스펙트럼 감지 결정간의 상관 관계가 CR 시스템의 전송 용량에 미치는 영향

종신회원 임 창 헌*, 준회원 이 상 욱**

Effects of Correlated Local Spectrum Sensing Decisions on the Throughput of CR Systems

Chang-Heon Lim* *Lifelong Member*, Sang-Wook Lee** *Associate Member*

요 약

협력 스펙트럼 감지(cooperative spectrum sensing) 방식은 지역적으로 분산되어 있는 다수의 부 사용자들이 협력하여 스펙트럼 감지를 수행하는 방법으로, 페이딩으로 인한 검파 성능의 손실을 효과적으로 줄일 수 있는 것으로 알려져 있다. 지금까지 협력 스펙트럼 감지에 관해 발표된 대부분의 연구 결과들은 부 사용자들의 스펙트럼 감지 결정이 통계적으로 서로 독립이라는 가정에 기초한 것이다. 그러나 실제 환경에서는 음영 효과(shadowing effect)로 인해 서로 가까이에 위치한 부 사용자들의 감지 결정(decision)들은 상관 관계(correlation)를 가질 수 있다. 이런 요인이 협력 스펙트럼 감지 방식의 성능에 미치는 영향을 평가하기 위하여, 본 논문에서는 주 사용자(primary user)가 활동할 때는 서로 다른 부 사용자 2명의 스펙트럼 감지 결정 사이에 일정한 통계적 상관도(correlation)가 존재하고, 활동하지 않는 경우에는 통계적으로 독립인 것으로 CR 시스템 환경을 설정한 후, 통계적 상관도에 따라 전송 용량(throughput)이 어떻게 변화하는 지를 분석하였다. 분석 결과 부 사용자들의 스펙트럼 감지 결정 사이의 상관 계수가 커질수록 OR 융합 규칙을 사용하는 경우에는 전송 용량이 줄어들은 반면 AND 융합 규칙을 사용하는 경우는 전송 용량이 증가하는 것으로 나타났다.

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

ABSTRACT

It is widely known that cooperative spectrum sensing in which secondary users scattered in some region collaborate to detect primary users can significantly reduce the performance degradation due to the fading phenomenon. Most of previous works on cooperative spectrum sensing are based on the assumption that the local spectrum sensing decisions of secondary users are statistically independent. However, there can be practically some statistical correlation between the local decisions of any two secondary users in close proximity, which is caused by shadowing effect. In order to evaluate the effect of this correlation on the performance of collaborative spectrum sensing, we assumed that, for the case that a primary user are active in the spectrum of interest, any two local decisions are statistically correlated to each other with some level of constant correlation and independent otherwise, and analyzed the achievable throughput with the degree of correlation varying. The results showed that, as the degree of correlation gets higher, the throughput increases for the case of the AND fusion rule and decreases for the OR fusion rule.

* 부경대학교 전자컴퓨터정보통신공학부 (chlim@pknu.ac.kr),
** 부경대학교 대학원 전자공학과(lashid1212@pknu.ac.kr)
논문번호 : KICS2009-05-185, 접수일자 : 2009년 5월 4일, 최종논문접수일자 : 2009년 12월 29일

Ⅰ. 서 론

나날이 증가하는 무선 통신 서비스 수요를 감당하기 위해서는 일차적으로 주파수 자원이 필요하다. 하지만 무선 통신을 위해 사용할 수 있는 주파수 자원은 한정되어 있고, 그 중의 상당 부분이 이미 기존의 통신 서비스에 사용되고 있는 실정이다. 그런데 최근 FCC의 조사 결과에 따르면 이미 사용되고 있는 주파수 자원의 이용 효율이 대부분 예상보다 낮은 것으로 밝혀졌다[1]. 이를 계기로 주파수 자원을 보다 효율적으로 활용하기 위해서는 특정 사용자가 스펙트럼을 독점적으로 사용하는 방식보다는 상황에 따라 다른 사용자에게도 스펙트럼 사용 기회를 제공하는 기회적 스펙트럼 접근 방식(opportunistic spectrum access)이 적합하다는 연구 결과가 제시된 바 있다.

CR(cognitive radio) 시스템은 실시간으로 주변 전파 환경을 인식하고 그에 따라 시스템의 동작 방식을 변경할 수 있는 기술로 기회적 스펙트럼 접근 방식을 실현할 수 있는 유력한 기술로 인식되고 있다. CR 시스템의 특성상 가장 핵심적인 기능은 스펙트럼 감지(spectrum sensing) 기능인데, 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[2]. 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 감지는 다수의 부 사용자(secondary user)들이 서로 협력하여 스펙트럼 감지를 수행하는 방법으로, 개별 부 사용자 단말에서 수행한 스펙트럼 감지 결과를 융합 센터에서 한데 모은 후에 정해진 융합 규칙에 따라 최종 감지 결정을 도출하는 방식이다. 이 방식을 사용하면 공간적으로 분산되어 있는 부 사용자 단말들은 서로 독립적인 채널 감쇠 현상의 영향을 받을 가능성이 있기 때문에 부 사용자들이 개별적으로 스펙트럼 감지를 수행하는 경우보다 우수한 성능을 확보할 수 있는 것으로 알려져 있다[3]-[4].

CR 사용자는 해당 채널에서 주 사용자의 출현을 지속적으로 감지하여 주 사용자가 해당 채널을 사용하는데 있어 피해가 가지 않도록 해야 하는데 통상적으로 스펙트럼 감지와 데이터 전송을 동시에 수행하기는 어렵기 때문에 일정 시간 간격으로 스펙트럼 감지 기능과 데이터 전송을 번갈아 가며 실행하는 주기적 감지 방식(periodic sensing)을 사용한다. 주기적 감지 방식에서 하나의 전송 프레임은 스펙트럼 감지 슬롯과 데이터 전송 슬롯으로 구분하여 사용하는데, 이 때 스펙트럼 감지에 할당된 시간이 길면 길수록 오류 경보 확률(false alarm probability)은 낮아져 스펙트럼 활용 가능성이 높아지지만, 다른 한편으로 데이터 전송 시간은 짧아져 데이터 전송 용량(throughput)이 줄어드는 성질이 있다. 최근에 발표된 연구 결과 [5]에서는 스펙트럼 감지 정확도를 적정 수준 이상으로 유지하면서 전송 용량을 최대로 하는 스펙트럼 감지 시간을 분석하였다.

참고문헌 [5]에서는 CR 네트워크를 구성하는 부 사용자 단말의 스펙트럼 감지 결정이 통계적으로 독립이라고 가정하고 결과를 도출하였다. 하지만 실제 환경에서는 음영 효과(shadow effect) 등으로 인해 공간적으로 인접한 부 사용자 단말의 스펙트럼 감지 결정 사이에 통계적 연관성이 존재할 수 있다. 이런 연관성을 고려한 기존의 연구 결과로는 참고문헌 [6]과 [7]이 있다. 참고문헌 [6]에서는 연판정 융합(soft information-combining)과 경판정 융합(hard information-combining)의 2가지 경우를 다루었는데, 경판정 융합에 대해서는 컴퓨터 시뮬레이션을 이용한 성능 평가를 제시하였다. 그리고 참고문헌 [7]의 경우에는 연판정 융합에 참여하는 부 사용자의 개수가 늘어날 때 검파 성능의 수렴 특성을 분석하였다.

일반적으로 연판정 융합은 개별 부 사용자 단말에서 융합 센터로 전달하는 정보량이 경판정 융합보다 많다는 단점이 있어, 연판정 융합보다는 경판정 융합 방식에 보다 많은 관심이 집중되고 있다. 본 논문에서는 경판정 융합(hard combining)을 전제로 하여 개별 단말기의 스펙트럼 감지 결정 사이에 통계적인 상관도가 존재할 때, 그에 따른 CR 시스템의 전송 용량 변화를 분석하고자 한다. 이는 분석적인 방법을 사용하기 때문에 컴퓨터 시뮬레이션을 사용한 참고문헌 [6]의 내용과는 성능 분석 방식 측면에서 다르고 상관도에 따른 전송 용량의 변화를 분석한다는 측면에서 차이가 난다. 본 논문에서는 성능 분석을 위해 개별 센서의 감지 결정 사이에 상관 관계가 존재하는 상황을 대상으로 하여 적절한 융합 규칙을 찾는 문제를 다룬 참고문헌 [8]의

연구 결과를 활용하고자 한다.

본 논문은 Ⅰ장 서론에 이어 Ⅱ장에서 본 논문에서 가정하는 스펙트럼 감지 시스템 모델에 대해서 기술하고 Ⅲ장에서는 부 사용자들 간에 상관도가 최적 감지 스펙트럼 시간에 미치는 영향을 분석하는 방안을 제안한다. 그리고 Ⅳ장에서는 이에 대한 수치 분석 사례를 제시하고, 마지막으로 Ⅴ장에서 결론을 맺는다.

Ⅱ. 시스템 구성

스펙트럼 감지에서는 수신한 신호를 분석하여 주 사용자가 해당 채널을 사용하고 있는지 여부를 판단하는데 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_1과 H_0로 표기하기로 한다. 만약 부 사용자가 샘플링 주파수 f_s의 속도로 수신 신호를 샘플링한다고 할 때 해당 부 사용자가 n번째로 수신한 신호 $y(n)$은 각 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 사용자의 신호의 n번 째 샘플을 의미하는 것으로 평균은 0이고 분산은 σ_p^2인 통계적인 양이라고 가정한다. 그리고 $w(n)$은 n번 째 수신 잡음을 나타내는 것으로 평균이 0이고 분산은 σ_w^2인 CSCG(circular symmetric complex gaussian) 잡음으로 가정한다. 그리고 $s(n)$과 $w(n)$은 서로 통계적으로 독립인 것으로 가정한다.

주기적인 감지 방식을 사용하는 CR 시스템은 한 프레임을 스펙트럼 감지 슬롯과 데이터 전송 슬롯으로 구분하여 사용한다. 이 때 스펙트럼 감지 슬롯의 길이를 τ라고 한다면 이 기간 동안 부 사용자가 수신한 신호의 샘플 수 N은 τf_s보다 크지 않는 자연수가 되는데, 본 논문에서는 편의상 $N=\tau f_s$로 가정한다.

본 논문에서는 스펙트럼 감지 방식으로 신호의 에너지를 이용하는 방식을 사용하는 것으로 가정한다. 그리고 이 때 개별 부 사용자가 수신한 신호의 시험 통계량(test statistic) Y는 다음과 같이 정의한다.

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

위 식에서 N이 충분히 큰 수라고 한다면, 중심극한 정리(central limit theorem)에 따라 Y는 정규분포(normal distribution)에 가깝게 된다. 만약 주 사용자가 복소 PSK 변조 방식을 사용한다고 가정한다면 이 때 Y는 가설에 따라 다음과 같은 확률 분포를 가지게 된다[5].

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

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

$$\begin{aligned} P_{FA} &= P(Y>\lambda\,|H_0) \\ &= Q\left(\left(\frac{\lambda}{\sigma_w^2}-1\right)\sqrt{\tau f_s}\right) \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} P_D &= P(Y>\lambda\,|H_1) \\ &= Q\left(\left(\frac{\lambda}{\sigma_w^2}-\gamma-1\right)\sqrt{\frac{\tau f_s}{2\gamma+1}}\right) \end{aligned} \quad (5)$$

본 논문에서는 n명의 부 사용자가 서로 협력하여 스펙트럼 감지를 수행하는 경우를 다루고 있는데, 이를 위해 부 사용자들은 스펙트럼 감지 결정을 융합 센터로 보내게 되고 융합 센터에서는 이를 정해진 융합 규칙에 융합하여 최종 결정을 내리게 된다. 본 논문에서는 AND 융합 규칙과 OR 융합 규칙을 적용한 경우를 살펴보고자 한다.

Ⅲ. 성능 분석

주 사용자 검파 확률을 적정 수준 이상으로 유지

하면서 전송 용량을 최대로 하는 최적의 스펙트럼 감지 시간을 참고문헌 [5]에서 도출한 바 있다. 본 논문에서는 주 사용자가 해당 채널을 하지 않을 때 확보할 수 있는 전송 용량만을 계산하기로 하며, 이에 따라 스펙트럼 감지 시간이 τ일 때 전송 용량 $R(\tau)$을 다음과 같이 정의하고자 한다.

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

위 식에서 T는 전송 프레임의 길이를 시간으로 나타낸 것이고, P_{FA}는 CR 시스템의 오류 경보 확률을 나타내며, $P(H_0)$는 주 사용자가 스펙트럼을 사용하지 않을 확률을 가리킨다. 그리고 C_0는 주 사용자가 존재하지 않는 상황에서 확보할 수 있는 채널 용량을 가리키는 것으로 부 사용자의 신호 전력을 σ_s^2라고 하면 $C_0 = \log_2(1+\sigma_s^2/\sigma_w^2)$로 나타낼 수 있다. 그리고 개별 부 사용자 단말이 갖는 검파 성능은 모두 동일하다고 가정한다.

참고문헌 [8]에서는 여러 개의 센서를 사용하는 환경에서 개별 센서의 결정 사이에 상관 관계가 존재할 때 최적으로 이들 결정들을 융합하는 규칙에 대한 연구 결과가 제시된 바가 있다. 본 논문에서는 이 결과를 활용하여 부 사용자의 스펙트럼 감지 결정 사이에 상관 관계가 존재할 때, 이것이 CR 시스템의 전송 용량에 어떠한 영향을 미치는 지를 분석하고자 한다. 상관 관계가 존재하는 이유는 공간적으로 가까운 거리에 있는 두 지점에서 측정한 페이딩이 통계적으로 상관 관계를 갖기 때문이다. 식 (1)에 나타낸 바와 같이 주 사용자의 상황에 대한 가설에 따라 수신 신호의 형태가 달라지는데, 가설 H_1의 경우에는 페이딩이 관여되기 때문에 부 사용자의 스펙트럼 감지 결과 사이에 상관 관계가 있을 수 있지만, 가설 H_0의 경우에는 그렇지 않기 때문에 상관 관계가 없는 것으로 한다. 그리고 가설 H_1의 경우에 두 명의 부 사용자 i, k의 스펙트럼 감지 결정을 u_i, u_k라고 하면 이 둘 사이에 상관 계수는 부 사용자에 상관없이 일정한 것으로 가정한다. 이때 부 사용자의 결정 u_i, u_k 사이의 상관 계수 ρ는 다음과 같다.

$$\rho = \frac{E[u_i u_k] - E[u_i]E[u_k]}{\sqrt{\{E[u_i^2] - E[u_i]^2\}\{E[u_k^2] - E[u_k]^2\}}} \qquad (7)$$

참고문헌 [8]의 연구 결과에 따르면 가설 H_1이 유효한 상황에서 n명의 부 사용자 중에서 l명이 주 사용자를 검출하지 못하는 경우에 대한 검파 확률 $P_{D,l}[u_1,u_2,\cdots,u_n]$는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{D,l}[u_1,u_2,\cdots,u_n] = \sum_{i=0}^{l}(-1)^i\binom{l}{i}P_D \times \prod_{k=0}^{n-l+i-2}\frac{\rho(k+1-P_D)+P_D}{1+k\rho} \qquad (8)$$

위 식에서 P_D는 개별 부 사용자의 주 사용자 검파 확률을 나타내고, 위 식에서 $n-l+i<2$인 경우에는 $\prod_{k=0}^{n-m+i-2}(\bullet)=1$ 이 되는 것으로 정의한다. 만약 n명의 부 사용자로 구성된 CR 시스템에서 m-out-of-n 융합 규칙[1]을 사용한다고 하면 가설 H_1이 유효한 상황에서 최종 검파 확률 P_D^f는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_D^f = \sum_{l=0}^{n-m}\binom{n}{l}P_{D,l}[u_1,u_2,\cdots,u_n] \qquad (9)$$

따라서 식 (8)을 식(9)에 대입하면 최종 검파 확률 P_D^f는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_D^f = \sum_{l=0}^{n-m}\binom{n}{l}\sum_{i=0}^{l}(-1)^i\binom{l}{i}P_D \times \prod_{k=0}^{n-l+i-2}\frac{\rho(k+1-P_D)+P_D}{1+k\rho} \qquad (10)$$

한편, 가설 H_0의 경우에는 부 사용자의 결정 사이에 상관 관계가 없기 때문에 최종 오류 경보 확률 P_{FA}^f은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{FA}^f = \sum_{l=m}^{n}\binom{n}{l}{P_{FA}}^l(1-P_{FA})^{n-l} \qquad (11)$$

3.1 OR 융합 규칙을 사용하는 경우

CR 시스템에 OR 융합 규칙을 사용한다고 한다면 부 사용자들 간에 상관 관계를 고려한 최종 오

1) n명의 부 사용자 중에서 m명 이상이 주 사용자의 통신을 감지하였을 경우에 이를 최종적인 감지 결과로 받아들이는 융합 규칙.

류 경보 확률 $P_{FA,OR}^{f}$과 최종 검파 확률 $P_{D,OR}^{f}$은 각각 식(11)과 식(10)에서 $m=1$인 경우에 해당하므로 이를 적용하여 정리하면 다음과 같다.

$$P_{FA,OR}^{f}=1-(1-P_{FA})^{n} \tag{12}$$

$$P_{D,OR}^{f}=\sum_{l=0}^{n-1}\binom{n}{l}\sum_{i=0}^{l}(-1)^{i}\binom{l}{i}P_{D}\times \prod_{k=0}^{n-l+i-2}\left\{P_{D}\left(\frac{1-\rho}{1+k\rho}\right)+\frac{\rho(1+k)}{1+k\rho}\right\} \tag{13}$$

만약 CR 시스템이 유지해야 하는 최종 검파 확률이 $\overline{P_{D}^{f}}$로 주어졌다면, 식(13)로부터 단일 부 사용자가 유지해야 하는 검파 확률 P_{D}를 명시적(explicit)으로 나타내는 식을 이끌어내기는 어렵기 때문에 수치 검색(numerical search)을 통하여 개별 부 사용자 차원의 검파 확률 P_{D}를 구하기로 한다. P_{D}를 이용하여 식(5)를 검파 임계값 λ에 관한 식으로 정리하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda=\sigma_{w}^{2}\left(Q^{-1}(P_{D})\sqrt{\frac{2\gamma+1}{\tau f_{s}}}+\gamma+1\right) \tag{14}$$

위 식에서 $Q^{-1}(\bullet)$은 $Q(\bullet)$의 역함수를 의미한다. 식(14)은 부 사용자들 간에 상관 관계가 있는 경우에 OR 융합 규칙을 사용하는 CR 시스템이 목표로 하는 검파 확률을 유지하기 위해서 부 사용자 단말이 사용해야 하는 검파 임계값을 나타낸다. 식(4)와 식(14) 그리고 식 (12)을 이용하면 $P_{FA,OR}^{f}$는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{FA,OR}^{f}=1-\left(1-Q\left(\alpha+\gamma\sqrt{\tau f_{s}}\right)\right)^{n} \tag{15}$$

위 식에서 $\alpha\equiv\sqrt{2\gamma+1}\,Q^{-1}(P_{D})$이다. 식(15)는 OR 융합 규칙을 사용하는 CR 시스템이 주 사용자에 대한 목표 검파 확률 $\overline{P_{D}^{f}}$을 유지하면서 어느 정도의 오류 경보 확률을 달성할 수 있는지 보여준다. 여기서 식(15)와 식(6)을 사용하면 OR 융합 규칙을 사용하는 CR 시스템의 전송 용량 $R_{OR}(\tau)$을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{OR}(\tau)=\left(\frac{T-\tau}{T}\right)C_{0}P(H_{0})\left[1-Q\left(\alpha+\gamma\sqrt{\tau f_{s}}\right)\right]^{n} \tag{16}$$

식(16)에서 $0\leq\tau\leq T$ 구간에서 연속인 $R_{OR}(\tau)$는 τ가 증가할 때 $\left(\frac{T-\tau}{T}\right)$는 단조 감소하고, $\left[1-Q\left(\alpha+\gamma\sqrt{\tau f_{s}}\right)\right]^{n}$는 단조 증가하기 때문에 위로 볼록한 형태의 함수가 됨을 알 수 있다. 따라서 $R_{OR}(\tau)$는 $0\leq\tau\leq T$ 구간에서 항상 최대값을 가지게 되는데, 이를 최대로 하는 τ를 구하는 방법은 $R_{OR}(\tau)$에 대한 미분 값이 0이 되는 τ를 구하는 것이다. $R_{OR}(\tau)$에 대한 미분을 구하면 다음과 같다.

$$\frac{R_{OR}'(\tau)}{C_{0}P(H_{0})}=-\frac{1}{T}\left[1-Q\left(\alpha+\gamma\sqrt{\tau f_{s}}\right)\right]^{n}+\frac{n\gamma\sqrt{\tau f_{s}}\left(1-\frac{\tau}{T}\right)}{2\sqrt{2\pi\tau}}exp\left(-\frac{\left(\alpha+\gamma\sqrt{\tau f_{s}}\right)^{2}}{2}\right)\times\left[1-Q\left(\alpha+\gamma\sqrt{\tau f_{s}}\right)\right]^{n-1} \tag{17}$$

식 (17)의 값을 0이 되게 하는 최적 감지 시간 τ_{opt}를 명시적으로 나타내는 식을 도출하기는 어렵기 때문에 본 논문에서는 이를 수치 검색을 사용하여 결정하기로 한다.

3.2 AND 융합 규칙을 사용하는 경우

CR 시스템에서 AND 융합 규칙을 사용한다고 한다면, 부 사용자들 간에 상관 관계를 고려한 최종 오류 경보 확률 $P_{FA,AND}^{f}$과 최종 검파 확률 $P_{D,AND}^{f}$은 각각 식(11)과 식 (10)에서 $m=n$인 경우를 의미하므로 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{FA,AND}^{f}=(P_{FA})^{n} \tag{18}$$

$$P_{D,AND}^{f}=P_{D}\prod_{k=0}^{n-2}\left\{P_{D}\left(\frac{1-\rho}{1+k\rho}\right)+\frac{\rho(1+k)}{1+k\rho}\right\} \tag{19}$$

AND 융합 규칙을 사용하는 경우에도 CR 시스템이 유지해야 하는 최종 검파 확률이 $\overline{P_{D}^{f}}$로 주어졌다면, 단일 부 사용자가 유지해야 하는 검파 확률 P_{D}를 명시적으로 나타내는 식을 구하기는 어렵기 때문에 수치 검색으로 사용하여 찾기로 한다. OR 융합 규칙의 경우와 유사한 과정을 통하여 개별 부 사용자의 검파 확률과 검파 임계값 λ에 관한 식을 구한 후에 식(4)와 식(18)을 이용하면 $P_{FA,AND}^{f}$는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{FA,AND}^{f} = Q\left(\beta+\gamma\sqrt{\tau f_s}\right)^n \quad (20)$$

위 식에서 $\beta \equiv \sqrt{2\gamma+1}\,Q^{-1}(P_D)$이다. 이때 식 (20)는 해당 CR 시스템이 주 사용자에 대한 목표 검파 확률 $\overline{P_D^f}$을 유지하면서 어느 정도의 오류 경보 확률을 달성할 수 있는지 보여준다. 식(20)와 식 (6)을 사용하면 AND 융합 규칙을 사용하는 CR 시스템의 전송 용량 $R_{AND}(\tau)$은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{AND}(\tau) \equiv \frac{T-\tau}{T} C_0 P(H_0)\left[1-Q\left(\beta+\gamma\sqrt{\tau f_s}\right)^n\right] \quad (21)$$

식(21)에서 $0 \leq \tau \leq T$ 구간에서 연속인 $R_{AND}(\tau)$는 τ가 증가할 때 $\left(\frac{T-\tau}{T}\right)$는 단조 감소하고, $\left[1-Q\left(\beta+\gamma\sqrt{\tau f_s}\right)^n\right]$는 단조 증가하기 위로 볼록한 형태의 함수가 됨을 알 수 있다. 따라서 $R_{AND}(\tau)$는 $0 \leq \tau \leq T$ 구간에서 반드시 최대값을 갖게 되는데, 이를 최대로 하는 τ를 구하는 방법은 $R_{AND}(\tau)$에 대한 미분 값이 0이 되는 τ를 구하는 것이다. $R_{AND}(\tau)$에 대한 미분을 구하면 다음과 같다.

$$\frac{R_{AND}'(\tau)}{C_0 P(H_0)} = -\frac{1}{T} + \frac{1}{T}Q\left(\beta+\gamma\sqrt{\tau f_s}\right)^n + \frac{n\gamma\sqrt{\tau f_s}\left(1-\frac{\tau}{T}\right)}{2\sqrt{2\pi\tau}} exp\left(-\frac{\left(\beta+\gamma\sqrt{\tau f_s}\right)^2}{2}\right) \times Q\left(\beta+\gamma\sqrt{\tau f_s}\right)^{n-1} \quad (22)$$

식 (22)의 값이 0이 되게 하는 최적 감지 시간 τ_{opt}를 명시적으로 나타내는 식을 구하기 어렵기 때문에 본 논문에서는 이를 수치 검색을 사용하여 구하기로 한다.

Ⅳ. 분석 사례

본 절에서는 Ⅲ장에서 도출한 수식을 토대로 부 사용자들 간에 상관 관계가 존재하는 경우에 상관 계수 ρ가 최적 스펙트럼 감지 시간 및 전송 용량에 미치는 영향을 살펴보고자 한다. 먼저 수치 분석 대상으로 하는 시스템의 구성과 관련한 파라미터 값으로 $\overline{P_D^f}=0.9$, $T=100ms$, $f_s=6MHz$, $\gamma=-15dB$, $P(H_0)=0.8$, $C_0=6.6582$ 로 가정하였다. 그리고 부 사용자 수 $n=10$으로 가정하였다.

그림 1은 상관 계수 ρ에 따라서 최적 감지 시간 τ_{opt}가 어떻게 변하는지를 보여주고 있다. OR 융합 규칙을 사용하는 경우는 상관 계수가 커질수록 최적 감시 시간 τ_{opt}가 늘어나는 현상을 볼 수 있다. 일반적으로 OR 융합 규칙의 경우에는 목표로 한 최종 검파 확률을 달성하기 위해서는 스펙트럼 감지에 참여하는 부 사용자 수가 증가할수록 감지 시간은 줄어들게 되는데, 부 사용자의 감지 결정 사이에 상관 관계가 증가하게 되면 극단적인 경우 단일 부 사용자가 스펙트럼 감지를 수행하는 경우에 근접하게 되므로 결국 감지 시간이 늘어나는 결과를 가져온다. 반면에 AND 융합 규칙의 경우는 상관 계수가 커질수록 최적 감지 시간 τ_{opt}가 줄어드는 현상을 볼 수 있다. 이는 AND 융합 규칙의 경우에는 OR 융합 규칙의 경우와는 반대로 목표로 한 최종 검파 확률을 달성하기 위해서는 스펙트럼 감지에 참여하는 부 사용자 수가 증가할수록 오히려 감지 시간은 늘어나게 되는데, 부 사용자의 감지 결정 사이에 상관 관계가 커지면 결과적으로 단일 부 사용자가 스펙트럼 감지를 수행하는 경우에 근접하게 되어 결국 감지 시간이 줄어들게 되기 때문이다.

그림 2는 최적 감시 시간을 사용하는 것을 전제로 하여 상관 계수 ρ의 값에 따라 $1-P_{FA}^f$의 값이 어떻게 변하는 지를 보여주고 있다. 상관 계수 ρ에 따라 목표로 하는 검파 확률을 유지하기 위해 개별 부 사용자가 설정하는 검파 임계값 λ가 달라지고, 이는 다시 P_{FA}^f값에 영향을 주기 때문에 결과적으로 상관 계수 ρ에 따라 $1-P_{FA}^f$의 값이 달라진다.

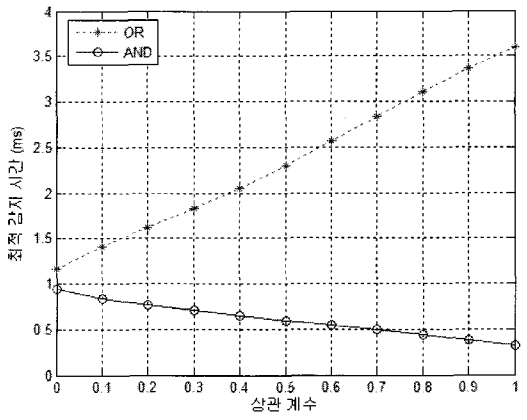


그림 1. 상관 계수에 따른 최적 감지 시간 τ_{opt}의 변화

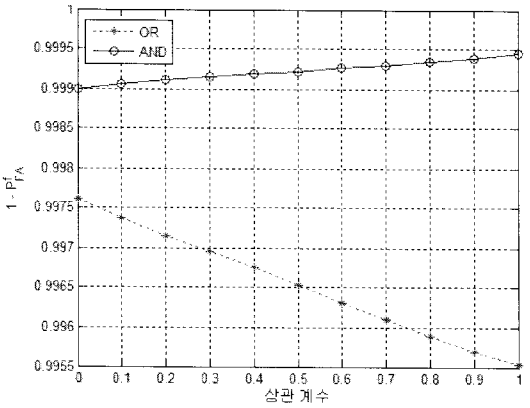


그림 2. 최적 감지 시간을 사용할 때 상관 계수가 $1-P_{FA}^{f}$에 미치는 영향

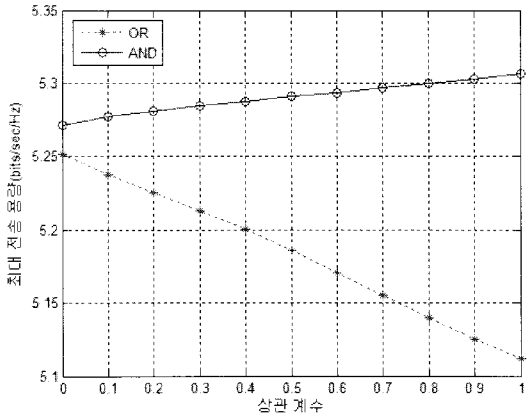


그림 3. 상관 계수가 최대 전송 용량에 미치는 영향

OR 융합 규칙을 사용하는 경우는 상관 계수가 커질수록 $1-P_{FA}^{f}$가 빠르게 감소하는 현상을 볼 수 있다. OF 융합 규칙의 경우, 상관 계수가 커질수록 최종 검파 확률을 달성하기 위해 필요한 개별 부 사용자의 검파 확률이 커져야 하고, 이는 곧 P_{FA}^{f}의 증가를 의미하므로 이와 같은 결과가 발생한 것이다. 반면에 AND 융합 규칙을 사용하는 경우는 상관 계수가 커질수록 $1-P_{FA}^{f}$가 커지는 현상을 볼 수 있는데, 이는 상관 계수가 커짐에 따라 최종 검파 확률을 실현하기 위해 필요한 개별 부 사용자의 검파 확률이 낮아져야 하고, 이는 다시 P_{FA}^{f}의 감소를 의미하기 때문이다.

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 늘어나게 되므로, 그 만큼 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 사용자의 스펙트럼 감지 시간은 점차적으로 줄어들고 채널을 사용할 기회$(1-P_{FA}^{f})$도 늘어나기 때문이다. 이런 현상이 생긴 근본적인 이유는 식(1)에서 알 수 있듯이 가설 H_1인 경우에는 부 사용자의 스펙트럼 감지 결정 사이에 통계적 연관성을 가정하였지만, 가설 H_0에 대해서는 통계적으로 독립이라고 설정하였기 때문이다.

V. 결 론

본 논문에서는 협력 스펙트럼 감지 방식을 사용하는 CR 시스템에서 개별 부 사용자의 스펙트럼 감지 결정 사이에 통계적 연관성이 존재할 때, 이 상관 관계가 해당 시스템의 전송 용량과 스펙트럼 감지 시간에 미치는 영향에 대해 분석하였다. 그리고 개별 부 사용자 차원의 스펙트럼 검파 방법으로는 에너지 검파 방식을 사용하였다. 또한, 주 사용자가 존재하는 상황에서는 임의의 부 사용자 2명이 내리는 스펙트럼 감지 결정 사이에 일정한 통계적 상관도가 존재한다고 가정하였으며, 주 사용자가 존재하지 않는 경우에는 통계적으로 독립인 것으로 설정하였다. 분석 사례를 통해 살펴본 결과 OR 융합 규칙을 사용하는 경우에는 상관 계수가 커지면 커질수록 전송 용량이 감소하고, AND 융합 규칙을 사용하는 경우는 상관 계수가 커질수록 전송 용량이 증가하는 것을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

[1] Federal Communication Commission, "Spectrum policy task force report, FCC 02-155", Nov. 2002.

[2] D. Cabric, S. M. Mishra, and R. W. Brodersen, "Implementation issues in spectrum sensing for cognitive radios," *Asilomar Conference on*

Signals, Systems and Computers 2004, pp.772-776, Nov. 2004

[3] M. Gandetto and C. Regazzoni, "Spectrum sensing: a distributed approach for cognitive terminals", *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, Vol.25, No.3, pp.546-557, Apr. 2007

[4] S. M. Mishra, A. Sahai, and R. W. Brodersen, "Cooperative sensing among cognitive radios", *ICC 2006*, Vol.4, pp.1658-1663, June 2006.

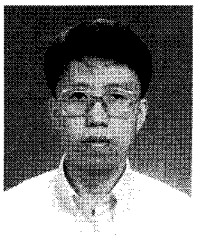
[5] Y.-C. Liang, Y. Zeng, E. Peh, and A. T. Hoang, "Sensing-throughput tradeoff for cognitive radio networks", *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Vol7. No.4, pp.1326-1337, Apr. 2008.

[6] E. Visotsky, et. al., "On Collaborative detection of TV transmissions in support of dynamic spectrum sharing," *DySPAN 2005*, pp.338-345, Nov. 2005.

[7] A. Ghasemi and E. S. Sousa, "Asymptotic performance of Collborative Spectrum Sensing under Correlated Log-Normal Shadowing," *IEEE Commun. Lett.*, Vol.11, No.1, Jan. 2007.

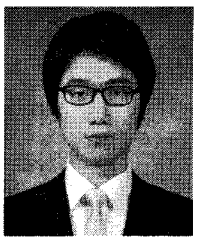
[8] E. Darkopoulos and C. C. Lee, "Optimum Multiuser Fusion of Correlated Local Decisions," *IEEE Trans. Aerosp. Electron. Syst.*, Vol.27, No.4, July 1991.

임 창 헌 (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 전자컴퓨터정보통신공학부 정교수
<관심분야> 통신, 레이더 신호 처리

이 상 욱 (Sang Wook Lee) 준회원



2008년 2월 : 부경대학교 전자공학과 (공학사)
2008년 3월~현재 부경대학교 전자공학과 (공학석사)
<관심분야> cognitive radio