

CR 네트워크에서 k-out-of-n 융합 규칙을 사용한 협력 스펙트럼 감지 방식의 성능 분석

준회원 이 상 욱*, 종신회원 임 창 현**

Performance Evaluation of a Cooperative Spectrum Sensing using the k-out-of-n Fusion Rule in CR Networks

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

요 약

협력 스펙트럼 감지(cooperative spectrum sensing)는 CR(cognitive radio) 네트워크를 구성하는 다수의 부 사용자(secondary user)가 서로 협력하여 주 사용자(primary user)의 스펙트럼 사용 여부를 판단하는 기술이다. 이를 수행하는 일반적인 형태는 일차적으로 부 사용자별로 판단을 한 후 이를 종합하여 최종 판단을 내리는 방식이며, 이때 가장 일반적인 융합 규칙(fusion rule)이 k-out-of-n 규칙이다. 이 방식은 n명의 부 사용자 중에 k명 이상이 주 사용자가 해당 스펙트럼을 사용하고 있다는 것에 동의할 때에만 이를 최종 판단으로 확정하는 방식이다. 본 논문에서는 주 사용자의 검파 확률을 일정 수준 이상으로 유지한다는 조건하에서 이 융합 규칙을 사용하는 협력 스펙트럼 감지 방식의 성능 분석 방식을 제시하고, 그 적용 사례로 10명의 부 사용자로 구성된 CR 네트워크에 대한 수치 분석 결과를 제시하고자 한다.

Key Words : cognitive radio; cooperative spectrum sensing; fusion rule

ABSTRACT

Cooperative spectrum sensing allows secondary users of a cognitive radio(CR) network to collaborate to determine whether a primary user occupies the spectrum of interest or not. It usually performs spectrum sensing by combining the individual decisions of each second user into a final one and the k-out-of-n fusion rule is a general approach for decision fusion. This rule declares that the spectrum is occupied only when the decisions from more than k-1 secondary users indicate the presence of a primary user. In this paper, we analyze a cooperative spectrum sensing scheme with the fusion rule under the constraint that its detection probability is maintained to be no less than a given level and its numerical results for the case of a CR network with 10 secondary users.

I. 서 론

무선 통신 서비스가 보급된 이후 지난 십여 년 동안 무선 통신 이용자 수는 빠르게 증가하였다. 이전에는 주로 음성 통신 서비스를 제공하는 형태였으나 현재는 여러 가지 형태의 데이터 서비스를 제

공하는 형태로 진화하고 있다. 이와 같이 무선 통신 서비스는 그 규모와 종류가 많아지는 추세에 있는데 이를 실제로 구현하기 위해서는 일차적으로 그만큼 많은 주파수 자원이 필요하다. 그러나 주파수 자원을 임의로 확충하는 것이 용이하지 않다는 점을 고려한다면 단순히 주파수 자원을 할당하는 방

* 부경대학교 전자공학과 통신시스템 연구실(lashid1212@pknu.ac.kr)

** 부경대학교 전자컴퓨터정보통신공학부(chlim@pknu.ac.kr)

논문번호 : KICS2009-03-134, 접수일자 : 2009년 3월 30일, 최종논문접수일자 : 2009년 4월 20일

식으로는 추후 계속될 주파수 수요를 감당하기 어려울 것으로 예상되고 있다. 이에 주파수 자원 부족 문제를 완화하기 위한 해결책으로 주파수 자원 이용 효율을 향상시키는 방법에 대한 많은 관심이 계속되고 있으며 지금까지 그에 대한 연구 결과들이 다수 발표되고 있다.

한편 최근 스펙트럼 이용 효율을 개선 문제를 좀 더 다른 시각으로 바라보게 하는 흥미로운 측정 결과가 발표된 바가 있다¹¹. 이는 이미 할당된 스펙트럼의 이용 실태를 측정해 본 것으로서 그 내용의 핵심은 할당된 스펙트럼 이용 효율이 예상보다 상당히 낮다는 것이다. 이는 결국 현재 문제가 되고 있는 스펙트럼 부족 현상이 주파수 자원 자체가 상대적으로 적은 것도 있지만, 할당된 스펙트럼의 이용 효율 자체가 낮는데 기인한다는 것을 의미하는 것이고 동시에 현재 사용하고 있는 스펙트럼의 독점적 할당 제도에 그 원인이 있음을 시사한 것이다.

독점적인 스펙트럼 할당의 문제점을 해결하기 위한 방법의 하나는 기존의 스펙트럼 사용자, 즉 주 사용자(primary user)의 권리를 인정하면서 주 사용자가 해당 주파수 대역을 사용하지 않을 때 다른 사용자, 즉 부 사용자(secondary user)가 이를 사용할 수 있도록 허용하는 것이다. 이를 위해서는 부 사용자의 단말기가 주 사용자의 해당 스펙트럼 사용 여부를 감지할 수 있어야 한다. 현재 이에 대한 적절한 방법으로 많은 관심을 끌고 있는 기술이 CR(cognitive radio)기술이다. 최근 IEEE에서는 CR 기술을 사용하여 지역적으로 사용하지 않는 TV 대역을 통신 자원이 부족한 도시 외각 지역에서 사용하기 위하여 802.22 WRAN(wireless regional area networks)라는 표준화를 진행 중에 있다¹². 원래 CR 시스템은 통신 기기 주변의 환경을 인지하고 그에 따라 시스템의 동작 방식을 변경하는 통신 방식을 가리키는 것으로, 스펙트럼 감지(spectrum sensing) 기능은 해당 시스템이 갖추어야 하는 핵심기능이다.

스펙트럼 감지 기술¹³에 대한 초기 연구는 부 사용자 차원에서 개별적으로 수행하는 방식에 관한 것이 대부분이었으나, 이후 스펙트럼 감지 기능을 좀 더 정확하게 그리고 신속하게 수행하기 위한 방안으로 다수의 부 사용자가 스펙트럼 감지에 참여하는 협력 스펙트럼 감지(cooperative spectrum sensing) 기술에 대한 연구가 활발하게 전개되고 있다. 협력 스펙트럼 감지 방식에서 여러 부 사용자의 스펙트럼 감지 결과를 융합하는 방법은 부 사용자가 융합 센터에 전달하는 데이터의 정도(resolution)

에 따라 다음과 같이 2가지로 구분할 수 있다¹⁴⁻¹⁵. 첫째는 개별 부 사용자가 측정한 채널 관측 데이터를 직접 융합 센터에 전송하고, 융합 센터(fusion center)는 이를 적절히 종합하여 주 사용자의 스펙트럼 사용 여부를 판단하는 방식¹⁶이다. 그리고 둘째는 개별 부 사용자가 일차적으로 주 사용자의 스펙트럼 사용 여부를 판단하고 그 결과를 융합 센터에 전달하면 융합 센터는 이를 종합하여 최종적으로 결론을 내리는 방식이다¹⁷⁻¹⁸. 전자의 방식은 채널 관측 데이터 자체를 전송하기 위해 고속의 채널이 확보되어야 한다는 단점이 있어서 현재는 이에 대한 부담이 적은 후자의 방식에 많은 관심이 모아지고 있다. 한편 후자의 경우에 부 사용자의 개별 판단을 토대로 최종적으로 결정을 내리는 방식을 융합 규칙(fusion rule)이라고 부르는데, 대표적인 사례로 AND 융합 규칙, OR 융합 규칙, 다수(majority) 융합 규칙 등을 들 수 있다¹⁸⁻¹⁹. 이들 규칙들을 일반화한 것이 k-out-of-n 융합 규칙인데, 이는 총 n명의 부 사용자 중에서 k명 이상의 부 사용자가 주 사용자의 해당 스펙트럼의 사용을 인지했을 때에 한해 최종적으로 주 사용자가 해당 스펙트럼을 사용하고 있는 것으로 결정하는 방식이다.

스펙트럼 공유를 허용하는 환경에서 주 사용자의 스펙트럼 사용에 대한 우선권을 반영하는 정량적인 기준의 하나로 주 사용자 검파 확률(detection probability)을 들 수 있다. 따라서 스펙트럼 감지 방식은 이 기준을 만족하면서 동시에 부 사용자가 해당 스펙트럼을 사용하는 기회를 최대로 확보할 수 있도록 설계하는 것이 바람직하다. 기존의 연구 발표 결과 중에서 이런 기준에 맞추어 OR 융합 규칙이나 AND 융합 규칙의 성능을 분석한 연구 결과가 발표된 바가 있지만, k-out-of-n 융합 규칙에 대한 성능 분석을 시도한 사례는 없었다. 이에 본 논문에서는 이에 대한 성능 분석 방식을 제안하고 그에 대한 수치 분석 결과를 제시하고자 한다.

본 논문의 구성은 I장 서론에 이어서, II장에서는 본 논문에서 사용하는 시스템 모델을 기술하고, III장에서 k-out-of-n 융합 규칙을 사용하는 협력 스펙트럼 감지 방식에 대한 성능 분석 방식을 제안하며, IV에서 이에 대한 수치분석 사례를 제시한 후 마지막으로 V장에서 결론을 맺는 형태로 되어 있다.

II. 시스템 모델

스펙트럼 감지라는 과정은 결국 주 사용자가 해

당 스펙트럼을 사용하는 지를 판단하는 문제이기 때문에 2가지 가설(hypothesis) 중에서 하나를 선택하는 가설 검정(hypothesis testing)^[10] 문제로 볼 수 있다. 이때 가설 H_1 이 ‘주 사용자가 채널을 사용하고 있다’는 것을 의미하고, 가설 H_0 가 ‘주 사용자가 채널을 사용하지 않고 있다’라는 것을 가리킨다면 i 번째 부 사용자의 수신 신호 $y_i(m)$ 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$y_i(m) = \begin{cases} s_i(m) + u_i(m) & , H_1 \\ u_i(m) & , H_0 \end{cases} \quad (1)$$

위 식에서 $s_i(m)$ 은 시간 m 에서 부 사용자가 수신한 주 사용자의 신호 값을 나타내는 것으로, 그 통계적 특성은 평균이 0이고 분산은 σ_s^2 인 정규 분포(normal distribution)를 따르는 것으로 가정한다. 통계적 특성을 가우시안으로 설정하는 것은 주 사용자와 부 사용자간의 채널 환경이 다중 경로 환경이라는 점을 고려한 것이다^[11]. 그리고 $u_i(m)$ 은 수신 잡음을 표현하는 것으로 평균이 0, 분산이 σ_u^2 인 AWGN으로 가정한다. 또한 서로 다른 부 사용자의 수신 신호는 통계적으로 독립인 것으로 설정한다.

일반적으로 개별 부 사용자가 주 사용자의 스펙트럼을 사용 여부를 판정하기 위한 방법^[3]으로는 정합 필터(matched filter)를 이용한 방법, 신호 특성(feature)를 사용한 방법, 신호 에너지(received signal energy)를 이용한 방법으로 구분할 수 있는데, 본 논문에서는 이 중에서 에너지를 이용한 방법을 사용하고자 한다. 이 방법은 3가지 방법 중에서 가장 간단하며 주 사용자 신호에 대한 별다른 제약이 없다는 장점을 갖기 때문에 스펙트럼 감지를 하기 위한 시험 통계량(test statistic)으로 널리 사용되고 있다. 본 논문에서는 n 명의 부 사용자가 협력하여 스펙트럼 감지를 수행하는 경우를 다루고 있으며 i 번째 부 사용자가 수신하는 신호의 에너지 Y_i 를 다음과 같이 정의하기로 한다.

$$Y_i = \sum_{m=1}^L |y_i(m)|^2 \quad (2)$$

만약 위 식에서 L 은 Y_i 을 계산하는데 사용되는 수신 샘플 개수를 나타낸다. 만약 L 이 충분히 크다면 중심 극한 정리(central limit theorem)에 따라 Y_i 의 확률 분포는 정규 분포에 근접하기 때문에 확

률 밀도함수는 가설에 따라 다음과 같이 2가지 정규 분포 중의 하나를 따르는 것으로 표현할 수 있다^[12].

$$Y_i \sim \begin{cases} N(L(\sigma_u^2 + \sigma_s^2), 2L(\sigma_u^2 + \sigma_s^2)^2) & , H_1 \\ N(L\sigma_u^2, 2L\sigma_u^4) & , H_0 \end{cases} \quad (3)$$

위 식에서 $N(a,b)$ 은 평균이 a 이고, 분산이 b 인 정규 분포의 확률 밀도 함수를 나타내며, 이 때 $\gamma = \sigma_s^2/\sigma_u^2$ 은 신호 대 잡음비(signal to noise ratio)를 의미한다.

에너지 검파 방식을 사용하는 경우에 부 사용자 차원에서 주 사용자가 해당 채널을 사용하는 지를 판단하기 위해서는 측정된 에너지가 검파 임계값 T 이상이 되는지 여부를 검사해야 한다. 그러므로 식 (3)의 확률 분포를 토대로 부 사용자별 검파 확률(detection probability) P_D 과 오류 경보 확률(false alarm probability) P_{FA} 를 계산하면 다음과 같이 나타낼 수 있다^[12].

$$P_D = P(Y_i > T | H_1) = Q\left(\frac{T - L(\sigma_u^2 + \sigma_s^2)}{\sqrt{2L(\sigma_u^2 + \sigma_s^2)^2}}\right) \quad (4)$$

$$P_{FA} = P(Y_i > T | H_0) = Q\left(\frac{T - L\sigma_u^2}{\sqrt{2L\sigma_u^4}}\right) \quad (5)$$

이미 언급한 바와 같이 융합 센터는 부 사용자의 결정을 취합하여 최종 결정을 내린다. 이때 i 번째 부 사용자의 결정을 D_i 라고 하고 부 사용자가 추정한 가설에 따라 D_i 는 그 값이 다음과 같이 설정되는 것으로 한다.

$$D_i = \begin{cases} 1 & , H_1 \\ 0 & , H_0 \end{cases} \quad (6)$$

이때 $Z \equiv \sum_{i=1}^n D_i$ 라고 정의하면, 융합 센터는 k-out-of-n 융합 규칙에 따라 $Z \geq k$ 일 때 가설 H_1 을 선택하고, 그렇지 않을 때는 가설 H_0 를 선택하는 것으로 생각할 수 있다. 그림 1은 본 논문에서 기반으로 하는 협력 스펙트럼 감지 방식의 구조를 나타내고 있다.

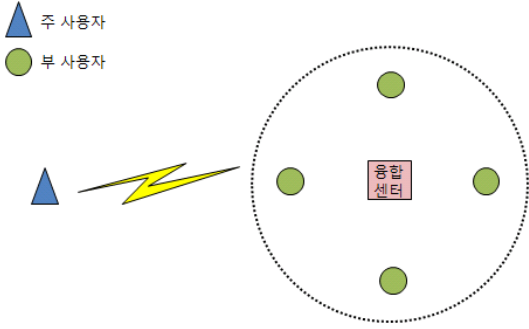


그림 1. 협력 스펙트럼 감지 방식의 구조

III. 성능 분석

본 절에서는 융합 센터가 k-out-of-n 융합 규칙을 사용할 때 부 사용자가 사용하는 검파 임계값 (detection threshold) T 가 스펙트럼 감지 성능과 어떤 관계를 갖는지를 순서 통계를 사용하여 도출하고자 한다.

먼저 n명의 부 사용자가 측정한 에너지 값 Y_1, Y_2, \dots, Y_n 을 크기가 작은 것부터 순서대로 나열했을 때 i번째 있는 값을 $Y_{(i)}$ 라고 표현한다면, $Y_{(1)}$ 는 가장 작은 값이고 $Y_{(n)}$ 는 가장 큰 값이 된다. 그러므로 k-out-of-n 융합 규칙을 사용할 때 최종적으로 얻을 수 있는 최종 검파 확률 P_D^f 와 최종 오류 정보 확률 P_{FA}^f 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_D^f = P(Y_{(n-k+1)} > T | H_1) \quad (7)$$

$$P_{FA}^f = P(Y_{(n-k+1)} > T | H_0) \quad (8)$$

순서 통계에 따르면 가설 $H_j(j=0,1)$ 가 유효하다는 조건 아래에서 $Y_{(n-k+1)}$ 의 확률 밀도 함수를 $f_{Y_{(n-k+1)}|H_j}(y)$ 으로 나타내면, 이는 다음과 같이 개별 부 사용자의 Y_i 에 대한 확률 밀도 함수 $f_{Y|H_j}(y)$ 와 누적 분포 함수(cumulative distribution function) $F_{Y|H_j}(y)$ 의 함수로 표현할 수 있는 것으로 알려져 있다¹³⁾.

$$f_{Y_{(n-k+1)}|H_j}(y) = n! f_{Y|H_j}(y) \times \frac{[1 - F_{Y|H_j}(y)]^{k-1} F_{Y|H_j}(y)^{n-k}}{(k-1)! (n-k)!} \quad (9)$$

위의 확률 밀도함수를 이용하여 P_D^f 를 구해보면 다음과 같이 전개할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_D^f &= 1 - \int_{-\infty}^T f_{Y_{(n-k+1)}|H_1}(x) dx \\ &= 1 - k \binom{n}{k} \int_{-\infty}^T f_{Y|H_1}(x) \times [1 - F_{Y|H_1}(x)]^{k-1} F_{Y|H_1}(x)^{n-k} dx \end{aligned} \quad (10)$$

위 식에서 $\binom{n}{k} \equiv \frac{n!}{(n-k)!k!}$ 로 정의한다. 그리고 이항 정리(binomial expansion)¹⁴⁾를 사용하여 위 식을 전개하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} P_D^f &= 1 - k \binom{n}{k} \sum_{i=0}^{k-1} \binom{k-1}{i} (-1)^i \int_{-\infty}^T f_{Y|H_1}(x) F_{Y|H_1}(x)^{n-k+i} dx \\ &= 1 - k \binom{n}{k} \sum_{i=0}^{k-1} \binom{k-1}{i} (-1)^i \frac{(-1)^i}{n-k+i+1} \times F_{Y|H_1}(T)^{n-k+i+1} \end{aligned} \quad (11)$$

또한 식 (4)와 $F_{Y|H_1}(T) = 1 - P_D$ 인 점을 활용하면

$$\begin{aligned} P_D^f &= 1 - k \binom{n}{k} \sum_{i=0}^{k-1} \binom{k-1}{i} \frac{(-1)^i}{n-k+i+1} \times \left\{ 1 - Q \left(\frac{T - L(\sigma_u^2 + \sigma_s^2)}{\sqrt{2L(\sigma_u^2 + \sigma_s^2)^2}} \right) \right\}^{n-k+i+1} \end{aligned} \quad (12)$$

라는 관계를 얻을 수 있다. 이 식은 개별 부 사용자가 사용하는 검파 임계값 T 와 최종 검파 확률 P_D^f 와의 관계를 보여주고 있다. 만약 주 사용자의 검파 확률을 일정 수준 이상이 되도록 하려면 식 (12)를 이용하여 검파 임계값 T 를 결정해야 한다. 비록 식 (12)가 T 에 대한 명시적인 수학적 표현(explicit form)을 제시하고 있지는 않지만, 간단한 수치 검색(numerical search)을 통하여 적절한 임계값을 결정할 수 있다.

동일한 방법을 사용하면 최종 오류 정보 확률 P_{FA}^f 와 T 의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{FA}^f &= 1 - k \binom{n}{k} \sum_{i=0}^{k-1} \binom{k-1}{i} \frac{(-1)^i}{n-k+i+1} \times \left\{ 1 - Q \left(\frac{T - L\sigma_u^2}{\sqrt{2L\sigma_u^4}} \right) \right\}^{n-k+i+1} \end{aligned} \quad (13)$$

특히 k-out-of-n 융합 규칙에서 $k=1$ 일 때와 $k=n$ 일 때는 각각 OR 융합 규칙과 AND 융합 규

칙이 되는데, 이때 P_D^f 와 P_{FA}^f 는 다음과 같다.

$$P_{D,OR}^f = 1 - \left\{ 1 - Q \left(\frac{T - L(\sigma_u^2 + \sigma_s^2)}{\sqrt{2L(\sigma_u^2 + \sigma_s^2)^2}} \right) \right\}^n \quad (14)$$

$$P_{F,OR}^f = 1 - \left\{ 1 - Q \left(\frac{T - L\sigma_u^2}{\sqrt{2L\sigma_u^4}} \right) \right\}^n \quad (15)$$

$$P_{D,AND}^f = Q \left(\frac{T - L(\sigma_u^2 + \sigma_s^2)}{\sqrt{2L(\sigma_u^2 + \sigma_s^2)^2}} \right)^n \quad (16)$$

$$P_{FA,AND}^f = Q \left(\frac{T - L\sigma_u^2}{\sqrt{2L\sigma_u^4}} \right)^n \quad (17)$$

IV. 수치 결과

본 절에서는 3절에서 도출한 수식을 토대로 부 사용자가 10명인 경우의 성능 분석 결과를 제시하고자 한다. 아래의 수치 분석은 $L=20$, $\sigma_u^2=1$, $\sigma_s^2=1$ 로 전제한 상황에서 도출한 결과이다.

통상적으로 주 사용자의 스펙트럼 사용 권한을 어느 정도 보호하는 지를 최종 검파 확률 P_D^f 로 나타내기도 하지만, 한편으로는 최종 누락 확률(missing probability) P_M^f 로 나타내기도 하는데, 이때 $P_M^f \equiv 1 - P_D^f$ 로 정의한다. 그림 2에서는 여러 가지 k 값에 대하여 최종 누락 확률(missing probability) P_M^f 이 바뀌면 검파 임계값 T 가 어떻게 달라지는 지를 보여주고 있다. 일반적으로 단일 부

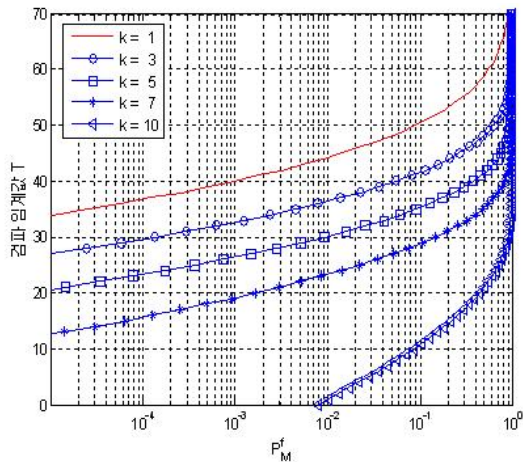


그림 2. 최종 누락 확률 P_M^f 에 따른 검파 임계값 T 의 변화

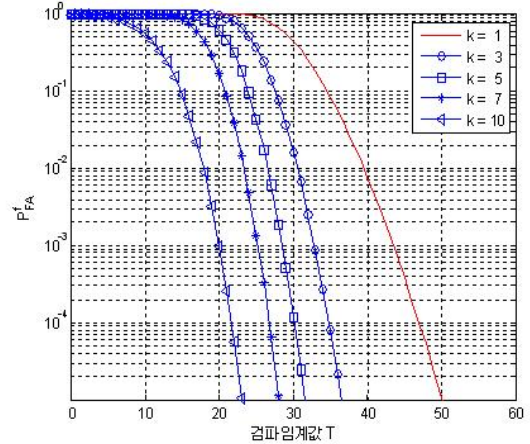


그림 3. 검파 임계값 T 에 따른 최종 오류 정보 확률 P_{FA}^f 의 변화

사용자 차원에서 누락 확률은 검파 임계값이 커질수록 증가하는데 이런 현상이 협력 스펙트럼 감지 방식에서도 성립함을 그림에서 확인할 수 있다. 그리고 주어진 P_M^f 에 대하여 k 값이 커질수록 임계값 T 가 작아지는 현상을 볼 수 있는데, 이는 k 값이 커질수록 k 명 이상의 부 사용자 에너지가 주어진 임계값을 동시에 초과할 확률이 낮아지기 때문이다.

그림 3에서는 여러 가지 k 값에 대하여 검파 임계값 T 에 따라 최종 오류 정보 확률 P_{FA}^f 이 어떻게 달라지는 지를 보여주고 있다. 일반적으로 단일 부 사용자 차원에서 임계값 T 가 작아질수록 오류 정보 확률이 높아지는 것을 예상할 수 있는데, 이런 현상이 협력 스펙트럼 감지 방식에서도 나타난다는 사실을 그림에서 확인할 수 있다. 그리고 주어진 검파 임계값 T 에 대하여 k 값이 클수록 최종 오류 정보 확률 P_{FA}^f 가 낮아지는데 이 또한 k 값이 커질수록 k 명 이상의 부 사용자 에너지가 주어진 임계값을 동시에 초과할 확률이 낮아지기 때문이다.

그림 4에서는 여러 가지 k 에 대하여 최종 누락 확률 P_M^f 과 최종 오류 정보 확률 P_{FA}^f 의 관계를 나타내고 있다. 그림 2에서 최종 누락 확률 P_M^f 에 따라 검파 임계값 T 가 정해지고, 이는 그림 3에서 다시 최종 오류 정보 확률에 대응될 수 있으므로, 이로부터 그림 4의 결과를 예상할 수 있다. 그림 4를 보면 P_M^f 값에 따라 P_{FA}^f 를 최소화 하는 k 값이 달라질 수 있음을 알 수 있는데, 예를 들어 P_M^f 이 낮은 영역에서는 $k=1$ 인 융합 규칙이 가장 낮은

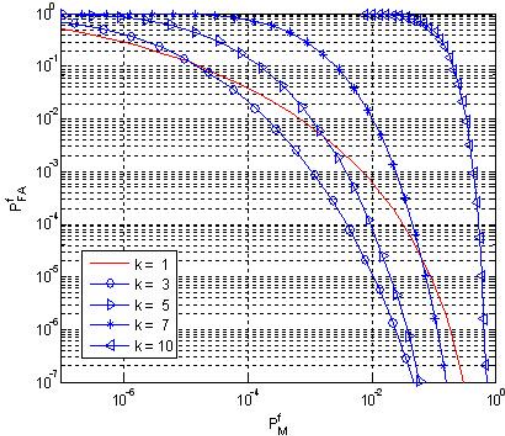


그림 4. 최종 누락 확률 P_M^d 에 따른 최종 오류 경보 확률 P_{FA}^d 의 변화

P_{FA}^d 를 나타내고 그렇지 않은 경우에는 $k=3$ 일 때 가장 좋은 성능을 보임을 확인할 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 k -out-of- n 융합 규칙을 사용하는 협력 스펙트럼 감지 방식의 성능 분석 방법을 제시하였다. 개별 부 사용자 차원의 검파 방법으로 에너지 검파 방식을 선택하였고 이때 측정된 에너지의 통계적 특성을 정규 분포로 근사화하였다. 그리고 부 사용자가 사용하는 검파 임계값과 최종 검파 확률 및 최종 오류 경보 확률간의 관계식을 유도하기 위하여 순서 통계를 사용하였다. 분석 사례로서는 10 명의 부 사용자로 구성된 CR 네트워크에 대하여 검파 임계값과 최종 누락 확률 및 최종 오류 경보 확률 성능을 여러 가지 k 에 대하여 제시하였다. 분석 결과 최종 누락 확률에 따라서 최소의 최종 오를 확률을 제공하는 k 값이 달라진다는 것을 알 수 있었다.

참고 문헌

[1] Federal Communications Commission, "Spectrum policy task force report, (ET Docket No. 02-135)," Nov. 2002. [Online.] Available: raunfoss.fcc.gov/edocs_public/attachmatch/DOC-228542A1.pdf

[2] IEEE 802.22 Wireless RAN, "Functional requirements for the 802.22 WRAN support of standard, IEEE 802.22 - 05/0007r46", Oct. 2005.

[3] A. Ghasemi and E. S. Sousa, "Spectrum sensing in cognitive radio networks: requirements, challenges and design trade-offs[cognitive radio communications]," *IEEE commun. mag.*, vol. 46, no. 4, pp. 32-39, April 2008.

[4] E. Visotsky, S. Kuffner and R. Peterson, "On collaborative detection of TV transmissions in support of dynamic spectrum sharing," *IEEE DySPAN 2005*, pp. 338-345, Nov. 2005.

[5] S. M. Mishra, A. Sahai, and R. W. Broderson, "Cooperative sensing among cognitive radios," in *Proc. IEEE (ICC)*, vol 4, pp. 1658 - 1663 Jun. 2006.

[6] Q. Zhi, C. Shuguang and A. H. Sayed, "Optimal Linear Cooperation for Spectrum Sensing in Cognitive Radio Networks," *IEEE journal of selected topics in signal processing*, vol. 2, no. 1, pp. 28-40, Feb. 2008.

[7] G. Ganesan and Y. Li, "Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks," *IEEE DySPAN 2005*, pp. 137-143, Nov. 2005.

[8] W. Zhang, R. K. Mallik and K. Ben Letaief "Cooperative Spectrum Sensing Optimization in Cognitive Radio Networks," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun.*, pp. 3411-3415, May 2008.

[9] E. Peh and Y. Liang "Optimization for Cooperative Sensing in Cognitive Radio Networks", *WCNC 2007*, pp. 27-32, March 2007.

[10] P. K. Varshney, *Distributed Detection and Data Fusion*, Springer-Verlag, 1997.

[11] J. Ma and Y. Li, "A probability-based spectrum sensing scheme for cognitive radio," *ICC 2008*, pp. 3416-3420, May 2008.

[12] W. Lee and I. F. Akyildiz, "Optimal Spectrum Sensing Framework for Cognitive Radio Networks," *IEEE Transaction on Wireless Commun.*, vol. 7, no. 10, pp. 3845-3857, Oct. 2008.

[13] V. K. Rohatgi, *An Introduction to Probability Theory and Mathematical Statistics*, WILEY, 1976.

[14] M. Abramowitz and I. A. Stegun, *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Table*, DOVER, 1964.

