

상관된 국부 결정을 사용하여 협력 스펙트럼 감지를 하는 인지 무선 네트워크의 전송 용량

중신회원 임 창 현*

Throughput of Cognitive Radio Network with Collaborative Spectrum Sensing Using Correlated Local Decisions

Chang-Heon Lim* *Lifelong Member*

요 약

협력 스펙트럼 감지(collaborative spectrum sensing) 방식은 지역적으로 분산되어 있는 다수의 부 사용자(secondary user)들이 협력하여 주 사용자(primary user)의 활동을 감지하는 방법으로, 페이딩으로 인해 발생하는 검파 성능의 손실을 상당히 줄일 수 있는 것으로 알려져 있다. 현재까지 이 방식에 대한 대부분의 연구는 개별 부 사용자들이 내린 스펙트럼 감지 결정이 통계적으로 서로 독립이라고 가정한 것에 기초한 것이다. 그러나 실제 상황에서는 음영 효과(shadowing effect)로 인해 이 가정이 유효하지 않은 경우가 발생한다. 본 논문에서는 부 사용자들이 직선상에 일정 간격으로 배치되고, 이웃하는 부 사용자의 스펙트럼 감지 결정사이에서만 상관 관계가 존재하는 경우를 대상으로 하여, 상관 정도가 협력 스펙트럼 감지 방식의 성능에 미치는 영향과 그에 따른 인지 무선 시스템의 전송 용량 변화를 분석하고자 한다. 이때 개별 부 사용자의 결정을 융합하는 규칙으로는 AND 규칙과 OR 규칙을 고려하였다. 분석 결과 AND 융합 규칙을 사용하는 경우가 OR 규칙을 사용하는 경우보다 전송 용량 측면에서 우수하다는 점을 확인할 수 있었다.

Key Words : cognitive radio, collaborative spectrum sensing, correlated decision, fusion rule

ABSTRACT

Collaborative spectrum sensing allows secondary users scattered in location to work together to detect the activity of primary users and has been shown to significantly reduce the performance degradation due to fading phenomenon. Most previous works on collaborative spectrum sensing are based on the assumption that local spectrum sensing decisions of secondary users are statistically independent. However, it may not hold in some practical situations with shadowing effect. In this paper, we consider the case that the secondary users are evenly spaced in the form of a linear array and only adjacent secondary users are statistically correlated, and analyze the effect of the statistical correlation on the performance of collaborative spectrum sensing and the throughput of a cognitive radio network. Here we assumed the AND and OR fusion rules for combining the local decisions of secondary users. The analysis showed that the AND fusion rule achieves higher throughput than the OR fusion rule.

* 부경대학교 전자공학과 (chlim@pknu.ac.kr)

논문번호 : KICS2009-11-574, 접수일자 : 2009년 11월 12일, 최종논문접수일자 : 2010년 6월 29일

1. 서 론

지난 20여년간 무선 통신 서비스는 그 규모나 종류 면에서 괄목할만한 성장을 거듭해왔다. 이동 전화나 무선랜 등이 그 대표적인 사례이며, 앞으로도 새로운 서비스들이 등장할 것으로 보인다. 그러나 이를 뒷받침하기 위해서는 그만큼 많은 양의 주파수 자원이 필요하다. 하지만 현실적으로 사용 가능한 주파수 대역은 제한되어 있는 형편이라 현재의 추세를 유지한다면 머지 않아 주파수 고갈 문제에 부딪힐 것으로 예상된다.

그런데 최근 FCC에서 이미 할당된 주파수 대역의 사용 현황을 조사한 바가 있는데, 그 결과에 따르면 해당 대역의 이용 효율이 대부분 예상보다 상당히 낮은 것으로 나타났다^[1]. 이는 주파수 부족 현상이 기본적으로 주파수 자체가 한정된 자원이기 때문에 발생하는 것이기는 하지만, 이미 할당된 자원의 이용 효율이 낮은 데에도 기인한다는 것을 말해주고 있다. 따라서 주파수 자원 이용 효율을 높이는 것이 주파수 자원 부족 문제를 해결하기 위한 현실적인 방안이 될 수 있음을 알 수 있다.

주파수 자원의 이용 효율이 낮은 주요 원인 중의 하나는 사용자가 주파수 대역을 독점적으로 사용하는 데 그 원인이 있다. 이 방식에 따르면 주 사용자가 자신에게 할당된 주파수 대역을 사용하지 않는 순간이 발생하더라도 이를 다른 사용자가 활용할 수 없어 결과적으로 주파수 이용 효율이 낮아질 수 있다. 따라서 현재의 독점적인 주파수 할당 방식을 여러 사용자가 해당 주파수 대역을 공유하는 방식으로 전환한다면 주파수 이용 효율을 획기적으로 높일 수 있다^[2]. 여기에서 공유한다는 것은 해당 주파수 대역에 대한 사용 허가를 보유하고 있는 주 사용자가 해당 대역을 사용하는데 있어서 불이익을 받지 않는다는 전제하에서 다른 사용자, 즉 부 사용자(secondary user)에게 해당 대역을 사용할 기회를 제공하는 것을 의미한다.

인지 무선(cognitive radio) 시스템^[3]은 실시간으로 주변 전파 환경을 인식하고 그에 따라 시스템의 동작 방식을 변경할 수 있는 기술로서 앞서 언급한 주파수 공유 방식을 실현할 수 있는 유력한 기술로 인식되고 있다. 인지 무선 시스템의 특성상 가장 핵심적인 기능은 스펙트럼 감지(spectrum sensing) 기능인데, 부 사용자는 이를 사용하여 임의의 주파수 채널을 주 사용자(primary user)가 사용하고 있는지 여부를 파악할 수 있다. 현재까지 알려진 스펙트럼 감지 방식으로는 정합 필터(matched filter)를 이용한 방법, 에너지를

사용한 방법, 그리고 신호의 주기성(cyclostationarity)을 이용한 방법이 있다^[4]. 그 중에서 에너지를 사용한 검파 방식은 주 사용자 신호에 대한 정보를 많이 필요로 하지 않고 검파 구조가 간단하기 때문에 많은 관심을 모으고 있다.

협력 스펙트럼 감지^[5,6]는 다수의 부 사용자(secondary user)들이 서로 협력하여 스펙트럼 감지를 수행하는 방법으로, 개별 부 사용자 단말에서 수행한 스펙트럼 감지 결과를 융합 센터에서 모은 후에, 정해진 융합 규칙에 따라 최종 감지 결정을 도출하는 방식이다. 이 방식의 경우 공간적으로 분산되어 있는 부 사용자 단말들은 서로 독립적인 채널 감쇠 현상을 경험하기 때문에 부 사용자들이 개별적으로 스펙트럼 감지를 수행하는 경우보다 우수한 스펙트럼 감지 성능을 달성할 수 있는 것으로 알려져 있다. 협력 스펙트럼 감지 방식에 관한 현재까지의 연구는 대부분 독립적인 페이딩을 전제로 하고 있다. 그러나 실제 환경에서는 공간적으로 인접한 부 사용자 단말의 경우 통계적으로 연관성이 있는 페이딩의 영향을 받기 때문에 부 사용자가 내린 스펙트럼 감지 결정들 사이에 통계적 연관성이 존재할 수 있다. 이런 연관성을 고려한 기존의 연구로는 [7-12]이 있다. 이 중에서 [7]은 경관정 융합(hard decision-combining)과 연관정 융합(soft decision-combining) 모두를 다루었지만, 경관정의 경우에는 시뮬레이션을 통한 평가 결과만을 제시하고 있으며, [8]은 선형 2차 검파기에 기반을 둔 준최적 융합 규칙을 제안하고, 시뮬레이션을 통해 성능을 평가하였다. 그리고 [9]는 경관정 규칙의 형태에 따라 통계적 연관성이 유리하게 작용하는 경우와 그렇지 않은 경우가 있음을 분석하였다. 한편, [10-12]은 연관정 융합을 사용하는 경우와 관련된 연구 결과로서, [10]에서는 연관정 융합 방법에 대한 점근적 성능만을 제시하고 있으며, [11, 12]의 경우에는 융합 센터가 개별 부 사용자 단말이 넘겨 준 측정 데이터를 융합한 결과에 대하여 페이딩의 통계적 연관성을 고려하여 통계적으로 모델링하는 연구 결과를 담고 있다. 일반적으로 연관정 융합 방법은 경관정 융합 방식에 비해 그 성능이 우수하지만 이를 수행하기 위해서는 개별 부 단말기와 융합 센터 사이에 전송 용량이 큰 전송 채널을 확보해야 한다는 단점이 있어 현재 많은 관심이 경관정 융합에 집중되어 있는 추세이다.

이런 점을 고려하여 본 논문에서는 경관정 융합을 사용하는 것을 전제로 하여 개별 단말기의 스펙트럼 감지 결정 사이에 통계적인 상관 관계가 존재할 때, 그에 따른 스펙트럼 감지 성능과 인지 무선 네트워크

의 전송 용량을 분석하고자 한다. 이 내용은 부 사용자의 국부 스펙트럼 결정 사이의 상관 정도만을 설정한 뒤에 스펙트럼 감지 성능을 분석한 것이기 때문에 특정 페이딩 모델에 종속된 결과가 아니고, 시뮬레이션이 아닌 분석적인 방법을 통해 도출한 결과이며, 이 결과를 이용하여 전송 용량 분석을 하였다는 점에서 기존의 연구와 차이점을 갖는다.

본 논문에서는 I장 서론에 이어 II장에서 본 논문에서 가정하는 스펙트럼 감지 시스템 모델에 대해서 기술하고, III장에서는 부 사용자들의 스펙트럼 감지 결정 간에 상관 정도가 협력 스펙트럼 감지 시스템의 성능 및 인지 무선 네트워크의 전송 용량에 미치는 영향을 분석한다. 그리고 IV장에서는 이에 대한 수치 분석 사례를 제시하고, 마지막으로 V장에서 결론을 맺는다.

II. 시스템 구성

본 논문에서는 M 명의 부 사용자 단말기와 융합 센터로 구성된 인지 무선 네트워크를 대상으로 M 명의 부 사용자 중에서 인지 무선 네트워크의 외곽에 위치한 K 명의 부 사용자가 협력 스펙트럼 감지에 참여하는 것으로 설정하였다. 일반적으로 주 사용자 단말기는 인지 무선 네트워크의 외부에 위치하기 때문에 주 사용자의 활동을 탐지하기 위해서는 인지 무선 네트워크의 가장자리에 있는 부 사용자가 협력 스펙트럼 감지에 참여하는 것이 적절하다. 그리고 부 사용자간의 거리를 일정 수준 이상 확보하여 이웃하는 부 사용자의 국부 스펙트럼 감지 결정 사이의 상관도를 낮추는 것이 협력 스펙트럼 감지 성능을 크게 훼손하지 않으면서 부 사용자와 융합 센터간의 전송 속도를 줄이는데 효과적이다. 그러나 그렇다고 해서 간격을 너무 넓히면 탐지가 곤란한 영역이 생길 수 있으므로 간격을 적절하게 설정하는 것이 바람직하다. 일반적으로 융합 센터가 관리하는 지역의 모양은 둥근 원의 형태가 되는데 이 경우 협력 스펙트럼 감지에 참여하는 부 사용자 단말은 원주에 위치하고, 어떤 임의의 부 사용자 단말에 대하여 이웃하는 부 사용자 단말은 항상 2개가 될 것이다. 편의상 지금부터 언급하는 부 사용자는 모두 스펙트럼 감지에 참여하는 부 사용자를 가리키는 것으로 한다.

개별 부 사용자는 주 사용자의 활동 유무에 대한 판단을 한 뒤, 이를 융합 센터에 전달하며, 융합 센터는 이를 토대로 주 사용자의 활동 유무를 최종적으로 판단한다. [6, 7]에서 언급한 바와 같이 페이딩의 상관

정도는 거리가 증가함에 따라 지수적으로 감소하는 것으로 알려져 있다. 이 논문에서는 이러한 특성을 감안하여 이웃한 부 사용자 단말기들은 일정한 상관 정도의 페이딩을 경험하고, 이웃이 아닌 경우에는 상관 정도가 0인 것으로 설정하였다. 그리고 주 사용자의 송신기와 부 사용자의 단말기 사이에 존재하는 채널은 레일리 페이딩 특성을 가지는 것으로 가정하였다. 또한 부 사용자 단말기는 전송 오류가 없는 이상적인 채널을 사용하여 스펙트럼 감지 결정을 융합 센터로 전달하는 것으로 가정하였다. 그리고 융합 센터에서는 이를 융합 규칙에 따라 융합하여 최종 결정을 내리는 방식을 다루고 있다. 이때 융합 규칙으로는 AND 융합 규칙과 OR 융합 규칙을 고려한다. 또한 개별 부 사용자의 단말은 동일한 스펙트럼 감지 성능을 갖는 것으로 가정한다.

스펙트럼 감지는 수신한 신호를 분석하여 주 사용자가 해당 채널을 사용하고 있는지 여부를 판단하는 활동인데, 이는 곧 통계학의 가설 검정 문제(hypothesis testing)로 볼 수 있다. 이 경우 생각해 볼 수 있는 두 가지 가설은 “주 사용자가 해당 채널을 사용하고 있다.”와 “그렇지 않다.”가 있는데, 이들을 편의상 각각 H_1 과 H_0 로 표기하기로 한다. 만약 부 사용자가 샘플링 주파수 f_s 의 속도로 수신 신호를 샘플링한다고 할 때, 해당 부 사용자가 n 번째로 수신한 신호를 $y(n)$ 이라고 표시하면, 이는 가설에 따라 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y(n) = \begin{cases} w(n) & \text{가설 } H_0 \\ s(n) + w(n) & \text{가설 } H_1 \end{cases} \quad (1)$$

위 식에서 $s(n)$ 은 주 사용자 신호의 n 번째 샘플을 의미하는 것으로 평균은 0이고 분산은 σ_p^2 인 통계적인 양이라고 가정한다. 그리고 $w(n)$ 은 n 번째 수신 잡음을 나타내는 것으로 평균이 0이고 분산은 σ_w^2 인 CSCG(circular symmetric complex gaussian) 잡음으로 가정한다. 그리고 $s(n)$ 과 $w(n)$ 은 서로 통계적으로 독립인 것으로 가정한다.

본 논문에서는 스펙트럼 감지 방식으로 신호의 에너지를 이용하는 방식을 사용하고자 한다. 이 때 개별 부 사용자가 수신한 신호의 시험 통계량(test statistic) Y 는 다음과 같이 정의한다.

$$Y = \frac{1}{N_s} \sum_{n=0}^{N_s-1} |y(n)|^2 \quad (2)$$

위 식에서 N_s 은 검파에 사용되는 수신 샘플의 개수를 가리키며 편의상 $N_s = \tau f_s$ 로 정의한다. 만약 N_s 이 충분히 크다면 중심 극한 정리(central limit theorem)에 따라 Y 는 정규 분포(normal distribution)에 근접하게 된다. 만약 주 사용자가 복소 PSK 변조 방식을 사용한다고 가정한다면 이 때 Y 는 가설에 따라 다음과 같은 확률 분포를 따르게 된다^[13].

$$Y \sim \begin{cases} N(\sigma_w^2, \frac{1}{N_s}\sigma_w^4) & \text{가설 } H_0 \\ N((\gamma+1)\sigma_w^2, \frac{1}{N_s}(2\gamma+1)\sigma_w^4) & \text{가설 } H_1 \end{cases} \quad (3)$$

위 식에서 $N(a,b)$ 는 평균이 a 이고, 분산은 b 인 정규 분포를 나타내며, $\gamma = \sigma_p^2/\sigma_w^2$ 는 주 사용자 신호 대 잡음비(signal to noise ratio)를 표시한다. 부 사용자 단말에서는 수신한 에너지의 크기를 검파 임계값 λ 와 비교하여 주 사용자의 해당 채널 사용 여부를 판단하게 되는데, 이 때 식 (3)에 주어진 확률 분포를 토대로 부 사용자별 오류 정보 확률(false alarm probability) P_{FA} 과 검파 확률(detection probability) P_D 를 구하면 다음과 같이 나타낼 수 있다^[13].

$$P_{FA} = P(Y > \lambda | H_0) = Q\left(\left(\frac{\lambda}{\sigma_w^2} - 1\right) \sqrt{N_s}\right) \quad (4)$$

$$P_D = P(Y > \lambda | H_1) = Q\left(\left(\frac{\lambda}{\sigma_w^2} - \gamma - 1\right) \sqrt{\frac{N_s}{2\gamma+1}}\right) \quad (5)$$

III. 성능 분석

주 사용자 검파 확률을 적정 수준 이상으로 유지하면서 전송 용량을 최대화 하는 최적의 스펙트럼 감지 시간을 [13]에서 도출한 바 있다. 본 논문에서는 주 사용자가 해당 채널을 사용하지 않을 때 확보할 수 있는 전송 용량만을 고려하기로 하며, 이에 따라 스펙트럼 감지 시간이 τ 일 때 전송 용량 $R(\tau)$ 를 다음과 같이 정의하고자 한다.

$$R(\tau) \equiv \frac{T-\tau}{T} C_0 P(H_0) (1 - P_{FA}) \quad (6)$$

위 식에서 T 는 전송 프레임의 길이를 시간으로 나타낸 것이고, P_{FA} 는 인지 무선 시스템의 오류 정보 확률을 나타내며, $P(H_0)$ 는 주 사용자가 스펙트럼을 사용하지 않을 확률을 가리킨다. 그리고 C_0 는 주 사용자가 존재하지 않는 상황에서 확보할 수 있는 채널 용량을 가리키는 것으로 부 사용자의 신호 전력을 σ_s^2 라고 하면 $C_0 = \log_2(1 + \sigma_s^2/\sigma_w^2)$ 로 나타낼 수 있다.

식 (1)에 나타낸 바와 같이 주 사용자의 활동 유무에 따라 수신 신호의 형태가 달라지는데, 가설 H_1 의 경우에는 페이딩 현상이 포함되기 때문에 부 사용자의 스펙트럼 감지 결과 사이에 상관 관계가 있을 수 있지만, 가설 H_0 의 경우에는 그렇지 않기 때문에 상관 관계가 없는 것으로 한다. 그리고 i 번째 부 사용자의 스펙트럼 감지 결정을 u_i 라 할 때, 이들이 갖는 값은 주 사용자가 활동하고 있다고 판단된 경우에는 1 그렇지 않은 경우에는 0인 것으로 설정한다. 가설 $H_n (n=0,1)$ 이 유효한 상황에서 임의의 부 사용자 i, j 의 스펙트럼 감지 결정 사이에 상관 관계를 다음과 같이 상관 계수 ρ_{i,j,H_n} 로 표현한다.

$$\rho_{i,j,H_n} = \frac{E_{H_n}[u_i u_j] - E_{H_n}[u_i] E_{H_n}[u_j]}{\sqrt{\{E_{H_n}[u_i^2] - E_{H_n}^2[u_i]\} \{E_{H_n}[u_j^2] - E_{H_n}^2[u_j]\}}} \quad (7)$$

위 식에서 $E_{H_n}[\cdot]$ 는 가설 H_n 이 유효한 상황에서 통계적 평균 연산을 가리킨다. 여기에 $u_i^2 = u_i$ 라는 관계를 적용하면 다음과 같은 관계식을 유도할 수 있다^[14].

$$E_{H_n}[u_i u_j] = \rho_{i,j,H_n} \sqrt{E_{H_n}[u_i] E_{H_n}[u_j] \{1 - E_{H_n}[u_i]\} \{1 - E_{H_n}[u_j]\}} + E_{H_n}[u_i] E_{H_n}[u_j] \quad (8)$$

개별 부 사용자는 동일한 스펙트럼 감지 성능을 갖는 것으로 가정하였기 때문에 동일한 검파 확률과 오류 정보 확률을 갖게 되는데, 이를 각각 P_D, P_{FA} 로 나타낸다면 가설 H_1 에서 $E_{H_1}[u_i] = P_D$ 이기 때문에 식 (8)은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$E_{H_1}[u_i u_j] = \rho_{i,j,H_1} P_D (1 - P_D) + P_D^2 \quad (9)$$

그러면 AND 융합 규칙과 OR 융합 규칙을 사용하는 경우에 대하여 협력 스펙트럼 감지 성능을 차례로 살펴보기로 한다.

3.1 AND 융합 규칙을 사용하는 경우

융합 규칙으로 AND 규칙을 사용한다면 모든 부 사용자의 스펙트럼 감지 결정이 1인 경우에만 주 사용자가 존재하는 것으로 판단하므로, H_1 가설이 유효한 상황에서 최종 검파 확률 $P_{D,AND}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

위 식에서 $P_{H_1}[A]$ 은 가설 H_1 이 유효한 상황에서 사건 A 의 확률을 나타낸다. 2절에서 전제로 한 바와 같이 인접한 부 사용자의 스펙트럼 감지 결과들 사이에만 통계적 연관성이 존재한다는 특성을 고려하고, 베이즈 규칙(Bayes' rule)을 사용하면 식 (10)은 다음과 같이 전개할 수 있다.

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

통계적 평균의 정의에 따르면 $P_{H_1}[u_i = 1, u_{i+1} = 1] = E_{H_1}[u_i u_{i+1}]$ 가 되고, 가설 H_1 에서 인접한 부 사용자의 스펙트럼 감지 결정 사이에 동일한 상관 계수 ρ 가 성립한다는 전제 조건을 식 (11)에 적용하면

$$P_{D,AND} = \frac{\{\rho P_D(1 - P_D) + P_D^2\}^{K-1}}{P_D^{K-2}} \quad (12)$$

가 된다. 이때 식 (12)에서 상관 계수 ρ 가 0인 경우는 K 개의 통계적으로 독립인 스펙트럼 감지 결과를 사용하는 경우에 대한 검파 확률과 일치함을 확인할 수 있다.

한편, 가설 H_0 의 경우에는 부 사용자의 스펙트럼 감지 결정 사이에 상관 관계가 없기 때문에 최종 오류 정보 확률 $P_{FA,AND}$ 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{FA,AND} = P_{FA}^K \quad (13)$$

만약 인지 무선 시스템이 목표로 하는 최종 검파 확률이 $P_{D,t}$ 로 주어졌다면, 식 (12)로부터 수치 검색(numerical search)을 통하여 개별 부 사용자 차원의 검파 확률 P_D 를 결정할 수 있으며, 이는 다시 식 (5)로부터 유도한 다음의 관계로부터 검파 임계값 λ 을 결정하는데 활용할 수 있다.

$$\lambda = \sigma_w^2 \left(Q^{-1}(P_D) \sqrt{\frac{2\gamma+1}{N_s}} + \gamma + 1 \right) \quad (14)$$

위 식에서 $Q^{-1}(\cdot)$ 은 $Q(\cdot)$ 의 역함수를 의미한다. 그리고 이렇게 결정한 λ 와 식 (4)를 사용하면 P_{FA} 를 결정할 수 있는데, 여기에 식 (13)을 적용하면 최종 오류 정보 확률 $P_{FA,AND}$ 을 계산할 수 있으며, 이를 정리하여 수학적으로 나타내면 다음과 같다.

$$P_{FA,AND} = \{Q(\sqrt{2\gamma+1} Q^{-1}(P_D) + \gamma\sqrt{N_s})\}^K \quad (15)$$

그리고 $N_s = \tau f_s$ 임을 이용하여 $P_{FA,AND}$ 를 τ 의 함수로 나타내면

$$P_{FA,AND} = Q(\beta + \gamma\sqrt{\tau f_s})^K \quad (16)$$

가 된다. 여기에서 $\beta = \sqrt{2\gamma+1} Q^{-1}(P_D)$ 이다.

인지 무선 시스템의 전송 용량 $R_{AND}(\tau)$ 은 식 (16)을 식 (6)에 대입하여 얻을 수 있으며 그 결과는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} R_{AND}(\tau) &= \frac{T-\tau}{T} C_0 P(H_0) [1 - Q(\beta + \gamma\sqrt{\tau f_s})]^K \end{aligned} \quad (17)$$

$R_{AND}(\tau)$ 는 $0 \leq \tau \leq T$ 구간에서 연속이며, τ 가 증가할 때 $\left(\frac{T-\tau}{T}\right)$ 는 단조 감소하고, $[1 - Q(\beta + \gamma\sqrt{\tau f_s})]^K$ 는 단조 증가하기 때문에 위로 볼록한 형태의 함수가 될 수 있음을 알 수 있다. 이때 $R_{AND}(\tau)$ 는 $0 \leq \tau \leq T$ 구간에서 반드시 최대값을 갖게 되는데, 이를 최대화하는 τ 를 구하는 방법은 $R_{AND}(\tau)$ 에 대한 미분값이 0이 되는 τ 를 찾는 것이다. $R_{AND}(\tau)$ 에 대한 미분을 구

하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} & \frac{R_{AND}'(\tau)}{C_0 P(H_0)} \\ &= -\frac{1}{T} + \frac{1}{T} Q(\beta + \gamma \sqrt{\tau f_s})^K \\ & \quad + \frac{K\gamma \sqrt{f_s} \left(1 - \frac{\tau}{T}\right)}{2\sqrt{2\pi\tau}} \exp\left(-\frac{(\beta + \gamma \sqrt{\tau f_s})^2}{2}\right) \\ & \quad \times Q(\beta + \gamma \sqrt{\tau f_s})^{K-1} \end{aligned} \quad (18)$$

식 (18)의 형태를 보면 알 수 있듯이 $R_{AND}'(\tau)$ 의 값을 0으로 하는 최적 감지 시간 τ_{opt} 를 명시적(explicit)으로 나타내는 것은 어렵기 때문에 본 논문에서는 이를 수치 검색을 사용하여 구하기로 한다.

3.2 OR 융합 규칙을 사용하는 경우

OR 융합 규칙을 사용하는 경우에는 K 명의 부 사용자의 스펙트럼 감지 결정 중에서 하나 이상이 1이 되면 주 사용자가 활동을 하는 것으로 판단한다. 이는 다시 말해 부 사용자의 스펙트럼 감지 결정이 모두 0인 경우를 제외한 경우를 가리킨다. 따라서 최종 검파 확률 $P_{D,OR}$ 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{D,OR} = 1 - P[u_1 = 0, u_2 = 0, \dots, u_K = 0] \quad (19)$$

AND 융합 규칙의 경우와 마찬가지로 베이스 규칙과 이웃한 부 사용자의 스펙트럼 감지 결정 사이에만 상관 관계가 존재한다는 가정을 활용하면 위 식은 다음과 같이 변형할 수 있다.

$$\begin{aligned} & P_{H_1}[u_1 = 0, u_2 = 0, \dots, u_K = 0] \\ &= P_{H_1}[u_K = 0] \prod_{i=1}^{K-1} \frac{P_{H_1}[u_i = 0, u_{i+1} = 0]}{P_{H_1}[u_{i+1} = 0]} \end{aligned} \quad (20)$$

여기에서 $P[u_i = 0, u_{i+1} = 0]$ 는 total probability 정리^[15]를 이용하면 다음과 같이 전개할 수 있다.

$$\begin{aligned} & P[u_i = 0, u_{i+1} = 0] \\ &= 1 - P[u_i = 0, u_{i+1} = 1] - P[u_i = 1, u_{i+1} = 0] \\ & \quad - P[u_i = 1, u_{i+1} = 1] \end{aligned} \quad (21)$$

그리고 식 (21)에 다음 관계를 적용하면

$$\begin{aligned} & P[u_i = 1, u_{i+1} = 0] \\ &= P[u_i = 1] - P[u_i = 1, u_{i+1} = 1] \end{aligned} \quad (22)$$

$$\begin{aligned} & P[u_i = 0, u_{i+1} = 1] \\ &= P[u_{i+1} = 1] - P[u_i = 1, u_{i+1} = 1] \end{aligned} \quad (23)$$

식 (21)은

$$\begin{aligned} & P[u_i = 0, u_{i+1} = 0] \\ &= 1 - P[u_{i+1} = 1] - P[u_i = 1] \\ & \quad + P[u_i = 1, u_{i+1} = 1] \end{aligned} \quad (24)$$

로 정리된다. 여기에 다시 $E_{H_1}[u_i] = P_D$ 와 $E_{H_1}[u_i u_{i+1}] = P_{H_1}[u_i u_{i+1}]$ 이라는 관계를 활용하면 $P[u_i = 0, u_{i+1} = 0]$ 는

$$\begin{aligned} & P[u_i = 0, u_{i+1} = 0] \\ &= 1 - 2P_D + \rho P_D(1 - P_D) + P_D^2 \end{aligned} \quad (25)$$

로 표현할 수 있다. 그러므로 식 (20)과 식 (25)를 식 (19)에 적용하면 최종 검파 확률 $P_{D,OR}$ 은

$$\begin{aligned} & P_{D,OR} \\ &= 1 - \frac{\{1 - 2P_D + \rho P_D(1 - P_D) + P_D^2\}^{K-1}}{(1 - P_D)^{K-2}} \end{aligned} \quad (26)$$

가 된다. 이때 식 (26)에서 상관 계수 ρ 가 0인 경우는 K 개의 통계적으로 독립인 스펙트럼 감지 결과를 사용하는 경우에 대한 검파 확률과 일치함을 확인할 수 있다.

한편, 가설 H_0 의 경우에는 부 사용자 스펙트럼 감지 결정 사이에 상관 관계가 없기 때문에 최종 오류 정보 확률 P_{FA} 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{FA,OR} = 1 - (1 - P_{FA})^K \quad (27)$$

만약 인지 무선 시스템이 유지해야 하는 최종 검파 확률이 $P_{D,t}$ 로 주어졌다면 이로부터 최종 오류 정보 확률 $P_{FA,OR}$ 를 유도하는 과정은 AND 융합 규칙을 설명할 때와 동일하며 그 결과는 다음과 같다.

$$P_{FA,OR} = 1 - (1 - Q(\alpha + \gamma \sqrt{\tau f_s}))^K \quad (28)$$

위 식에서 $\alpha \equiv \sqrt{2\gamma + 1} Q^{-1}(P_D)$ 이다. 그리고 이 결과를 활용하면 인지 무선 시스템의 전송 용량

$R_{OR}(\tau)$ 을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{OR}(\tau) = \left(\frac{T-\tau}{T}\right) C_0 P(H_0) [1 - Q(\alpha + \gamma\sqrt{\tau f_s})]^K \quad (29)$$

이 결과는 형태적으로 식 (17)과 동일하기 때문에 AND 융합 규칙을 사용하는 경우와 마찬가지로 전송 용량을 최대로 하는 τ 가 존재하며 이는 $R_{OR}(\tau)$ 의 미분값을 0으로 하는 τ 로 결정할 수 있다.

IV. 분석 사례

본 절에서는 III장에서 도출한 수식을 토대로 부 사용자들의 스펙트럼 감지 결정 간에 상관 관계가 존재하는 경우에 상관 계수 ρ 가 협력 스펙트럼 감지 방식의 성능 및 인지 무선 네트워크의 전송 용량에 미치는 영향을 살펴보고자 한다. 먼저 수치 분석 대상으로 하는 시스템의 구성과 관련한 파라미터 값으로 $P_D^f = 0.9$, $T = 100ms$, $f_s = 6MHz$, $\gamma = -15dB$, $P(H_0) = 0.8$, $C_0 = 6.6582$ 로 가정하였다. 그리고 부 사용자 수 K 는 {1, 10, 20}으로 가정하였다. 그리고 협력 스펙트럼 감지에 참여하는 부 사용자들 간에는 일정 거리 이상을 확보하여 국부 스펙트럼 감지 결정 간의 상관 정도를 낮은 수준으로 유지하는 것이 바람직하기 때문에 상관 계수 ρ 의 범위를 0 ~ 0.5인 경우로 한정하여 수치 분석 결과를 살펴보고자 한다.

그림 1은 상관 계수 ρ 에 따라서 최적 감지 시간 τ_{opt} 가 어떻게 변하는지를 보여주고 있다. OR 융합 규칙을 사용하는 경우는 상관 계수가 커질수록 최적 감

시 시간 τ_{opt} 가 늘어나고 AND 융합 규칙의 경우에는 줄어드는 것을 확인할 수 있다. OR 융합 규칙을 사용하는 경우에는 상관 계수 ρ 가 커질수록 유사한 국부 스펙트럼 결정이 많아지는 것으로 볼 수 있으므로 일정 수준의 탐지 확률을 유지하기 위해서는 개별 부 사용자가 사용하는 검파 임계값 λ 를 낮추어야 하고, AND 융합 규칙에 대해서는 반대로 높여야 한다. 한편 식 (3)에 의하면 스펙트럼 감지 시간이 길어질수록 수신 에너지의 분산이 작아져서 오류 경보 확률이 줄어듦을 알 수 있다. 그러므로 OR 융합 규칙을 사용하는 시스템이 최적 감지 시간을 사용하고 있는 상태에서 만약 환경이 변화하여 상관 계수 ρ 가 커지면 검파 임계값 λ 를 낮추어야 하는데, 이는 다시 오류 경보 확률을 증가시키는 결과를 가져오기 때문에 이를 막기 위해서는 최적 감지 시간 τ_{opt} 을 늘려야 한다는 것을 예상할 수 있다. AND 융합 규칙의 경우에도 마찬가지로 해석하면 상관 계수 ρ 가 커질수록 최적 감지 시간 τ_{opt} 가 줄어야 한다는 것을 이해할 수 있다.

그림 2는 최적 감지 시간을 사용하는 것을 전제로 하여 상관 계수 ρ 의 값에 따라 최종 오류 경보 확률 P_{FA}^f 의 값이 어떻게 변하는 지를 보여주고 있다. 일정한 수준의 검파 확률을 유지하기 위해서는 상관 계수 ρ 에 따라 개별 부 사용자가 설정하는 검파 임계값 λ 를 조정해야 하는데, 이는 다시 P_{FA}^f 값에 영향을 미친다. 따라서 상관 계수 ρ 에 따라 P_{FA}^f 의 값이 달라진다고 말할 수 있다. OR 융합 규칙을 사용하는 경우는 상관 계수가 커질수록 검파 임계값이 작아지고, 이는 개별 사용자 차원에서 오류 경보 확률이 증가하는 결과를 가져오므로 그림에서 보는 바와 같이 상관 계수

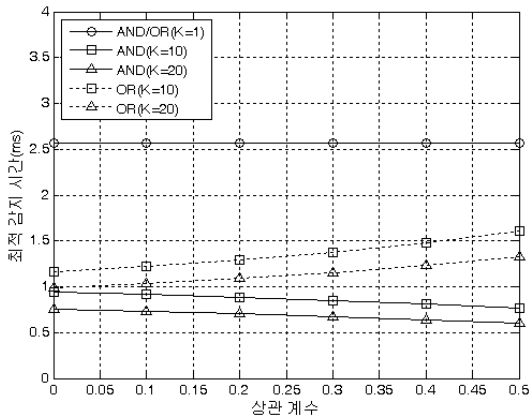


그림 1. 상관 계수에 따른 최적 감지 시간 τ_{opt} 의 변화

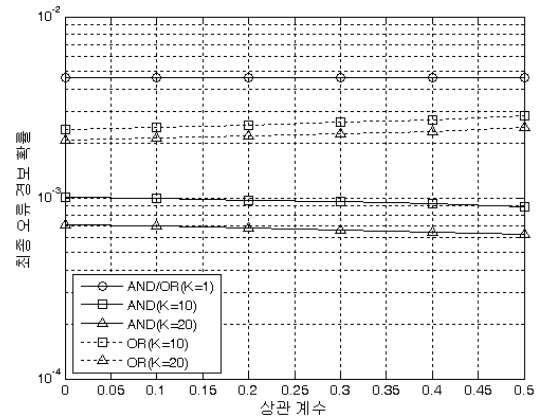


그림 2. 최적 감지 시간을 사용할 때 상관 계수가 $1 - P_{FA}^f$ 에 미치는 영향

참고 문헌

ρ 가 커짐에 따라 최종 오류 경보 확률 P_{FA}^f 가 증가함을 알 수 있다. 한편 AND 융합 규칙을 사용하는 경우는 OR 융합 규칙을 사용하는 경우와는 반대로 상관 계수가 커질수록 검파 임계값이 상승하므로 P_{FA}^f 가 감소하게 된다.

그림 3은 상관 계수가 최대 전송 용량에 미치는 영향을 나타낸 것이다. 이는 식 (6)에서도 알 수 있듯이 그림 1과 그림 2의 결과를 가지고 유추해 볼 수 있다. OR 융합 규칙을 사용하는 경우는 상관 계수가 커질수록 최대 전송 용량이 줄어드는 현상을 볼 수 있는데, 이는 OR 융합 규칙은 상관 계수가 커질수록 부 사용자의 스펙트럼 감지 시간이 늘어나면서 상대적으로 데이터를 전송하는 시간이 줄어들고 채널을 사용할 기회 ($1 - P_{FA}^f$)도 줄어들기 때문이다. 반면에 AND 융합 규칙을 사용하는 경우에는 상관 계수가 커질수록 최대 전송 용량이 늘어나게 현상을 볼 수 있는데, 이는 AND 융합 규칙은 상관 계수가 커질수록 부 사용자가 사용하는 스펙트럼 감지 시간은 줄어들고 채널을 사용할 기회 ($1 - P_{FA}^f$)는 늘어나기 때문이다.

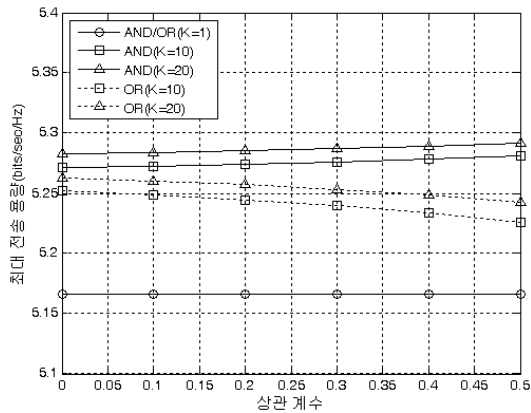


그림 3. 상관 계수가 최대 전송 용량에 미치는 영향

V. 결론

본 논문에서는 부 사용자들이 직선상에 일정 간격으로 위치하고 이웃하는 부 사용자의 스펙트럼 감지 결정 사이에만 상관 관계가 존재하는 경우를 대상으로 상관 정도에 따른 협력 스펙트럼 감지 방식의 성능과 그에 따른 인지 무선 네트워크의 전송 용량을 분석하였다. 분석 결과 AND 융합 규칙을 사용하는 경우가 OR 규칙을 사용하는 경우보다 전송 용량 측면에서 우수하다는 점을 확인할 수 있었다.

- [1] Federal Communication Commission, "Spectrum policy task force report, FCC 02-155", Nov. 2002.
- [2] 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.32-30, April 2008.
- [3] J. Mitola and G. Q. Maguire, "Cognitive radios: Making software radios more personal," *IEEE Pers. Commun.*, Vol.6, No.4, pp.13-18, Aug. 1999.
- [4] T. Yucek and H. Arslan, "A survey of spectrum sensing algorithms for cognitive radio applications," *Communications Surveys & Tutorials*, pp.116-130, First Quarter IEEE.
- [5] A. Ghasemi and E. S. Sousa, "Collaborative spectrum sensing for opportunistic access in fading environments," *DySPAN*, pp.131-136, Nov. 2005.
- [6] S. M. Mishra, A. Sahai, and R. W. Brodersen, "Cooperative sensing among cognitive radios", *ICC*, Vol.4, pp.1658-1663, June 2006.
- [7] E. Visotsky, et. al., "On Collaborative detection of TV transmissions in support of dynamic spectrum sharing," *DySPAN*, pp. 338-345, Nov. 2005.
- [8] J. Unnikrishnan and V. V. Veeravalli, "Cooperative Spectrum Sensing and Detection for Cognitive Radio," *GLOBECOM*, pp.2972-2976, Nov. 2007.
- [9] J. Shen, Y. Liu, S. Liu, G. Xie, J. Gao, and C. Chi, "Correlation between Local Sensors in Hard Cooperative Spectrum Sensing: Beneficial or Detrimental?," *GLOBECOM*, pp.1-5, Nov. 2008.
- [10] A. Ghasemi and E. S. Sousa, "Asymptotic performance of Collaborative Spectrum Sensing under Correlated Log-Normal Shadowing," *IEEE Commun. Lett.*, Vol.11, No.1, Jan. 2007.

- [11] M. Di Renzo, F. Graziosi, F. Santucci, "Cooperative Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks over Correlated Log-Normal Shadowing," *VTC*, pp.1-5, 26-29 April 2009
- [12] M. Renzo, L. Imbriglio, F. Graziosi, F. Santucci, "Distributed data fusion over correlated log-normal sensing and reporting channels: Application to cognitive radio networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Vol.8, No.12, pp.5813-5821, December 2009
- [13] Y.-C. Liang, Y. Zeng, E. Peh, and A. T. Hoang, "Sensing-throughput tradeoff for cognitive radio networks", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Vol 7. No.4, pp.1326-1337, Apr. 2008.
- [14] E. Darkopoulos and C.C. Lee, "Optimum Multisensor Fusion of Correlated Local Decisions," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, Vol.27, No.4, July 1991.
- [15] A. Papoulis, *Probability, Random Variables, and Stochastic Processes*, 2nd Ed., McGraw-Hill, 1984.

임 창 현 (Chang Heon Lim)

중신회원



1986년 2월 서울대학교 전자공학과(공학사)

1988년 8월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학석사)

1993년 8월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과(공학박사)

1994년 3월~현재 부경대학교

전자공학과 정교수

<관심분야> 통신, 레이더 신호 처리