지 방식의 성능을 수학적으로 분석하였다. 이때 융합 방식으로는 AND 규칙과 OR 규칙을 고려하였다. 이 논문에서 제시한 분

석 결과는 무선 인지 시스템의 스펙트럼 감지 방안을 설계하는데 있어 유용한 자료가 될 것으로 예상된다.

참고 문헌

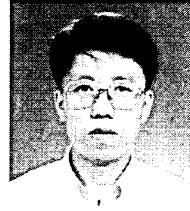
- [1] J. Mitola and G. Q. Maguire, "Cognitive radio: making software radios more personal," *IEEE Pers. Commun.*, vol. 6, no. 4, pp. 13-18, Aug. 1999.
- [2] T. Yucek and H. Arslan, "A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 11, no. 1, pp. 116-130, 2009.
- [3] A. Ghasemi and E. S. Sousa, "Spectrum sensing in cognitive radio networks: requirements, challenges and design trade-offs," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 46, no. 4, pp. 32-39, April 2008.
- [4] S. Haykin, D. J. Thomson, and J. H. Reed, "Spectrum Sensing for Cognitive Radio," *Proc. IEEE*, vol. 97, no. 5, pp. 849-877, May 2009.
- [5] A. Ghasemi and E. S. Sousa, "Collaborative spectrum sensing for opportunistic access in fading environments," *IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, pp. 131-136, Nov. 2005.
- [6] S. M. Mishra, A. Sahai, and R. W. Brodersen, "Cooperative Sensing among Cognitive Radios," *IEEE International Conference on Communications*, pp. 1658-1663, June 2006.
- [7] E. Peh and Ying-Chang Liang, "Optimization for Cooperative Sensing in Cognitive Radio Networks," *IEEE Wireless Communications and Networking Conference*, pp. 27-32, March 2007.
- [8] W. Zhang, R. K. Mallik, and K. B. Letaief, "Cooperative Spectrum Sensing Optimization in Cognitive Radio Networks," *IEEE International Conference on Communications*, pp. 3411-3415, May 2008.
- [9] Z. Quan, S. Cui, and A. H. Sayed, "Optimal Linear Cooperation for Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks," *IEEE J. Sel. Topics*

Signal Process., vol. 2, no. 1, pp. 28-40, Feb. 2008.

- [10] E. Visotsky, *et. al.*, "On collaborative detection of TV transmissions in support of dynamic spectrum sharing," *IEEE International Symposium on New Frontiers in Dynamic Spectrum Access Networks*, pp. 338-345, Nov. 2005.
- [11] A. Ghasemi and E. S. Sousa, "Asymptotic performance of collaborative spectrum sensing under correlated log-normal shadowing," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 11, no. 1, pp. 34-36, Jan. 2007.
- [12] F. F. Digham, M. S. Alouini, and M. K. Simon, "On the energy detection of unknown signals over fading channels," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 55, no. 1, pp. 21-24, Jan. 2007.
- [13] E. Darkopoulos and C. C. Lee, "Optimum Multisensor Fusion of Correlated Local Decisions," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, vol. 27, no. 4, pp. 593-606, July 1991.
- [14] A. Papoulis, *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes, 2nd Ed.* McGraw-Hill, 1984.

임 창 현 (Chang Heon Lim)

종신회원



1986년 2월 서울대학교 전자공학과 (공학사)

1988년 8월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)

1993년 8월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)

1994년 3월~현재 부경대학교 전

자공학과 정교수

<관심분야> 통신, 레이더 신호 처리