

공 학 석 사 학 위 논 문

인지 무선 시스템을 위한
협력 스펙트럼 감지 방식의 성능 분석



전 자 공 학 과

이 상 욱

공 학 석 사 학 위 논 문

인지 무선 시스템을 위한 협력 스펙트럼 감지 방식의 성능 분석

지도교수 임 창 현

이 논문을 공학석사 학위논문으로 제출함.



2010월 2월

부 경 대 학 교 대 학 원

전 자 공 학 과

이 상 욱

이상욱의 공학석사 학위논문을 인준함.

2010년 2월 20일



주	심	공학박사	이원창	인
위	원	공학박사	강근택	인
위	원	공학박사	임창헌	인

- 목 차 -

1. 서 론	1
2. 시스템 모델	5
3. k-out-of-n 융합 규칙을 사용하는 협력 스펙트럼 감지 방식의 성능 분석	8
3.1 성능 분석	8
3.2 수치 분석 사례	11
4. 전송 오류가 전송 용량에 미치는 영향 분석	16
4.1 성능 분석	16
4.2 수치 분석 사례	22
5. 결 론	27
6. 참고 문헌	28

- 그림 목 차 -

그림 1. 협력 스펙트럼 감지 방식의 구조.....	7
그림 2. 최종 누락 확률 P_M^f 에 따른 검파 임계값 λ 의 변화.....	13
그림 3. 검파 임계값 λ 에 따른 최종 오류 경보 확률 P_{FA}^f 의 변화.....	14
그림 4. 최종 누락 확률 P_M^f 에 따른 최종 오류 경보 확률 P_{FA}^f 의 변화.....	15
그림 5. P_E 가 최적 감지 시간 τ_{opt} 에 미치는 영향.....	24
그림 6. 최적 감지 시간 τ_{opt} 일 때 P_E 가 $1 - P_{FA,E}^f$ 에 미치는 영향.....	25
그림 7. P_E 가 최대 진송 용량에 미치는 영향.....	26

인지 무선 시스템을 위한 협력 스펙트럼 감지 방식의 성능 분석

이 상 옥

부 경 대 학 교 대 학 원 전 자 공 학 과

요 약

인지 무선(cognitive radio) 네트워크에서 협력 스펙트럼 감지(cooperative spectrum sensing)는 다수의 부 사용자(secondary user)가 서로 협력하여 주 사용자(primary user)의 스펙트럼 사용 여부를 판단하는 방식으로서 페이딩으로 인한 스펙트럼 감지 성능의 저하 문제를 해소할 수 있는 유력한 수단으로 알려져 있다.

협력 스펙트럼 감지를 수행하는 일반적인 형태는 부 사용자가 주 사용자의 스펙트럼 사용 여부를 일차적으로 판정하고 그 결과를 융합 센터(fusion center)로 전송하면 융합 센터는 이를 토대로 최종적으로 판정하는 것이다. 융합 센터에서는 부 사용자들의 판정을 종합하여 최종 판정을 내리는데 이 때 사용할 수 있는 가장 일반적인 융합 규칙으로 k-out-of-n 규칙이 있다. 이 방식은 n명의 부 사용자 중에 k명 이상이 주 사용자가 해당 스펙트럼을 사용하고 있다는 것에 동의할 때에만 이를 최종 판단으로 확정하는 규칙으로 기존의 융합 규칙을 일반화한 것이라 할 수 있다. 본 논문에서는 먼저 주 사용자의 검파 확률을 일정 수준 이상으로 유지한다는 조건하에서 k-out-of-n 융합 규칙을 사용하는 협력 스펙트럼 감지 방식의 성능 분석 방식을 제시하고, 그 적용 사례로 10명의 부 사용자로 구성된 인지 무선 네트워크에 대한 수치 분석 결과를 제시하였다. 또한, 협력 스펙트럼 감지 구조에서 부 사용자의 데이터 전송량을 최대로 할 수 있는 스펙트럼 감지 시간 및 그에 따른 최대 전송 용량에 대한 연구 결과가 이미 발표된 바 있는데, 이 결과는 개별 부 사용자 단말과 융합 센터 사이에 이상적인 전송 채널을 전제로 한 것이어서 전송 오류에 따른 영향을 반영하지 않았다. 이에 부 사용자와 융합 센터간에 데이터 전송 환경을 이진 대칭 채널(binary symmetric channel)로 모델링한 후, 부 사용자가 확보할 수 있는 전송 용량과 이를 최대로 하는 스펙트럼 감지 시간을 분석하였다. 분석 결과 AND 융합 규칙을 사용하는 경우가 OR 융합 규칙을 사용하는 경우보다 전송 오류로 인한 전송 용량(throughput) 손실이 작은 것으로 나타났다.

Performance analysis of cooperative spectrum sensing
for CR systems

Sang-Wook Lee

Department of Electronics, The Graduate School,
Pukyong National University

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 has been recognized as a promising technique to reduce the performance degradation of spectrum sensing in a fading environment.

A popular way of cooperative spectrum sensing is that each secondary user performs spectrum sensing and transmits the associated decisions to a fusion center, which combines the decisions into a final one using some fusion rule. A most general form of the fusion rule is the k -out-of- n fusion rule. 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 present the corresponding numerical results for the case of a CR network with 10 secondary users. Also, there has been an effort to investigate the optimal spectrum sensing interval for maximum throughput for a CR network with cooperative spectrum sensing. This is based on an assumption that the communication channels between each secondary user and the fusion center are ideal and error-free. Motivated by this, we model the channels as binary symmetric channels and examined the effect of the transmission error probability on the maximum throughput and the associated optimal sensing duration. Analysis shows that the performance degradation due to the transmission error is smaller for the case of using the AND fusion rule than for the

OR fusion rule.

key words : cognitive radio; cooperative spectrum sensing; fusion rule; nonideal channel



I. 서론

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 제공하는 형태로 진화하고 있다. 이와 같이 무선 통신 서비스는 그 규모와 종류가 많아지는 추세에 있는데 이를 실제로 구현하기 위해서는 일차적으로 그 만큼 많은 주파수 자원이 필요하다. 그러나 주파수 자원을 임의로 확충하는 것이 용이하지 않다는 점을 고려한다면 단순히 주파수 자원을 할당하는 방식으로는 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 있다[1]. 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 인지 무선(cognitive radio)기술이다. 현재 IEEE에서는 인지 무선기술을 사용하여 지역적으로 사용하지 않는 TV 대역을 통신 자원이 부족한 도시 외각 지역에서 사용하기 위하여 802.22 WRAN(wireless regional area networks) WG(working group)을 만들어 표준화를 진행 중이다[2].

Joseph Mitola에 의해 처음으로 제시된[3-4] 인지 무선 기술은 SDR(Software Defined Radio) 방식에서 발전된 기술로서 주변 환경을 인지하여 최적의 프레임 포맷, 주파수 대역, 변조 방식, 출력 전력 등의 시스템 동작

을 변경하는 통식방식을 가리키는 것으로 스펙트럼 감지(spectrum sensing) 기능은 해당 시스템이 갖추어야 하는 핵심 기능이다. 스펙트럼 감지 기술에 대한 초기 연구는 부 사용자 차원에서 개별적으로 수행하는 방식에 관한 것이었는데 현재까지 알려진 스펙트럼 감지 방법으로는 정합 필터(matched filter)를 이용한 방법, 에너지를 사용한 방법, 그리고 신호의 주기성(cyclostationarity)을 이용한 방법이 있다[5].

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 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[6-7]. 과거에는 협력 스펙트럼에 관한 연구 결과는 부 사용자 단말 간에 스펙트럼 감지 결과는 통계적으로 독립인 것으로 가정하고 접근한 연구 결과들이 주를 이루었다[8-11]. 그러나 실제 환경에서는 음영 효과(shadowing effect)로 인해 서로 가까이에 위치한 부 사용자들의 감지 결정(decision)들은 상관 관계(correlation)를 가질 수 있기 때문에 이런 요인이 협력 스펙트럼 감지 방식의 성능에 미치는 영향을 알아보기 위하여 많은 연구가 진행되고 있다[12-14].

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 있다[7][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 방식[9]이다. 그리고 둘째는 개별 부 사용자가 일차적으로 주 사용자의 스펙트럼 사용 여부를 판단하고 그 결과를 융합 센터에 전달하면 융합 센터는 이를 종합하여 최종적으로 결론을 내리는 방식이다[17-18]. 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 있다[18-19]. 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.

인지 무선 네트워크 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 순서 통계를 사용하여 융합 센서가 k-out-of-n 융합 규칙을 사용할 때 부 사용자가 사용하는 검파 임계값(detection threshold) λ 가 스펙트럼 감지 성능과 어떤 관계를 갖는지를 알아보고 그에 대한 수치 분석 결과를 제시하고자 한다.

한편 인지 무선 시스템에서 부 사용자는 주 사용자의 통신 활동에 방해가 되지 않아야 하므로 스펙트럼 감지 기능을 중단 없이 계속해서 수행하는 것이 바람직하다. 그러나 현실적으로는 스펙트럼 감지와 데이터 전송을 함께 수행하기 어렵기 때문에 일정 시간 간격으로 스펙트럼 감지 기능과 데이터 전송을 번갈아 가며 실행하는 방식을 사용한다. 주기적 감지 방식(periodic sensing)은 하나의 전송 프레임을 스펙트럼 감지 슬롯과 데이터 전송 슬롯으로 구분하여 사용하는데, 이 때 스펙트럼 감지에 할당된 시간이 길면 길수록 오류 경고 확률(false alarm probability)은 낮아져 스펙트럼 활용 가능성이 높아지지만 다른 한편으로 데이터 전송 시간은 짧아져 데이터 전송량이 줄어들게 되는 특징이 있다. 최근 발표된 연구 결과[20]에서는 스펙트럼 감지 정확도를 적정 수준 이상으로 유지하면서 전송 용량을 최대로 하는 스펙트럼 감지 시간을 분석한 바 있다. 융합 센터를 사용하는 협력 스펙트럼 감지 방식에서는 개별 부 사용자가 각자 판단한 스펙트럼 감지 결과를 융합 센터로 전송해야 한다. [20]에서는 이들 전송이 완벽한 전송 채널을 통해 이루어진다고 가정하였기 때문에 전송 오류를 고려하지 않았다. 하지만 실제 환경에서는 이를 보장할 수 없기 때문에 전송 오류에 의한 영향을 고려할 필요성이 있다. 이에 본 논문에서는 인지 무선 시스템에서 개별 부 사용자와 융합 센터간의 전송 채널을 이진 대칭 채널(binary symmetric channel)로 모델링하고, 이로 인해 발생하는 전송 오류가 전송 용량 및 최적 스펙트럼 감지 시간에 어떠한 영향을 미치는 지를 분석하였다.

본 논문에서는 I 장 서론에 이어 II장에서는 본문에서 고려하는 스펙트럼 감

지 시스템 모델에 대해서 기술하고, III장에서는k-out-of-n 융합 규칙을 사용하는 협력 스펙트럼 감지 방식의 성능 분석 방법을 제시하며, IV장에서는 인지 무선 시스템에서 전송 오류가 전송 용량에 미치는 영향을 알아보고, 마지막으로 V장에서 결론을 제시하였다.



II. 시스템 모델

부 사용자들이 스펙트럼을 이용하기 위해서는 우선적으로 주 사용자의 스펙트럼 사용 여부를 감지해야 한다. 만약 i 번 째 부 사용자가 샘플링 주파수 f_s 의 속도로 수신 신호를 샘플링한다면, 해당 부 사용자가 n 번째 수신한 신호 $r_i(n)$ 은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$r_i(n) = \begin{cases} s(n) + u(n), & H_1 \\ u(n), & H_0 \end{cases}, \quad (1)$$

위 식에서 $s(n)$ 은 주 사용자 신호의 n 번째 샘플을 나타내는 것으로 평균은 0이고 분산은 σ_p^2 인 통계적인 양이라고 가정한다. 그리고 $u(n)$ 은 수신 잡음을 나타내는 것으로 평균이 0이고 분산은 σ_u^2 인 CSCG (circularly symmetric complex gaussian) 잡음으로 가정한다. 그리고 $s(n)$ 과 $u(n)$ 은 서로 통계적으로 독립인 것으로 가정한다. 부 사용자는 수신한 신호 $r_i(n)$ 를 근거로 하여 주 사용자의 활동 유무를 판단하게 되는데, 이는 통계학의 가설 검정(hypothesis testing) 문제로 볼 수 있으며, 여기에 관련된 두 가지 가설(hypothesis)은 “주 사용자가 채널을 사용하고 있다”와 “그렇지 않다”로 설정할 수 있는데 이들을 편의상 각각 H_1, H_0 로 표시하고자 한다.

수신 신호의 에너지를 토대로 한 스펙트럼 감지 방법은 그 구조가 간단하고 주 사용자가 어떤 형태의 신호를 사용하더라도 적용할 수 있기 때문에 가장 널리 사용되는 방법이다. 본 논문에서도 이를 사용하여 스펙트럼 감지를 수행하는 것으로 가정한다.

주기적인 스펙트럼 감지를 사용하는 인지 무선 시스템은 하나의 프레임을 스펙트럼 감지 슬롯과 데이터 전송 슬롯으로 구분하여 사용하는데, 스펙트럼 감지 슬롯의 길이를 τ 라고 하고 이 기간 동안 수신한 샘플의 개수를 N 이라고 할 때 스펙트럼 감지에 사용할 신호의 시험 통계량(test statistic) Y 는 다음과 같이 정의한다.

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

위 식에서 N 은 τf_s 보다 크지 않은 자연수를 나타내는 것으로 본 논문에서는 편의상 $N = \tau f_s$ 으로 가정한다. 만약 N 이 충분히 큰 수라고 한다면 중심 극한 정리(central limit theorem)에 따라 Y 의 통계 분포는 정규 분포(normal distribution)에 가깝게 된다. 주 사용자 신호는 복소 PSK 변조 신호라고 가정 한 상태에서 어떤 가설이 유효하냐에 따라 Y 의 확률 밀도 함수는 다음 중 하나로 나타낼 수 있다[20].

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

여기에서 $N(a,b)$ 는 평균이 a , 분산이 b 인 정규 분포를 나타내며, $\gamma = \sigma_p^2/\sigma_u^2$ 는 신호 대 잡음비(signal to noise ratio)로서 주 사용자의 신호와 잡음의 전력 비율을 의미한다. 에너지 검파기를 이용한 스펙트럼 감지 방식은 부 사용자가 측정한 수신 에너지의 크기를 검파 임계값 λ 와 비교하여 주 사용자의 채널 사용 여부를 판단한다. 위의 식(3)의 확률 밀도 함수를 토대로 하여 부 사용자별 오류 정보 확률(false alarm probability) P_{FA} 과 검파 확률(detection probability) P_D 를 수학적으로 나타내면 다음과 같다[20].

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

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

협력 스펙트럼 감지 방식에서는 개별 부 사용자들이 스펙트럼 감지를 통해 주 사용자의 출현 여부를 판정한 후 그 결과를 융합 센터로 보내고, 융합 센터에서

는 정해진 융합 규칙에 이를 종합하여 최종 판정 결과를 도출한다. 그림 1은 본 논문에서 기반으로 하는 협력 스펙트럼 감지 방식의 구조를 나타내고 있다.

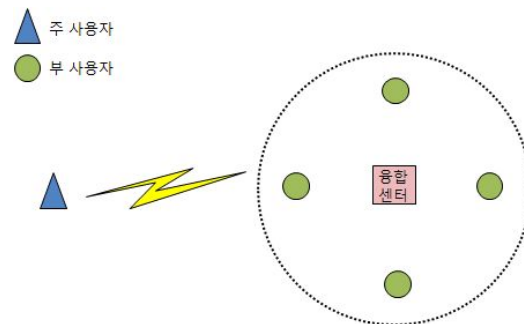


그림 1. 협력 스펙트럼 감지 방식의 구조



Ⅲ. k-out-of-n 융합 규칙을 사용하는 협력 스펙트럼 감지 방식의 성능 분석

3.1 성능 분석

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. 인지 무선 네트워크에서 n 명의 부 사용자가 측정한 에너지 값 $Y_1, Y_2, \dots, Y_n$ 을 크기가 작은 것부터 순서대로 나열했을 때 i 번째 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 경보 확률 P_{FA}^f 는 다음과 같이 표현할 수 있다.

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

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

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 있다

[23].

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

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

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

위 식에서 $\binom{n}{k} \equiv \frac{n!}{(n-k)!k!}$ 로 정의한다. 그리고 이항 정리(binomial expansion)[24]를 사용하여 위 식을 전개하면 다음과 같은 결과를 얻을 수 있다.

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

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

$$P_D^f = 1 - k \binom{n}{k} \sum_{i=0}^{k-1} \binom{k-1}{i} \frac{(-1)^i}{n-k+i+1} \left\{ 1 - Q\left(\left(\frac{\lambda}{\sigma_u^2} - \gamma - 1\right) \sqrt{\frac{\tau f_s}{2\gamma+1}}\right) \right\}^{n-k+i+1} \quad (12)$$

라는 관계를 얻을 수 있다. 이 식은 개별 부 사용자가 사용하는 검파 임계값 λ 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 λ 를 결정해야 한다. 비록 식 (12)가 λ 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 λ 의 관계는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{FA}^f = 1 - k \binom{n}{k} \sum_{i=0}^{k-1} \binom{k-1}{i} \frac{(-1)^i}{n-k+i+1} \left\{ 1 - Q \left(\left(\frac{\lambda}{\sigma_u^2} - 1 \right) \sqrt{\tau f_s} \right) \right\}^{n-k+i+1} \quad (13)$$

특히 k-out-of-n 융합 규칙에서 $k=1$ 일 때와 $k=n$ 일 때는 각각 OR 융합 규칙과 AND 융합 규칙이 되는데, 이때 P_D^f 와 P_{FA}^f 는 다음과 같다.

$$P_{D,OR}^f = 1 - \left\{ 1 - Q \left(\left(\frac{\lambda}{\sigma_u^2} - \gamma - 1 \right) \sqrt{\frac{\tau f_s}{2\gamma+1}} \right) \right\}^n \quad (14)$$

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

$$P_{D,AND}^f = Q \left(\left(\frac{\lambda}{\sigma_u^2} - \gamma - 1 \right) \sqrt{\frac{\tau f_s}{2\gamma+1}} \right)^n \quad (16)$$

$$P_{FA,AND}^f = Q \left(\left(\frac{\lambda}{\sigma_u^2} - 1 \right) \sqrt{\tau f_s} \right)^n \quad (17)$$



3.2 수치 분석 사례

본 절에서는 3.1절에서 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 λ 가 어떻게 달라지는 지를 보여주고 있다. 일반적으로 단일 부 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 λ 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 λ 에 따라 최종 오류 정보 확률 P_{FA}^f 이 어떻게 달라지는 지를 보여주고 있다. 일반적으로 단일 부 사용자 차원에서 임계값 λ 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 λ 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 λ 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 최소로 하는 k 값이 달라질 수 있음을 알 수 있는데, 예를 들어 P_M^f 이 낮은 영역에서는 $K=1$ 인 융합 규칙이 가장 낮은 P_{FA}^f 를 나타내고 그렇지 않은 경우에는 $K=3$ 일 때 가장 좋은 성능을 보임을 확인할 수 있다.



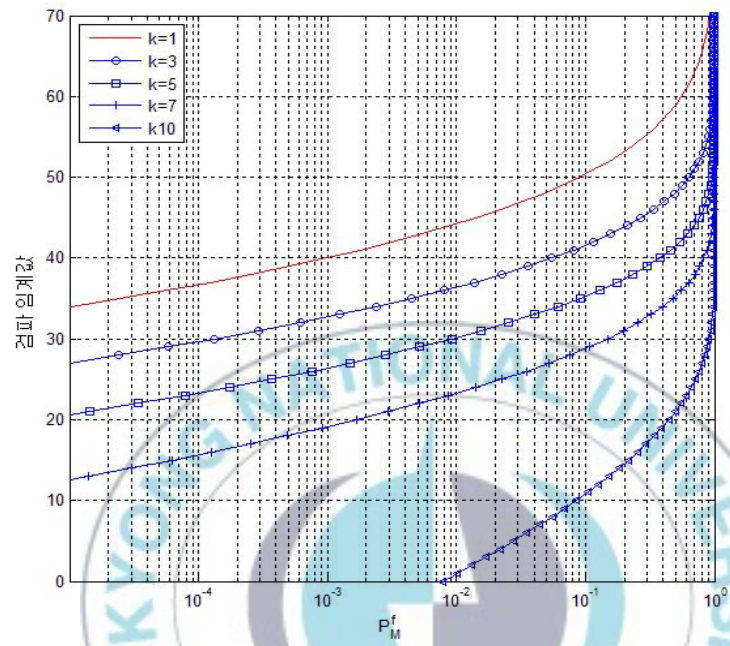


그림 2. 최종 누락 확률 P_M^f 에 따른 검파 임계값 λ 의 변화

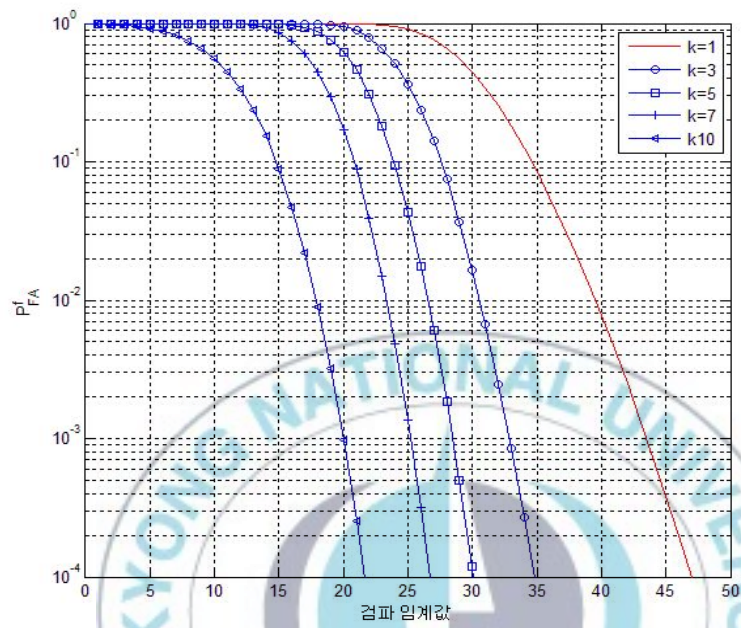


그림 3. 검파 임계값 λ 에 따른 최종 오류 경보 확률 P_{FA}^f 의 변화

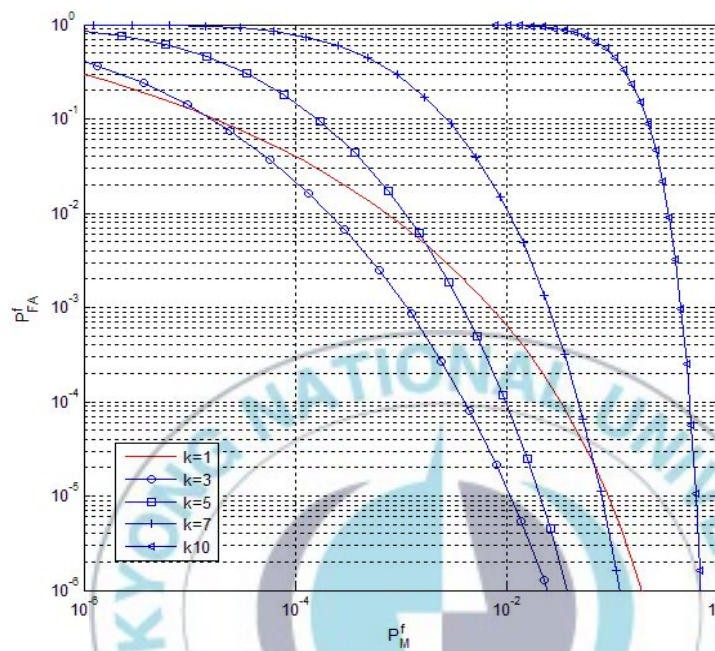


그림 4. 최종 누락 확률 P_M^f 에 따른 최종 오류 경보 확률 P_{FA}^f 의 변화

IV. 인지 무선 시스템에서 전송 오류가 전송 용량에 미치는 영향 분석

4.1 성능 분석

본 장에서는 협력 스펙트럼 감지 방식을 사용하는 인지 무선 시스템에서 개별 부 사용자와 융합 센터 사이의 전송 채널이 이상적이지 않다는 것으로 표현하는 방법으로 해당 채널을 오류 확률이 P_E 인 이진 대칭 채널(binary symmetric channel)로 모델링하고자 한다. 그리고 융합 규칙으로 AND 규칙과 OR 규칙을 고려하기로 한다.

[20]에서는 주 사용자 검출 확률을 적정 수준 이상으로 유지하면서 전송 용량을 최대로 하는 최적의 스펙트럼 감지 시간을 도출하였다. 이 연구에서는 주 사용자가 활동하지 않는 것을 제대로 판단한 경우나 주 사용자가 활동하지만 이를 잘못 판단한 경우 모두에 대한 전송 용량을 고려하였지만, 본 논문에서는 편의상 전자의 경우만을 전송 용량에 고려하여 스펙트럼 감지 시간이 τ 일 때 전송 용량 $R(\tau)$ 를 다음과 같이 정의하고자 한다.

$$R(\tau) \equiv \frac{T-\tau}{T} C_0 P(H_0)(1-P_{FA}) \quad (18)$$

위 식에서 T 는 전송 프레임의 길이를 나타하고, P_{FA} 는 오류 경보 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 $C_0 = \log_2(1 + \sigma_s^2/\sigma_u^2)$ 로 나타낼 수 있다. 그리고 개별 부 사용자 단말이 갖는 검파 성능이 동일하다고 가정한다.

부 사용자와 융합 센터간의 데이터 전송 환경을 이진 대칭 채널(symmetry channel)로 가정하였기 때문에 부 사용자 단말에서 발생하는 오류 경보 확률과

검파 확률을 각각 P_{FA} , P_D 라고 하면 전송 오류를 감안한 오류 경보 확률 $P_{FA,E}$ 과 검파 확률 $P_{D,E}$ 는 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{FA,E} = (1 - P_E)P_{FA} + P_E(1 - P_{FA}) \quad (19)$$

$$P_{D,E} = (1 - P_E)P_D + P_E(1 - P_D) \quad (20)$$

여기에 식 (4)과 (5)를 대입하면 $P_{FA,E}$ 와 $P_{D,E}$ 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{FA,E} = (1 - 2P_E)Q\left(\left(\frac{\lambda}{\sigma_u^2} - 1\right)\sqrt{\tau f_s}\right) + P_E \quad (21)$$

$$P_{D,E} = (1 - 2P_E)Q\left(\left(\frac{\lambda}{\sigma_u^2} - \gamma - 1\right)\sqrt{\frac{\tau f_s}{2\gamma + 1}}\right) + P_E \quad (22)$$

A. AND 융합 규칙을 사용하는 경우

인지 무선 시스템의 융합 센터가 AND 융합 규칙을 사용할 때 전송 오류를 감안한 최종 오류 경보 확률 $P_{FA,AND,E}^f$ 와 최종 검파 확률 $P_{D,AND,E}^f$ 는 각각 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_{FA,AND,E}^f = (P_{FA,E})^n \quad (23)$$

$$P_{D,AND,E}^f = (P_{D,E})^n \quad (24)$$

위 식에서 n 은 부 사용자 수를 가리킨다. 여기서 인지 무선 시스템이 목표로 하는 최종 검파 확률이 $\overline{P_D^f}$ 로 주어졌다면, 단일 부 사용자가 유지해야 하는 검파 확률 $P_{D,E} = \sqrt[n]{\overline{P_D^f}}$ 가 된다. 그리고 $\overline{P_D^f}$ 를 사용하여 식(22)을 검파 임계값 λ 에 관한 식으로 정리하면 다음과 같다.

$$\lambda = \sigma_u^2 \left(Q^{-1} \left(\frac{\sqrt[n]{\overline{P_D^f}} - P_E}{1 - 2P_E} \right) \sqrt{\frac{2\gamma + 1}{\tau f_s}} + \gamma + 1 \right) \quad (25)$$

위 식에서 $Q^{-1}(x)$ 은 $Q(x)$ 의 역함수를 의미한다. 그리고 식(21)와 식(23) 그리고 식(25)을 이용하면 $P_{FA,AND,E}^f$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{FA,AND,E}^f = \{P_E + (1 - 2P_E)Q(\alpha + \gamma\sqrt{\tau f_s})\}^n \quad (26)$$

위 식에서 $\alpha \equiv \sqrt{2\gamma+1} Q^{-1}\left(\frac{\sqrt[n]{P_D^f} - P_E}{1-2P_E}\right)$ 이다. 식 (26)은 AND 융합 규칙을 사용하는 인지 무선 시스템이 주 사용자에게 대한 목표 검파 확률 $\overline{P_D^f}$ 을 유지하면서 어느 정도의 오류 경보 확률을 달성할 수 있는지 보여준다. 여기에서 눈여겨 볼 것은 Q 함수의 특성 때문에 $Q^{-1}(\cdot)$ 함수의 인자로 사용될 값은 다음의 부등관계를 만족시켜야 한다.

$$P_E < \sqrt[n]{P_D^f} < 1 - P_E \quad (27)$$

식(27)로부터 $P_E < 1 - P_E$ 이므로 $P_E < \frac{1}{2}$ 이어야 한다. 식(27)는 P_E 가 0일 때는 $\overline{P_D^f}$ 가 임의의 값을 가질 수 있지만 그렇지 않은 경우에는 P_E 값에 따라서 $\overline{P_D^f}$ 의 범위가 축소된다는 것을 의미한다. 따라서 이 범위에 속하지 않는 $\overline{P_D^f}$ 는 달성할 수 없다는 것을 알 수 있다. 그리고 식(18)과 식(26)를 사용하면 AND 융합 규칙을 사용하는 인지 무선 시스템의 전송 용량 $R_{AND,E}(\tau)$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{AND,E}(\tau) = \left(1 - \frac{\tau}{T}\right) C_0 P(H_0) \left[1 - \{P_E + (1 - 2P_E)Q(\alpha + \gamma\sqrt{\tau f_s})\}^n\right] \quad (28)$$

식(28)에서 $R_{AND,E}(\tau)$ 는 $0 \leq \tau \leq T$ 구간에 대하여 연속이므로 이 구간 내에서

최대값을 갖는다. 그리고 τ 가 증가할 때 $\left(1 - \frac{\tau}{T}\right)$ 는 단조 감소하고, $P_E < \frac{1}{2}$ 라는 조건아래에서 $\left[1 - \{P_E + (1 - 2P_E)Q(\alpha + \gamma\sqrt{\tau f_s})\}^n\right]$ 는 단조 증가하기 때문에 $R_{AND,E}(\tau)$ 함수는 위로 볼록한 형태의 함수가 됨을 알 수 있다. 따라서 $R_{AND,E}(\tau)$ 를 최대로 하는 τ 를 구하는 방법은 $R_{AND,E}(\tau)$ 에 대한 미분 값이 0이 되는 τ 를 구하는 것이다. $R_{AND,E}(\tau)$ 에 대한 미분을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{R'_{AND,E}(\tau)}{C_0 P(H_0)} = & -\frac{1}{T} + \frac{1}{T} \{P_E + (1 - 2P_E)Q(\alpha + \gamma\sqrt{\tau f_s})\}^n \\ & - n(1 - 2P_E) \frac{\gamma\sqrt{f_s}\left(1 - \frac{\tau}{T}\right)}{2\sqrt{2\pi\tau}} \exp\left(-\frac{(\alpha + \gamma\sqrt{\tau f_s})^2}{2}\right) \times \\ & \left[1 - \{P_E + (1 - 2P_E)Q(\alpha + \gamma\sqrt{\tau f_s})\}^{n-1}\right] \end{aligned} \quad (30)$$

식 (30)를 0이 되게 하는 τ_{opt} 를 명시적(explicit)으로 나타내는 식을 구하기 어렵기 때문에 본 논문에서는 이를 수치 검색(numerical search)을 사용하여 구하기로 한다.

B. OR 융합 규칙을 사용하는 경우

AND 융합 규칙을 사용하는 경우와 마찬가지로 OR 융합 규칙을 사용하는 경우에 대하여 스펙트럼 감지 시간 τ 와 전송 용량 $R_{OR,E}(\tau)$ 의 관계를 유도하기로 한다. 먼저 OR 융합 규칙을 사용하는 경우 최종 오류 경보 확률 $P_{FA,OR,E}^f$ 과 최종 검파 확률 $P_{D,OR,E}^f$ 을 각각 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{FA,OR,E}^f = 1 - (1 - P_{FA,E})^n \quad (31)$$

$$P_{D,OR,E}^f = 1 - (1 - P_{D,E})^n \quad (32)$$

여기서 인지 무선 시스템이 목표로 하는 최종 검파 확률이 $\overline{P_D^f}$ 로 주어졌다면 인지 무선 시스템의 단일 부 사용자가 유지해야 하는 검파 확률은

$P_{D,E} = 1 - \sqrt[n]{1 - \overline{P}_D^f}$ 가 된다. 그리고 식(32)을 이용하면 최종 검파 확률 $\overline{P}_D^f$ 을 달성하기 위한 검파 임계값 λ 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda = \sigma_u^2 \left(Q^{-1} \left(\frac{1 - \sqrt[n]{1 - \overline{P}_D^f} - P_E}{1 - 2P_E} \right) \sqrt{\frac{2\gamma + 1}{\tau f_s}} + \gamma + 1 \right) \quad (33)$$

또한 식(21)와 식(31) 그리고 식(33)을 이용하면 최종적으로 $P_{FA,OR,E}^f$ 을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{FA,OR,E}^f = 1 - \left[1 - \{P_E + (1 - 2P_E)Q(\beta + \gamma\sqrt{\tau f_s})\} \right]^n \quad (34)$$

위 식에서 $\beta = \sqrt{2\gamma + 1} Q^{-1} \left(\frac{1 - \sqrt[n]{1 - \overline{P}_D^f} - P_E}{1 - 2P_E} \right)$ 이다. 식(34)은 OR 융합 규칙을 사용하는 인지 무선 시스템이 주 사용자의 검파 확률 $\overline{P}_D^f$ 을 유지하면서 어느 정도의 오류 경보 확률을 달성할 수 있는지 보여준다. AND 융합 규칙을 사용하는 경우처럼 식 (34)에 사용된 Q함수의 특성 때문에 OR 융합 규칙을 사용하는 경우에도 인지 무선 시스템이 설정할 수 있는 $\overline{P}_D^f$ 의 범위는 다음과 같이 제한된다.

$$P_E < \sqrt[n]{1 - \overline{P}_D^f} < 1 - P_E \quad (35)$$

식(35)로부터 $P_E < 1 - P_E$ 이므로 $P_E < \frac{1}{2}$ 이어야 한다. 식(34)을 식(18)에 대입하면 OR 융합 규칙을 사용하는 인지 무선 시스템의 전송 용량 $R_{OR,E}(\tau)$ 를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_{OR,E}(\tau) = \left(1 - \frac{\tau}{T}\right) C_0 P(H_0) [1 - \{P_E + (1 - 2P_E)Q(\beta + \gamma\sqrt{\tau f_s})\}]^n \quad (36)$$

앞에서도 언급한 바와 같이 $R_{OR,E}(\tau)$ 는 $0 \leq \tau \leq T$ 구간에 대하여 연속이고, τ 가 증가할 때 $\left(1 - \frac{\tau}{T}\right)$ 는 그 값이 단조 감소하고, $P_E < \frac{1}{2}$ 조건아래에서 $[1 - \{P_E + (1 - 2P_E)Q(\beta + \gamma\sqrt{\tau f_s})\}]^n$ 는 단조 증가하기 때문에 $R_{OR,E}(\tau)$ 함수는 위로 볼록한 형태의 함수가 됨을 알 수 있다. 그러므로 $R_{OR,E}(\tau)$ 은 $0 \leq \tau \leq T$ 구간 내에서 최대값을 갖게 된다는 것을 알 수 있다. $R_{OR,E}(\tau)$ 를 최대로 하는 τ 를 구하는 방법은 $R_{OR,E}(\tau)$ 에 대한 미분 값이 0이 되는 τ 를 구하는 것이다. $R_{OR,E}(\tau)$ 에 대한 미분을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{R'_{OR,E}(\tau)}{C_0 P(H_0)} = & -\frac{1}{T} [1 - \{P_E + (1 - 2P_E)Q(\beta + \gamma\sqrt{\tau f_s})\}]^n \\ & - n(1 - 2P_E) \frac{\gamma\sqrt{f_s}\left(1 - \frac{\tau}{T}\right)}{2\sqrt{2\pi\tau}} \exp\left(-\frac{(\beta + \gamma\sqrt{\tau f_s})^2}{2}\right) \times \\ & [1 - \{P_E + (1 - 2P_E)Q(\beta + \gamma\sqrt{\tau f_s})\}]^{n-1} \end{aligned} \quad (37)$$

이 경우에도 식 (37)을 0이 되게 하는 τ_{opt} 를 명시적(explicit)으로 결정하기 어렵기 때문에 본 논문에서는 이를 수치 검색을 사용하여 그 값을 결정하는 것으로 한다.

4.2 수치 분석 사례

본 절에서는 4.1절에서 도출한 수식을 토대로 부 사용자와 융합 센터간의 전송 오류 확률 P_E 가 최적 스펙트럼 감지 시간에 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 하였다.

그림 5에서는 최적 스펙트럼 감지 시간 τ_{opt} 이 인지 무선 시스템의 전송 오류 P_E 에 따라서 어떻게 변하는지는 보여주고 있다. AND 융합 규칙을 사용하는 경우에는 전송 오류 P_E 가 커질수록 최적 감지 시간 τ_{opt} 가 빠르게 증가하는 현상을 볼 수 있는데, 이는 $P_D \geq \frac{1}{2}$ 인 경우에 P_E 가 커질수록 최종 검파 확률 $P_{D,AND,E}^f$ 이 작아지기 때문이다. 반면에 OR 융합 규칙을 사용하는 경우에는 전송 오류 P_E 가 커질수록 최적 감지 시간이 짧아지는 현상을 볼 수 있는데, 이는 $P_D \geq \frac{1}{2}$ 인 경우에 P_E 가 커질수록 최종 검파 확률 $P_{D,OR,E}^f$ 이 증가하기 때문이다.

그림 6는 전송 오류 P_E 에 따라서 $1-P_{FA,E}^f$ 이 어떻게 변하는 지를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 AND 융합 규칙을 사용하는 경우에는 P_E 가 증가할 때 그 값에 변화가 별로 없지만, OR 규칙을 사용하는 경우에는 상대적으로 빠르게 감소하는 것을 확인할 수 있다.

그림 7에서는 $n=5$, $n=10$ 인 경우에 최대 전송 용량이 인지 무선 시스템의 전송 오류 P_E 에 따라서 어떻게 변하는지를 보여주고 있다. 이 결과는 식(6)에서 알 수 있는 것처럼 그림 1과 그림 2의 결과로부터 유추할 수 있다. 일반적으로 전송 오류가 존재하는 경우에는 인지 무선 시스템이 사용할 수 있는 전송 용량이 작아지게 되는데 이런 현상을 그림 3에서도 확인할 수 있다. 그러나 AND 융합 규칙을 사용하는 경우에는 전송 용량의 감소가 크지 않지만 OR 규칙을 사용하는 경우에는 전송 오류가 증가함에 따라 빠르게 감소하는 것을 확인할 수 있다. 전송 용량은 식(18)에서도 보는 바와 같이 스펙트럼 감지 시간과 오류

경보 확률에 따라 결정되는데 AND 융합 규칙을 사용하는 경우에는 P_E 가 증가할 때 스펙트럼 감지 시간 증가로 인한 전송 용량의 손실이 오류 경보 확률로 인한 전송 용량의 증가로 상당부분 상쇄되기 때문에 전체 전송 용량의 감소가 크지 않지만, OR 융합 규칙을 사용하는 경우에는 스펙트럼 감지 시간 감소로 인한 전송 용량 증가보다 오류 경보 확률의 증가로 인한 손실이 상당히 크기 때문에 결과적으로 전체 전송 용량은 많이 감소하였다. 그리고 부 사용자의 수가 많아질수록 전송 에러로 인한 채널 용량 감쇠가 더 큰 것으로 나타났다.



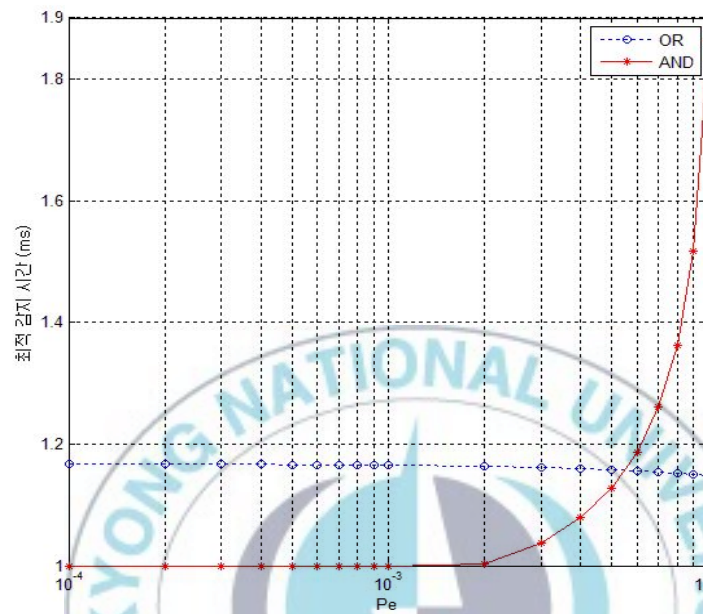


그림 5. P_E 가 최적 감지 시간 τ_{opt} 에 미치는 영향

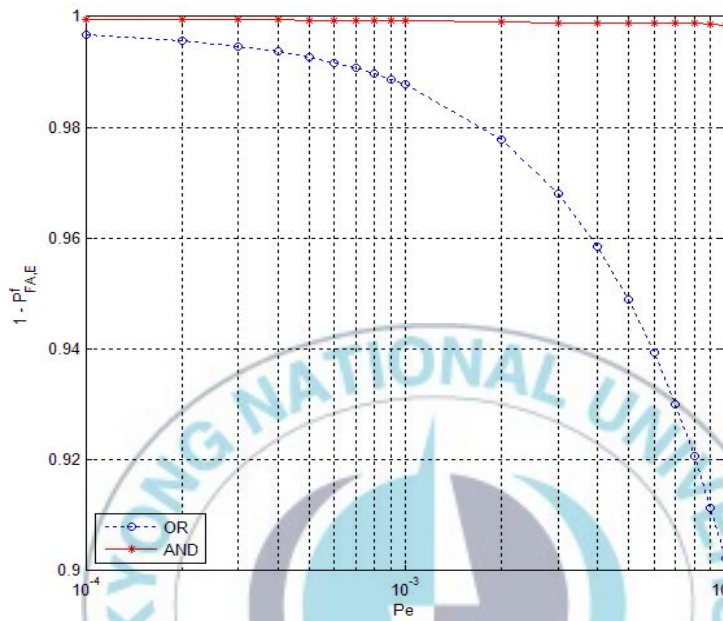


그림 6. 최적 감지 시간 τ_{opt} 일 때 P_e 가 $1 - P_{FA,E}^f$ 에 미치는 영향

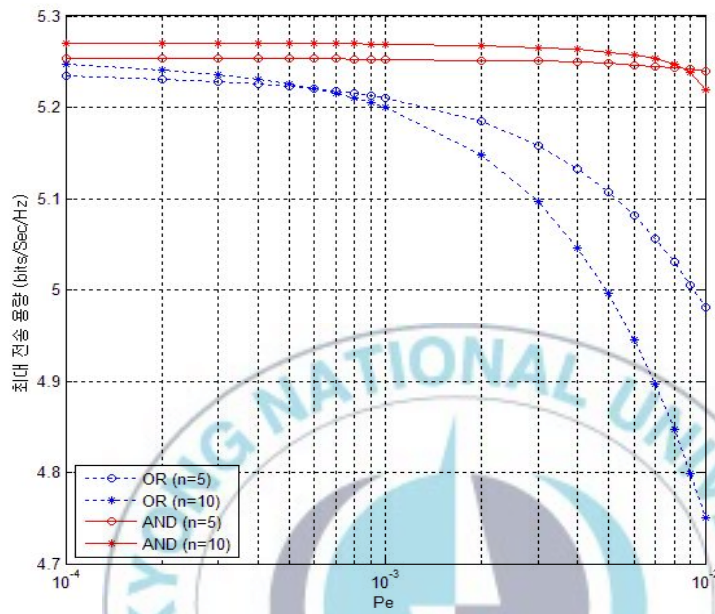


그림 7. P_E 가 최대 전송 용량에 미치는 영향

V. 결 론

본 논문에서는 인지무선 시스템을 위한 협력스펙트럼 감지방식의 성능 분석을 시도하였다. 이 때 개별 부 사용자 차원의 검파 방법으로는 에너지 검파 방식을 선택하였고 부 사용자는 주기적인 스펙트럼 감지를 실시하는 것으로 가정하였다. 이러한 시스템 구조에서 본 논문에서는 k -out-of- n 융합 규칙을 사용하는 협력 스펙트럼 감지 방식의 성능 분석 방법을 제시하였다. 이 때 부 사용자가 사용하는 검파 임계값과 최종 검파 확률 및 최종 오류 경보 확률간의 관계식을 유도하기 위하여 순서 통계를 사용하였다. 분석 사례로서는 10명의 부 사용자로 구성된 인지 무선 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 오류 확률을 제공하는 k 값이 달라진다는 것을 알 수 있었다.

또한 본 논문에서는 주기적인 스펙트럼 감지를 수행하는 인지 무선 시스템에서 부 사용자와 융합 센터 간에 발생할 수 있는 데이터 전송 오류가 전송 용량과 최적 스펙트럼 감지 시간에 미치는 영향에 대해 기술하였다. 이 때 부 사용자와 융합 센터간의 데이터 전송 환경은 이진 대칭 채널로 가정하였다. 분석 사례로는 AND와 OR 융합 규칙을 사용하는 협력 스펙트럼 감지 방식에서 데이터 전송 오류로 인한 전송 용량과 최적 스펙트럼 감지 시간의 변화를 분석하였다. 10명의 부 사용자를 사용하는 경우에 대하여 사례 분석을 한 결과 AND 융합 규칙을 사용하는 경우가 OR 융합 규칙을 사용하는 경우보다 전송 오류에 대하여 강한 특성을 보인다는 것을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [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] J. Mitola III, "Cognitive Radio for Flexible Mobile Multimedia Communications," *IEEE Mobile Multimedia Conf.* 1999, pp.3-10.
- [4] J. Mitola III, "Cognitive Radio: An Integrated Agent Architecture for Software Radio Architecture," *Ph.D. Dissertation, Royal Institute of Technology(KTH)*, May, 2000.
- [5] D. Cabric, S. M. Mishra, and R. W. Brodersen, "Implementation I issues in spectrum sensing for cognitive radios," in *Proc. IEEE Asilomar Conference on Signals, Systems and Computers 2004*, pp. 772-776, Nov. 2004
- [6] M. Gandetto and C. Regazzoni, "Spectrum sensing:a distributed approach for cognitive terminals", *IEEE J. Select. Areas Commu.*, vol. 25, no. 3, pp. 546-557, Apr. 2007
- [7] S. M. Mishra, A. Sahai, and R. W. Brodersen, "Cooperative sensing among cognitive radios", in *Proc. IEEE ICC 2006*, vol. 4, pp. 1658-1663, June 2006.
- [8] R. R. Tenny and N. R. Sandell, "Detection with distributed sensors", *IEEE trans. on aerospace and electronic systems*, vol. 17, no. 4 July, 1981
- [9] A. Ghasemi and E. S. Sousa, "Collaborative spectrum sensing for opportunistic access in fading environments", *DySPAN 2005. IEEE*, pp. 131-136, Nov. 2005
- [10] G. Ganesan and Ye Li, "Agility improvement through cooperative diversity in cognitive radio", *Global Telecommu. Conf. GLOBECOM IEEE vol.5* pp. 2504-2509, Dec. 2005
- [11] J. Unnikrishnan and V.V. Veeravalli, "Cooperative sensing for primary detection in cognitive radio", in *signal processing, IEEE*

- journal*, vol. 2, pp. 18-27, Feb. 2008
- [12] E. Darkopoulos and C. C. Lee, "Optimum Multiuser Fusion of Correlated Local Decisions", *IEEE trans. aerospace and electronic systems*, vol. 27, no. 4, July 1991
 - [13] A. Chasemi and E. S. Sousa, "Asymptotic performance of collaborative spectrum under correlated log-normal shadowing", *IEEE commun. letters*, vol. 11, no. 1, Jan. 2007
 - [14] J. Unnikrishnan and V.V. Veeravalli, "Decentralized detection with correlated observations", in *Proc. signals, systems and computers*, pp. 381-385, Nov. 2007
 - [15] 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.
 - [16] 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.
 - [17] G. Ganesan and Y. Li, "Cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks," *IEEE DySPAN 2005*, pp. 137-143, Nov. 2005.
 - [18] 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.
 - [19] E. Peh and Y. Liang "Optimization for Cooperative Sensing in Cognitive Radio Networks", *WCNC 2007*, pp. 27-32, March 2007.
 - [20] 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.
 - [21] P. K. Varshney, *Distributed Detection and Data Fusion*, Springer-Verlag, 1997.
 - [22] J. Ma and Y. Li, "A probability-based spectrum sensing scheme for cognitive radio," *ICC 2008*, pp. 3416-3420, May 2008.
 - [23] V. K. Rohatgi, *An Introudction to Probability Theory and Mathematical Statistics*, WILEY, 1976.
 - [24] M. Abramowitz and I. A. Stegun, *Handbook of Mathematical Functions with Formulas, Graphs, and Mathematical Table*, DOVER, 1964.