

## m-bit 결합을 사용하는 협력 스펙트럼 센싱 기술의 성능 분석

\*장철희 \*\*이재홍

서울대학교 전기컴퓨터공학부 뉴미디어통신공동연

\*jangch@snu.ac.kr

## Performance Analysis for Cooperative Spectrum Sensing with m-bits Combining

\*Chulhee Jang \*\*Jae Hong Lee

Department of Electrical Engineering and INMC, Seoul National University

## 요약

최근 비효율적인 주파수 사용을 극복하기 위한 인지 접속 시스템 및 인지 접속 시스템 구현을 위한 스펙트럼 센싱 기술연구가 활발하게 진행되고 있다. 본 논문에서는 다수의 이차 사용자가 협력하여 우선 사용자를 감지하는 협력 스펙트럼 센싱 기술에서 m-bit 결합을 사용하는 시스템의 성능을 닫힌 형태로 분석한다. 또한 컴퓨터 모의실험을 통하여 시스템 성능 분석의 유효성을 확인하도록 하며, bit 수에 따른 성능 변화를 확인한다.

## 1. Introduction

무선통신 기술의 발전과 대용량 멀티미디어 서비스의 증가 등으로 무선 자원의 사용 요구가 증대함에 따라 주파수 자원의 부족 문제가 대두되고 있다. 하지만 무선 자원은 한정되어 있으며, 현재 할당된 주파수 대역의 이용 효율은 굉장히 낮은 수준이다[1]. 이러한 주파수 사용의 비효율을 극복하기 위하여 인지 접속 시스템(cognitive radio system)이 제안되었다[2]. 인지 접속 시스템에서는 해당 주파수 대역에 승인받은 우선 사용자(primary user)가 존재하지 않을 때, 승인받지 않은 이차 사용자(secondary user)가 해당 주파수를 사용함으로써 주파수 사용의 비효율을 줄일 수 있다. 인지 접속 시스템의 구현을 위해서는 우선 사용자가 해당 주파수 대역을 사용하고 있는지 여부를 계속 감지하여야 하는데, 이를 스펙트럼 센싱(spectrum sensing) 기술이라 한다[3].

한편, 협력 다이버시티(cooperative diversity) 기술의 발전과 함께[4], 협력 스펙트럼 센싱(cooperative spectrum sensing) 기술이 제안되었다[5]. 협력 스펙트럼 센싱 기술에서는 다수의 이차 사용자가 각자 우선 사용자의 존재 여부를 판단하고, 결합 센터(fusion center)에서 각 이차 사용자에서의 판단 결과를 결합하여 우선 사용자의 존재에 대한 최종적인 판단을 한다. 이 과정에서 각 이차 사용자가 감지한 전체 신호에 대한 자체 판단의 결과를 1 bit를 이용하여 결합센터로 전송하는 soft fusion, 각 이차 사용자가 감지한 전체 신호를 결합 센터로 전송하는 soft fusion 및 각 이차 사용자가 감지한 결과를 다수의 bit를 이용하여 결합센터로 전송하는 방법 등이 사용된다.

기존의 연구를 통하여 다수의 bit를 사용할수록 더 나은 성능을 보임이 확인되었고[6], soft fusion 시스템과 1bit를 사용하는 hard

fusion 시스템의 성능은 분석되어 있으나, 다중 bit를 사용하는 시스템의 성능은 닫힌 형태(closed form)로 분석되지 않은 상태이다. 본 논문에서는 다중 bit를 사용하는 시스템의 성능을 분석하도록 한다.

본 논문은 다음과 같이 구성되어 있다. 먼저 본 논문에서 사용하는 2bit를 사용하는 hard fusion 협력 스펙트럼 센싱의 시스템 모델을 제시한다. 또한, 이러한 시스템의 성능을 닫힌 형태로 분석한다. 그리고 컴퓨터 모의실험을 통하여 시스템 성능 분석의 유효성 및 bit 수에 따른 성능 변화를 확인한다.

## 2. System Model

본 논문에서는  $K$  개의 이차 사용자( $S_k, k = 1, \dots, K$ )가 있는 인지 접속 네트워크(cognitive radio network)를 고려하도록 한다. 또한  $\alpha$ 의 확률로 우선 사용자가 존재하며, 각 이차 사용자들은 우선 사용자의 존재 여부를 개별적으로 판단하여 결합 센터로 전송하게 된다. 이 때 우선 사용자의 존재 여부는 다음의 두 가지 가정 하에 결정된다.

 $H_0$  : 우선 사용자 부재 $H_1$  : 우선 사용자 존재이차 사용자  $S_k$ 에서 감지하게 되는 신호는

$$y_k = \begin{cases} w_k, & H_0 \\ h_{pk}x + w_k, & H_1 \end{cases} \quad (1)$$

와 같이 주어진다. 이 때,  $w_k$ 는 평균 0, 분산  $\sigma_w^2$ 인 AWGN이고,  $h_{pk}$ 는 우선 사용자와 이차 사용자간의 채널계수이며,  $x$ 는 우선 사용자에서 전송하는 신호이다.  $h_{pk}$ 는 평균이 0이고 분산이  $\sigma_h^2$ 인 복소 가우스

확률분포(complex Gaussian random variable)를 따른다고 가정한다. 각 이차 사용자는 에너지 검출기(energy detector)[7]를 사용한다고 가정한다. 에너지 검출기에서는

$$D_k = |y_k|^2 \quad (2)$$

를 검출한다.  $D_k$ 에 따라 감지 신호의 에너지 레벨  $z_k \in \{0, 1, \dots, 2^m - 1\}$ 를 다음에 따라 결정한다.

$$z_k = t, \lambda_t \leq D_k < \lambda_{t+1} \quad (3)$$

이 때,  $\lambda_0 = 0$  이며,  $\lambda_{2^m} = \infty$  이다.  $z_k$  는  $m$ -bit를 사용하여 결합센터로 전송되며, 결합센터에서는

$$Z = \sum_{k=1}^K z_k \quad (4)$$

와 같이 이차 사용자에서의 인지 결과를 결합한다.  $Z < \lambda_f$  일 때, 결합 센터에서는 우선 사용자가 없다고 결정하며,  $Z \geq \lambda_c$  일 때, 우선 사용자가 있다고 결정한다.

### 3. Performance Analysis

우선 사용자가 없다고 가정한다( $H_0$ ). 그러면  $D_k$ 와  $D_k$ 의 PDF는

$$D_k = |w_k|^2 \quad (5)$$

$$f_{D_k}(w|H_0) = \frac{1}{\sigma_w^2} \exp\left(-\frac{w}{\sigma_w^2}\right) \quad (6)$$

와 같이 주어진다. 또한  $z_k$ 의 PMF는

$$\begin{aligned} \Pr[z_k = t|H_0] &= \int_{\lambda_t}^{\lambda_{t+1}} f_{D_k}(w|H_0) dw \\ &= \exp\left(-\frac{\lambda_t}{\sigma_w^2}\right) - \exp\left(-\frac{\lambda_{t+1}}{\sigma_w^2}\right) \end{aligned} \quad (7)$$

과 같이 주어진다.  $z_k, k = 1, \dots, K$ 는 독립동일분포(independent and identically distributed, i.i.d)이기 때문에  $Z$ 의 생성함수(generating function)는

$$\begin{aligned} G_{Z|H_0}(z) &= \prod_{k=1}^K G_{z_k|H_0}(z) \\ &= \left[ \sum_{t=0}^{2^m-1} \left\{ \exp\left(-\frac{\lambda_t}{\sigma_w^2}\right) - \exp\left(-\frac{\lambda_{t+1}}{\sigma_w^2}\right) \right\} z^t \right]^K \end{aligned} \quad (8)$$

와 같이 주어진다.

*Theorem 1.*  $X_i$ 는  $\frac{d^n}{dz^n} X_0 = X_n$  를 만족하는  $z$ 의 함수,  $N_0$ 는

음이아닌 정수의 집합,  $A_{K,n} = \left\{ (a_0, \dots, a_n) \mid \sum_{j=0}^n a_j = K, \sum_{j=0}^n j a_j = n, a_j \in N_0 \right\}$  일 때,  $X_0^K$ 의  $n$ 계 도함수는

$$\begin{aligned} \frac{d^n}{dz^n} X_0^K &= \sum_{(a_0, \dots, a_n) \in A_{K,n}} \prod_{j=0}^n \left[ \binom{K - \sum_{p=0}^{j-1} a_p}{a_j} \right. \\ &\quad \left. \times \prod_{p=0}^{a_j-1} \left( n - \sum_{q=0}^{j-1} q a_q - p j \right) \right] \cdot X_j^{a_j} \end{aligned} \quad (9)$$

와 같이 주어진다.

*Proof*  $K=1$  일 때, 식 (9)의 양변은  $X_n$ 으로 동일하다.

식 (9)가  $i \leq k$  에서 성립한다고 가정하면,  $X_0^{k+1}$ 의  $n$ 계 도함수는

$$\frac{d^n}{dz^n} X_0^{k+1} = \sum_{i=0}^n \binom{n}{i} \frac{d^i X_0^k}{dz^i} X_{n-i} \quad (10)$$

와 같이 주어진다. 이 식의 전개식에서

$$a_j = \begin{cases} a_j, & 0 \leq j \leq i \\ 0, & i < j \leq n \end{cases} \quad (11)$$

$$b_j = \begin{cases} a_j + 1, & j = n - i \\ a_j, & \text{otherwise} \end{cases} \quad (12)$$

로 치환하면  $i = k+1$ 에서도 식 (9)가 성립함을 확인할 수 있다. ■

$$X_j = \sum_{i=j}^{2^m-1} \frac{i!}{(i-j)!} \left\{ \exp\left(-\frac{\lambda_i}{\sigma_w^2}\right) - \exp\left(-\frac{\lambda_{i+1}}{\sigma_w^2}\right) \right\} z^{i-j} \quad \text{라 하}$$

면,  $G_{Z|H_0}(z) = X_0^K$  이므로

$$\begin{aligned} \Pr[Z = n|H_0] &= \frac{1}{n!} \frac{d^n}{dz^n} X_0^K \Big|_{z=0} \\ &= \sum_{(a_0, \dots, a_n) \in A_{K,n}} \prod_{j=0}^n \left[ \binom{K - \sum_{p=0}^{j-1} a_p}{a_j} \right. \\ &\quad \left. \times \prod_{p=0}^{a_j-1} \left( n - \sum_{q=0}^{j-1} q a_q - p j \right) \right] \\ &\quad \times (j!)^{a_j} \left\{ \exp\left(-\frac{\lambda_i}{\sigma_w^2}\right) - \exp\left(-\frac{\lambda_{i+1}}{\sigma_w^2}\right) \right\} \end{aligned} \quad (13)$$

와 같이 주어진다. 같은 방법으로  $\Pr[Z = n|H_1]$ 를 얻을 수 있다. 그러면 missed detection probability 와 false alarm probability 는

$$P_m = \Pr[\text{detection} = H_0|H_1] = \Pr[Z < \lambda_f|H_1] \quad (14)$$

$$= \sum_{n=0}^{\lambda_f-1} \Pr[Z = n|H_1]$$

$$P_f = \Pr[\text{detection} = H_1|H_0] = \Pr[Z < \lambda_f|H_0] \quad (15)$$

$$= 1 - \sum_{n=0}^{\lambda_f-1} \Pr[Z = n|H_0]$$

와 같이 주어진다. 또한 전체 에러 확률은

$$P_e = \alpha P_m + (1 - \alpha) P_f \quad (16)$$

을 통하여 얻을 수 있다.

### 3. Numerical Results

본 장에서는 시스템 성능 분석의 유효성을 확인한다.

그림 1에  $m = 1, 2, 3, 4$  및 soft combining에 대한 컴퓨터 모의 실험 결과와 분석 결과의 그래프를 보인다. 모의실험 결과와 분석 결과가 완벽히 일치함을 확인할 수 있다. 또한  $m$  이 증가함에 따라 향상된 성능을 보이며,  $m = 3$  이상인 경우 soft decision에 근접하는 성능을 보임을 확인할 수 있다.

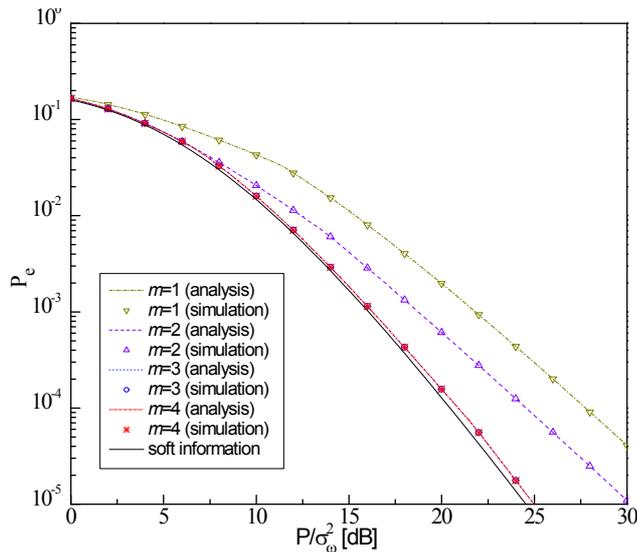


그림 1. 제안된 시스템의 에러 확률

### 4. 결론

본 논문에서는  $m$ -bit 결합을 사용하는 협력 스펙트럼 센싱 기술의 성능을 분석하였다. 또한 컴퓨터 모의실험을 통하여 성능 분석의 유효성을 입증하였으며, 다중 bit 결합을 사용하는 협력 스펙트럼 센싱을 통하여 1 bit를 사용하는 협력 스펙트럼 센싱보다 향상된 성능을 얻을 수 있음을 확인하였다.

### Acknowledgement

이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2011-0001274).

### 참고문헌

- [1] M. McHenry, *NSF spectrum occupancy measurements project summary*, Shared Spectrum Company Rep., Aug. 2005.
- [2] J. Mitola and G. Q. Maguire, Jr., "Cognitive radio: Making software radios more personal," *IEEE Personal Commun.*, vol. 6, no. 4, pp. 13-18, Aug. 1999.
- [3] A. Ghasemi and E. S. Sousa, "Spectrum sensing in cognitive radio networks: Requirements, challenges and design tradeoffs," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 46, no. 4, pp. 32-39, Apr. 2008.
- [4] J. N. Laneman and D. N. C. Tse, "Cooperative diversity in wireless networks: efficient protocols and outage behaviour," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 50, no. 12, pp. 3062-3080, Dec. 2004.
- [5] G. Gamesan and Y. Li, "Cooperative spectrum sensing in cognitive radio, Part I: Two user networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 6, no. 6, pp. 2204-2213, June 2007.
- [6] J. Ma, G. Zhao, and Y. Li, "Soft combination and detection for cooperative spectrum sensing in cognitive radio networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 7, no. 11, pp. 4502-4507, Nov. 2008.
- [7] H. V. Poor, *An Introduction to Signal Detection and Estimation*, New York: Springer-Verlag, 1994.