

# 후 순위 시스템의 성능 향상을 위한 언더레이 기반의 인지 무선 시스템의 사용자 선택 기법

최로미\*, 변윤식<sup>o</sup>

## User Selection Scheme for the Performance Improvement of the Secondary System in Cognitive Radio Systems using Underlay Mode

Romi Choe\*, Youn-Shik Byun<sup>o</sup>

### 요 약

최근 고속 데이터 서비스의 보급으로 데이터 사용량이 급증함에 따라 이를 수용하기 위한 주파수 자원의 효율적 사용 방법에 대한 연구가 주목받고 있다. 따라서 주파수 효율성을 향상시키기 위해 주파수 사용에 대한 우선권을 가진 사용자와 후순위에 있는 사용자가 해당 주파수 대역을 공유하는 기술인 인지 무선 기술(Cognitive Radio, CR)이 제안되었다. 본 논문에서는 CR 시스템에서 직교하는 채널 벡터를 이용하여 선순위 시스템에게 미치는 간섭을 줄이면서 후순위 시스템의 성능 향상을 동시에 고려한 사용자 선택 기법을 제안한다. 모의실험 결과 제안 기법을 적용했을 때 전체 시스템의 합 용량이 기존 기법보다 약 1.62bps/Hz의 이득을 가지는 것을 확인하였다.

**Key Words** : Cognitive radio, User selection, Multi-user diversity, Orthogonalization, Spectrum sharing, Underlay mode

### ABSTRACT

Recently, data traffic is significantly increased by high rate data service. As a result, radio spectrum is considered one of the most scarce and valuable resources for wireless communications. For the solution of this problem, cognitive radio(CR) has been proposed as an efficient means to opportunistic spectrum sharing between primary (licensed) users and cognitive radio users. In this paper, user selection scheme in CR networks is proposed for additional consideration of secondary system. The proposed user selection scheme mitigates interference to primary user by using orthogonal channel vectors while improves performance of secondary system. Simulation results show that the proposed scheme achieves 1.62bps/Hz higher average throughput of whole system than one of the existing scheme.

### I. 서 론

최근 데이터 기반의 통신 서비스의 보급으로 인해 무선 데이터 사용량이 급증하고 있으며 이에 따라 주파수 자원의 중요성이 부각되고 있다. 하지만 주파수 자원은 유한하기 때문에 늘어난 데이터 서

비스 수요를 수용하기에 부족한 실정이며 따라서 주파수 자원의 효율적인 사용 방법이 주목받고 있다. 이러한 문제의 해결 방안으로 주파수 자원의 사용을 극대화 하는 인지 무선 기술(Cognitive Radio, CR)이 제안되었다<sup>[1]</sup>. CR은 주파수 대역을 고정적으로 할당 받아 데이터를 전송하던 기존 방

\* 주저자 : 인천대학교 전자공학과 통신신호처리 연구실, romichoe@incheon.ac.kr, 학생회원

<sup>o</sup> 교신저자 : 인천대학교 전자공학과 통신신호처리 연구실, byun@incheon.ac.kr, 종신회원

논문번호 : KICS2012-10-499, 접수일자 : 2012년 10월 18일, 최종논문접수일자 : 2013년 1월 25일

식에서 벗어나, 주파수 대역의 사용 현황을 스스로 인지하여 빈 대역을 찾고 해당 채널에서 데이터 통신을 하는 기술이다. 따라서 CR에서는 선순위 사용자(Primary User, PU)의 주파수 대역 사용 현황을 인지하는 기술(sensing)과 PU가 받는 간섭을 고려하는 적절한 주파수 공유 기술(sharing)이 주요 이슈가 된다.

CR에서 선순위 시스템과 후순위 시스템이 주파수 대역을 공유하는 방식으로는 크게 overlay 모드와 underlay 모드 두 가지가 있다. 먼저 overlay 모드는 PU가 주파수 대역을 사용하지 않을 때만 후순위 사용자(Secondary User, SU)의 접속을 허용하는 모드로 주파수의 효율성 면에서는 불리하다. 반면 underlay 모드는 PU가 받는 간섭의 임계값을 설정하여 PU의 성능을 일정수준 이상 저해하지 않는 선에서 SU와의 주파수 공유를 허용하므로 간섭 임계값에 따라 SU의 접속 허용 여부가 결정된다. 즉 CR은 특정 주파수 대역에 대한 사용 권한이 없는 SU에게 해당 대역을 이용한 통신을 허용하는 기술이므로 해당 대역의 사용에 대한 우선권을 가진 PU의 성능 보호가 중요하게 고려되어야 한다<sup>2,3)</sup>.

이를 해결하기 위한 기존 기법으로 전력제어, 빔형성 기법(beamforming), 기존 두 모드의 혼합 형태 또는 스케줄링을 통한 간섭 관리 등이 고려되었다<sup>4-8)</sup>. 하지만 기존의 기법들은 주파수 공유로부터 선순위 시스템을 보호해야하는 CR기술의 요구사항은 만족하나 상대적으로 제한된 조건에서 통신을 해야 하는 후순위 시스템에 대한 고려는 이루어지지 않았다. 본 논문에서는 직교하는 채널 벡터를 이용하여 선순위 시스템이 받는 간섭을 최소화함과 동시에 후순위 시스템의 채널 상태를 추가적으로 고려하여 선순위 시스템 위주의 기존 주파수 공유 기법을 보완하고자 한다. 우선순위가 다른 두 시스템을 동시에 고려하기 위해 본 논문에서는 다중 사용자 다이버시티(multi-user diversity)를 이용한다. 다중 사용자 다이버시티를 이용한 기존의 기법들은 대부분 하나의 시스템만을 고려하며 이에 따라 다중 사용자 다이버시티 역시 단일 파라미터를 통해 얻게 된다<sup>9,10)</sup>. 제안 기법에서는 사용자 선택 과정을 두 단계로 나누어 각각의 단계에서 선순위 시스템과 후순위 시스템을 고려하고 이에 따른 선택 파라미터 또한 각각 적용한다. 그 과정에서 2차 사용자 선택 상수를 도입하여 후보 SU 집합을 재구성하는 단계를 거친다. 또한 이와 같이 두 단계로 나뉜 사용자 선택 절차를 각각 후보 SU 단말과 선

순위 시스템의 기지국에서 나눠서 수행한다면 기존 기법에서 선순위 시스템의 기지국이 모든 후보 SU의 수만큼의 비교과정을 거쳤던 것을 줄일 수 있다. 본 논문에서는 underlay 모드의 주파수 공유 기법을 바탕으로 한다. 기존에는 underlay 모드의 간섭 임계값을 주파수 사용의 효율성을 위해 PU가 어쩔 수 없이 감당해야하는 손해로 인식하였다<sup>11)</sup>. 하지만 제안 기법에서는 간섭 임계값을 주파수 사용의 여지가 늘어난 것으로 해석하여 이를 이용해 후순위 사용자의 성능을 향상시키고자 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 본 논문에 적용한 시스템 모델에 대해 설명하고 III장에서는 기회적 공간 직교화를 이용한 기존 기법에 대해 설명한다. IV장에서는 제안하는 후순위 시스템의 성능 향상을 위한 사용자 선택 기법을 설명하고 V장에서는 모의실험을 통해 제안 기법과 기존 기법의 성능을 비교 분석한다. 마지막으로 VI장에서 본 논문의 결론을 맺는다.

## II. 시스템 모델

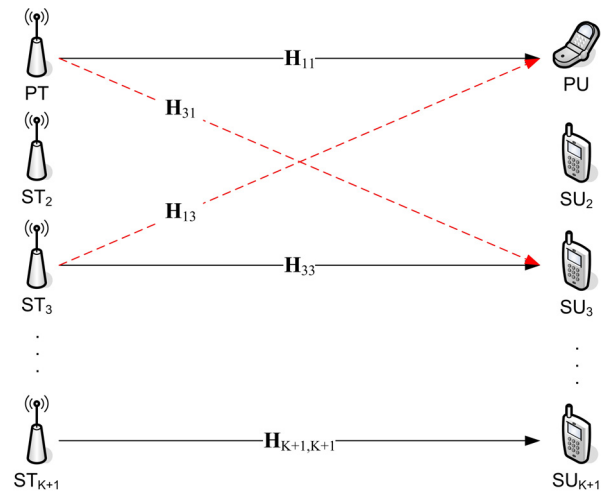


그림 1. 다중 사용자 cognitive radio 시스템 모델  
Fig. 1. Multi-user cognitive radio system model

본 논문에서는 그림 1과 같이 하나의 선순위 시스템과 다수의 후순위 시스템이 공존하는 underlay 모드 기반의 시스템을 고려한다. PU의 번호는 1이고 K명의 SU는 2부터 K+1까지의 번호를 가진다. 그림 1에서 각 송신단의 안테나 수는  $N_t$ 개이며 수신단에서는 각각  $N_r$ 개의 안테나를 가지고 있다. 실선과 점선은 송신단 n과 수신단 m사이의 Rayleigh fading 채널을 나타내며  $H_{nm}$ 으로 나타낸다. 이 중

실선은 각각의 송신단과 이에 대응하는 수신단 사이의 채널이며 점선은 간섭에 해당한다. 각 채널은 서로 독립이며(independent and identically distributed, i.i.d.) 이는 TDD 시스템을 가정할 경우 상향링크를 통해 측정이 가능하다. 선순위 시스템은 대역 공유를 허용할 후순위 시스템을 선택하기 위해 시스템 내의 후보 SU로부터 상향링크를 통해 채널 정보를 보고받을 수 있으나 후순위 시스템 간에는 정보 공유가 이루어지지 않는다고 가정한다. 다수의 후순위 시스템 중 선택된  $N$ 명의 SU만이 선순위 시스템의 주파수 대역에 접속하여 서비스를 받을 수 있으며 같은 대역을 사용하는 사용자 간에는 간섭이 발생한다. 즉 PU는 모든 선순위 송신단(Primary Transmitter, PT)으로부터 간섭을 받는 것이 아니라 선택된  $N$ 개의 후순위 송신단(Secondary Transmitter, ST)으로부터만 간섭을 받으며 SU 역시 선택되지 않은 ST로부터는 간섭을 받지 않는다. PT는 PU에게만 서비스를 제공할 수 있으며 자신의 대역을 공유하는 SU일지라도 직접 데이터를 송신하지 않는다<sup>[12,13]</sup>. 또한 각 송신단은 하나의 대응 수신단을 가지며 이는 미리 설정되어 있으며 임의로 변경되지 않는다고 가정한다. 따라서 시스템 내의 2부터  $K+1$ 까지의 모든 SU가 선택된 경우 PU와 SU의 수신신호는 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{y}_1 = \mathbf{H}_{11}\mathbf{x}_1 + \sum_{i=2}^{K+1} \mathbf{H}_{1i}\mathbf{x}_i + \mathbf{z}_1 \quad (1)$$

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{H}_{ii}\mathbf{x}_i + \mathbf{H}_{i1}\mathbf{x}_1 + \sum_{j=1, j \neq i}^{K+1} \mathbf{H}_{ij}\mathbf{x}_j + \mathbf{z}_i \quad (2)$$

여기서  $\mathbf{y}_1$ 은 PU의 수신신호이고  $\mathbf{y}_i$ 는 SU <sub>$i$</sub> 의 수신신호이며  $\mathbf{x}_1$ 과  $\mathbf{x}_i$ 는 각각 ST가 PU에게 송신한 데이터와 ST가 SU <sub>$i$</sub> 에게 송신한 데이터이다.  $\mathbf{z}_1$ 과  $\mathbf{z}_i$ 는 각각 PU와 SU <sub>$i$</sub> 가 받는 평균이 0이며 전력이  $N_0$ 인 백색 가우시안 잡음(Additive White Gaussian Noise, AWGN) 벡터이다. 식 (1)에서 첫 번째 항은 원하는 신호에 해당하며 두 번째 항은 간섭 신호에 해당하는 부분으로 선순위 시스템과 주파수 대역을 공유하는 모든 ST로부터 받는 신호를 의미한다. 식 (2)에서 간섭 신호에 해당하는 부분은 두 번째와 세 번째 항으로, 두 번째 항은 PT로부터 받는 간섭이며 세 번째 항은 자신과 함께 선순위 시스템의 대역을 공유하는 모든 ST로부터의 간섭의 합에 해당한다.

### III. 직교성 기반의 기존 기법

최근 채널 벡터간의 직교성을 이용하여 간섭을 완화시키는 기법이 제안되었다<sup>[14-16]</sup>. 참고문헌 [15]에서는 각 수신단과 송신단 사이의 채널 간 독립성(channel randomness)과 다중 사용자 다이버시티를 이용하여 주파수를 공유하는 기회적 공간 직교화(Opportunistic Spatial Orthogonalization, OSO) 기법을 제안하였다. OSO 기반 기존 기법에서는 PU가 주파수 대역을 공유하는 SU로부터 받는 간섭 전력을 채널 벡터의 내적으로 표현한다. 이때 각 사용자와 해당 기지국간의 채널들은 서로 독립적인 페이딩을 겪으므로 후보 SU가 많을수록 PU의 채널과 직교에 근사한 채널을 가진 SU가 존재할 확률이 높아진다. 따라서 이들 중 PU의 채널 벡터와의 내적이 0에 가까운 사용자를 선순위 시스템의 주파수 대역에 접속하도록 하여 SU와의 자원 공유로 인해 PU가 받게 되는 간섭 전력을 최소로 만들 수 있다. 선순위 시스템과 후순위 시스템 모두  $N_t = N_r = 2$ 인 2x2 MIMO(multiple-input multiple-output) 시스템을 고려한다. 먼저 각 송신단에서는 수신단과의 채널행렬에 SVD(Singular Value Decomposition)를 적용하여 다음과 같이 빔 형성 벡터  $\mathbf{f}$ 를 구한다.

$$\mathbf{H}_{mn} = \mathbf{U}_{mn}\mathbf{A}_{mn}\mathbf{V}_{mn}^H = \sum_{i=1}^2 \lambda_{mn}(i)\mathbf{u}_{mn}(i)\mathbf{v}_{mn}(i)^H \quad (3)$$

$$\mathbf{f}_1 = \mathbf{v}_{11}(1), \quad \mathbf{f}_i = \mathbf{v}_{1i}(2) \quad (4)$$

여기서  $\mathbf{U}_{mn}, \mathbf{V}_{mn} \in \mathbb{C}^{2 \times 2}$ 인 유니터리 행렬이고  $\mathbf{v}_{mn}(i)$ 는 행렬  $\mathbf{V}_{mn}$ 의  $i$ 번째 열벡터를 의미하며  $\mathbf{f}_1$ 과  $\mathbf{f}_i$ 는 각각 PT와 ST <sub>$i$</sub> 의 송신단에서 송신 신호에 곱해지는 빔 형성 벡터이다. 따라서  $N=1$ 일 경우 PU와 SU의 수신 신호는 다음과 같다.

$$\mathbf{y}_1 = \mathbf{H}_{11}\mathbf{f}_1\mathbf{x}_1 + \mathbf{H}_{1i}\mathbf{f}_i\mathbf{x}_i + \mathbf{z}_1 \quad (5)$$

$$\mathbf{y}_i = \mathbf{H}_{ii}\mathbf{f}_i\mathbf{x}_i + \mathbf{H}_{i1}\mathbf{f}_1\mathbf{x}_1 + \mathbf{z}_i \quad (6)$$

이때  $\mathbf{H}_{mn}\mathbf{f}_{mn} \in \mathbb{C}^{2 \times 1}$ 이고  $\mathbf{x}_{mn}, \mathbf{y}_{mn}, \mathbf{z}_{mn} \in \mathbb{C}^{2 \times 1}$ 이다. 한편, PU가 SU <sub>$i$</sub> 로부터 받는 간섭 전력은 선순위 시스템과 후순위 시스템의 채널 벡터의 내적을 이용하여 나타낼 수 있으며 이때 PU의 신호 대 간섭 잡음비(Signal to Interference and Noise Ratio, SINR)도 이를 이용하여 나타내면 각각 다음과 같다.

$$I_i = \frac{|\mathbf{H}_{1i} \mathbf{f}_i \cdot \mathbf{H}_{11} \mathbf{f}_1|^2}{\|\mathbf{H}_{11} \mathbf{f}_1\|^2} \quad (7)$$

$$\begin{aligned} SINR_1(I_i) &= \frac{\|\mathbf{H}_{11} \mathbf{f}_1\|^2 P_1}{\frac{|\mathbf{H}_{1i} \mathbf{f}_i \mathbf{H}_{11} \mathbf{f}_1|^2}{\|\mathbf{H}_{11} \mathbf{f}_1\|^2} P_i + N_0} \\ &= \frac{\|\mathbf{H}_{11} \mathbf{f}_1\|^2 P_1}{I_i P_i + N_0} = \frac{\|\mathbf{H}_{11} \mathbf{f}_1\|^2 P_1}{N_0(1 + I_i P_i / N_0)} \end{aligned} \quad (8)$$

이때  $P_1$ 과  $P_i$ 는 각각 PT와  $ST_i$ 의 송신 전력을 나타낸다. 따라서 두 벡터  $\mathbf{H}_{11} \mathbf{f}_1$ 와  $\mathbf{H}_{1i} \mathbf{f}_i$ 가 서로 직교에 가까울수록 이들의 내적이 0에 근사하게 되어, 이 값을 가장 작게 만드는  $SU_i$ 를 선택한다면 PU가 받는 간섭을 최소화할 수 있다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$I_i = \frac{\min_{i=2, \dots, K+1} |\mathbf{H}_{1i} \mathbf{f}_i \cdot \mathbf{H}_{11} \mathbf{f}_1|^2}{\|\mathbf{H}_{11} \mathbf{f}_1\|^2} \quad (9)$$

식 (9)를 만족하는  $SU_i$ 를 찾으면 간섭 임계값  $\gamma_{th(dB)}$ 와의 비교를 거친다.  $\gamma_{th(dB)}$ 는 underlay 모드에서 선순위 시스템이 미리 정해놓은 허용 가능한 간섭의 한계값으로, PU가 그 이상의 간섭을 받지 않도록 하여 서비스 우선권이 있는 PU의 성능을 보장하기 위한 조건이다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\gamma_{th(dB)} \geq \gamma_i(dB) = SINR_1(dB) - SINR_1(I_i)_{dB} = 10 \log_{10}(1 + I_i P_i / N_0) \quad (10)$$

따라서 PU의 채널 벡터와 가장 직교에 근사하면 식 (10)을 만족하는  $SU$ 가 최종적으로 선순위 시스템의 주파수 대역에 접속할 수 있게 된다.

#### IV. 제안 기법

제안 기법은 선순위 시스템에 접속을 허용할  $SU$ 를 선택하는 과정을 두 단계로 나눈다. 즉 III장에서 설명한 기존의 OSO 기법에서는 단지 PU가 받는 간섭 전력만을 고려하였던 것과 달리 제안 기법은 사용자를 선택하는 기준의 측면에 따라 사용자 선택 절차를 1차 사용자 선택과 2차 사용자 선택으로 나누어 공존하는 두 시스템의 성능 모두를 고려한

다. 먼저 1차 사용자 선택에서는 PU가 받는 간섭을 고려하여 후보  $SU$  중에서 조건에 해당하는 후보 집합을 만들고, 2차 사용자 선택에서는 1차 선택에서 가려진 후보 집합을 대상으로 ST와 SU간의 채널 상태가 좋은 최종  $N$ 명의 사용자를 선택한다.

##### 4.1. 1차 사용자 선택

1차 사용자 선택에서는 초기의 후보  $SU$  집합  $S$  내의 사용자 중 선순위 시스템의 채널 벡터와의 직교성을 비교하여 새로운 후보  $SU$  집합을 만든다. 즉 이 단계는 PU가 받는 간섭을 완화시키기 위한 과정이다. 두 채널 벡터의 내적의 절대값의 제곱을  $I_i'$ 이라 하고 이 값이 사전에 설정된 2차 사용자 선택 상수  $\alpha$ 보다 작은  $SU$ 들을 2차 사용자 선택을 위한 새로운 후보 집합  $P$ 로 정의한다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$I_i' = |\mathbf{G}_{1i} \cdot \mathbf{G}_{11}|^2 \quad (11)$$

$$P = \{i | I_i' \leq \alpha\} \quad (12)$$

여기서  $\mathbf{G}_{mn} = \mathbf{H}_{mn} \mathbf{f}_m$ 이며 2차 사용자 선택 상수  $\alpha$ 에 따라 후보 집합  $P$ 의 크기가 달라진다. 만약 0에 가까운  $\alpha$ 를 선택한다면 PU와 PT 사이의 채널 벡터와 직교에 매우 근사한 채널을 가진  $SU$ 들만을 가려내어 후보 집합  $P$ 를 만들게 되어 PU가 받는 간섭 완화에 유리하다. 반대로  $\alpha$ 의 값이 충분히 크다면 후보 그룹  $P$ 에 속하게 되는  $SU$ 의 수가 많아지게 되어 2차 사용자 선택에서 사용자를 고를 수 있는 폭이 넓어지고 다중 사용자 다이버시티 (multi-user diversity)를 통한 이득을 기대할 수 있게 된다.

##### 4.2. 2차 사용자 선택

2차 사용자 선택은  $SU$ 의 관점에서 이루어진다. 1차 사용자 선택을 통해 얻은 후보 집합  $P$ 에 속한 사용자들은 2차 선택 과정에서 ST와 SU 사이의 채널 상태에 따라 다시 정렬된다.

$$\max_{k \in P} \|\mathbf{H}_{kk} \mathbf{f}_k\|^2 \quad (13)$$

여기서  $\mathbf{f}_k = \mathbf{v}_{1k}$ (2)이다. 식 (13)에 의해 선택된  $SU_k$ 는 최종적으로 간섭 임계값과의 비교를 거친다. 따라서 식 (10)을 만족한  $SU_k$ 가 최종적으로 PU의 주파수 대역에 접속할 수 있으며 만약 식 (13)에서 선택된  $SU$ 가 식 (10)을 만족하지 못한다면 그  $SU$

는 사용자 집합  $P$ 에서 제거되고, 업데이트된 후보 SU 집합  $P$ 를 대상으로 다시 식 (13)과 (10)을 반복한다.

이상의 사용자 선택 과정을 정리하면 표 1과 같다. 표 1에서 1부터 7에 해당하는 1차 사용자 선택 과정을 선순위 시스템과 주파수 공유를 요청하는 각 후보 SU 단말에서 수행하도록 하고, 식 (11)을 만족하는 SU들만 자신과 해당 ST 사이의 채널 정보를 선순위 시스템의 기지국으로 보낸 후 2차 사용자 선택은 선순위 시스템의 기지국이 수행하도록 할 수 있다. 이를 통해 기존 기법에서는 선순위 시스템의 기지국이 전체 후보 SU의 수인  $|S|$ 만큼의

어 기지국에서 받게 되는 피드백 부하를 줄일 수 있게 된다.

### 4.3. 2차 사용자 선택 상수와 제안 기법

본 절에서는 2차 사용자 선택 상수  $\alpha$ 가 제안 기법의 성능에 미치는 영향에 대해 자세히 살펴본다. 제안 기법에서 PU가 받는 간섭은 2차 사용자 선택 상수  $\alpha$ 를 이용하여 표현할 수 있으며 이를 통해 2차 사용자 선택 상수  $\alpha$ 와 PU의 간섭 임계값 사이의 관계를 나타낼 수 있다. 식 (10)을 식 (9)와 식 (11)을 이용하여 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \gamma_{th(dB)} \geq \gamma_{i(dB)} &= 10\log_{10}(1 + I_{1i}P_i/N_0) \\ &= 10\log_{10}\left(1 + \frac{|\mathbf{H}_{1i}\mathbf{f}_i \cdot \mathbf{H}_{11}\mathbf{f}_1|^2 P_i}{\|\mathbf{H}_{11}\mathbf{f}_1\|^2 N_0}\right) \quad (14) \\ &= 10\log_{10}\left(1 + \frac{I_{1i}' P_i}{\|\mathbf{G}_{11}\|^2 N_0}\right) \end{aligned}$$

이를 다시  $I_{1i}'$ 에 대해 정리하면 다음의 식 (15)를 얻을 수 있다.

$$I_{1i}' \leq (10^{\gamma_{th(dB)}/10} - 1) \frac{N_0 \|\mathbf{G}_{11}\|^2}{P_i} \quad (15)$$

이때  $I_{1i}'$ 이 가질 수 있는 최대값은  $\alpha$ 이므로 식 (15)에서 등호가 성립되는 경우는  $I_{1i}' = \alpha$  일 때이다. 만약  $\alpha$ 가 식 (15)의 우변의 값보다 작다면 실제로는 사전에 설정한  $\gamma_{th(dB)}$ 보다 더 작은 임계값이 적용되는 셈이 되어  $\gamma_{th(dB)}$ 를 적용한 기존 기법보다 성능이 저하되는 구간이 발생한다. 따라서 2차 사용자 선택 상수  $\alpha$ 와  $\gamma_{th(dB)}$ 의 관계는 다음과 같다.

$$\alpha_b = (10^{\gamma_{th(dB)}/10} - 1) \frac{N_0 \|\mathbf{G}_{11}\|^2}{P_i} \quad (16)$$

$$\gamma_{th}'(dB) = 10\log_{10}\left(1 + \frac{\alpha}{\|\mathbf{G}_{11}\|^2 N_0} P_i\right) \quad (17)$$

여기서  $\alpha_b$ 는  $\gamma_{th(dB)}$ 가 주어졌을 때 제안 기법의 성능이 항상 기존 기법보다 우위에 있도록 하는 2차 사용자 선택 상수  $\alpha$ 의 최소값이며,  $\gamma_{th}'(dB)$ 는  $\alpha$ 가 주어졌을 때 실제 적용되는 간섭 임계값이다.

## V. 모의실험 결과

표 1. 제안하는 사용자 선택 기법  
Table 1. Proposed user selection scheme.

User selection scheme	
1:	1st user selection
2:	Define $S = \{2, 3, \dots, k+1\}$
3:	if $ \mathbf{G}_{1i} \cdot \mathbf{G}_{11} ^2 \leq \alpha, i \in S$
4:	$i \in P$
5:	else
6:	$i \notin S$ , update S
7:	end
8:	2nd user selection
9:	find $k = \max_{k \in P} \ \mathbf{H}_{kk}\mathbf{f}_k\ ^2$
10:	if $\gamma_{th(dB)} \geq \gamma_{k(dB)} = 10\log_{10}(1 + I_{1k}P_k/N_0)$
11:	$k \in K$ (SUK is selected. $K$ is the set of selected SUs.)
12:	$i \notin P$ , update P
13:	if $ K =N$ or $ P =0$
14:	break
15:	else
16:	Back to 9
17:	end
18:	else
19:	$i \notin P$ , update P
20:	Back to 9
21:	end

채널 정보를 받아 비교하였던 것과 달리 제안 기법에서는  $|P|$ 만큼의 후보 SU의 정보만을 비교하게 되

표 2. 모의실험 파라미터  
Table 2. Simulation parameters

Parameter	Value
The number of primary system	1
The number of transmit antenna $N_t$	2
The number of receive antenna $N_r$	2
Interference threshold $\gamma_{th(dB)}$	0.1dB / 0.5dB
2nd user selection coefficient $\alpha$	0.1 / 0.5
	0.1 / 0.3 / 0.7
Transmission and noise power ratio ( $P_1/N_0 = P_i/N_0$ )	0dB
Channel model	Rayleigh fading
Noise parameter	AWGN( $CN(0, N_0)$ )

본 절에서는 모의실험을 통하여 제안된 사용자 선택 기법과 OSO를 이용한 기존 기법의 합 용량을 비교한다. 본 절에서 제안 기법과의 비교대상이 되는 기존 기법은 III장에서 서술한 참고문헌 [15]의 기법을 의미한다. 모의실험에서 선순위 시스템과 후순위 시스템은 송신 안테나와 수신 안테나가 모두 2개인 2x2 MIMO 시스템을 적용하였으며 각 시스템의 송신 전력과 잡음 전력의 비는 0dB이다 ( $P_1/N_0 = P_i/N_0 = 0dB$ ). 모의실험에 사용된 파라미터를 정리하면 표 2와 같다.

5.1. N=1인 경우의 기존 기법과 제안 기법의 성능 비교

그림 2는 전체 SU 중에서 1명의 SU를 선택할 때(N=1) 기존 기법과 제안 기법의 성능을 비교한 그래프로 실선은 PU와 SU의 전체 합 용량을, 점선은 PU의 합 용량을 나타낸다. 간섭 임계값  $\gamma_{th(dB)}$ 는 0.1dB와 0.5dB이며 1차 사용자 선택 상수  $\alpha$ 는 0.1과 0.5의 경우에 대하여 성능을 비교하였다. 모의실험 결과 제안 기법과 기존 기법 모두 후보 SU의 수가 증가함에 따라 전체 합 용량 또한 증가하는 것을 보였다. 이는 후보 SU의 수가 많을수록 PU의 채널 벡터와 직교에 가까운 채널을 가진 SU가 있을 확률 또한 증가하기 때문이다. 제안 기법은 후보 SU 수가 많아짐에 따라 기존 기법보다 향상

된 성능을 보이는데 이는 기존 기법에서는 단지 PU가 받는 간섭을 최소로 하는 SU를 선택하는 반면, 제안기법에서는 2차 사용자 선택 과정을 통해 ST와 SU 사이의 채널 상태가 고려되기 때문이다. 즉 두 기법 모두 다중 사용자 다이버시티에 의해 더 많은 후보 SU 중에서 조건을 만족하는 SU 집단을 선택하지만 제안기법의 경우는 다중 사용자 다이버시티가 채널 직교성 뿐 아니라 채널 이득에까지 확대되어 적용된다. 따라서 전체 후보 SU의 집합의 크기가 증가할수록 2차 사용자 선택 조건을 만족하는 SU의 수가 증가하고, 증가된 2차 후보 SU 집합에서 채널이득이 가장 큰 사용자를 선택하게 되므로 제안기법의 전체 합 용량이 기존 기법보다 향상된다.

제안 기법의 경우 2차 사용자 선택 상수인  $\alpha$ 가 0.5인 경우  $\alpha$ 가 0.1인 경우보다 전체 합 용량이 향상됨을 나타내는데 이는  $\alpha$ 값이 크면 2차 사용자 선택 후보에 포함되는 SU의 수가 많아지고, 더 많은 후보 SU 중에서 채널 상태가 가장 좋은 SU를 고르기 때문이다. 반면  $\alpha=0.1$ 인 경우는 전체 SU 중에서 가장 직교에 가까운 SU를 선택하는 기존 기법과 가장 비슷한 PU의 성능을 나타내지만  $\alpha$ 가 커지면 PU의 성능은 감소하는데 이는 두 채널 벡터의 직교성이 크지 않더라도 2차 사용자 선택 후보 집합에 포함시키기 때문이다. 하지만 제안 기법

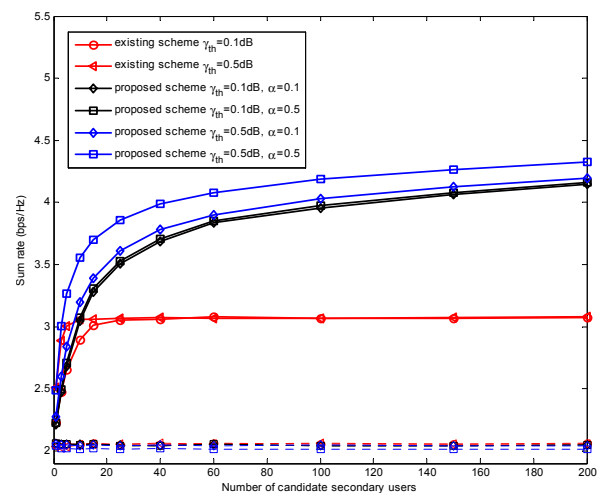


그림 2. N=1일 때 secondary user 수에 따른 제안 기법과 기존 기법의 합 용량  
Fig. 2. Average throughput of proposed scheme and existing scheme in terms of the number of candidate secondary users (N=1)

과 기존 기법 모두 최종적으로는 동일한 간섭 임계값 조건을 거쳐야하므로 PU가 받을 수 있는 간섭

전력의 최대 크기는  $\gamma_{th(dB)}$ 로 동일하다.

### 5.2. N=max인 경우의 기존 기법과 제안 기법의 성능 비교

그림 3은 전체 SU 중에서 간섭 임계값이 허용하는 최대한의 SU를 선택할 때의(N=max) 기존 기법과 제안 기법의 성능을 비교한 그래프이다. 즉 SU의 접속을 허용할 때마다 PU가 받는 누적된 간섭 전력을 계산하여 간섭 임계값을 넘지 않을 때까지 SU의 접속을 허용한다. 이를 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$\gamma_{th(dB)} \geq \sum_{k \in P} \gamma_{k(dB)} = 10 \log_{10}(1 + I_k P_k / N_0) \quad (18)$$

만약 식 (13)을 통해 선택된  $SU_k$ 가 식 (18)을 만족하지 못할 경우  $SU_k$ 는 후보 집합 P에서 제거되며 업데이트된 후보 집합 P에서 다시 식 (13)을 통해 SU를 선택하여 식 (18)과 비교하는 과정을 반복한다. 그림 2와 동일하게 실선과 점선은 각각 전체 시스템과 PU만의 합 용량을 나타내며 간섭 임계값  $\gamma_{th(dB)}$ 는 0.5dB이며 2차 사용자 선택 상수  $\alpha$ 는 0.1과 0.5의 두 가지 경우에 대하여 성능을 비교하였다. 모의실험 결과 다수의 SU와 대역을 공유할 경우에도 제안 기법과 기존 기법 모두 후보 SU의 수가 증가함에 따라 전체 합 용량 또한 증가하는

기존 기법보다 나은 성능을 보였다. 이는 간섭 임계값 내에서 SU를 선택할 때 다중 사용자 다이버시티에 의한 결과이며 그림 2에서와 동일하게 제안 기법은 채널 직교성 뿐 아니라 채널 이득으로까지 다중 사용자 다이버시티를 적용하기 때문이다<sup>9,17</sup>.

한편 제안 기법은 후보 SU의 수가 증가할수록 전체 합 용량의 증가 폭이 점차 줄어든다. N=max의 경우 최종 선택되는 SU의 수는 간섭 임계값을 몇 명의 SU로 채우느냐에 달려있는데 많은 후보 중에서 SU를 선택할수록 직교성과 채널이득이 우수한 SU들로 허용된 간섭 양을 채울 수 있다. 하지만 최종 선택된 SU의 집합인 P가 커질수록 같은 주파수 대역을 공유하는 사용자의 수가 늘어나기 때문에 사용자 간 간섭 역시 증가한다. 따라서 전체 합 용량의 증가 폭은 후보 SU의 수가 증가함에 따라 줄어들게 된다. PU의 합 용량의 경우 후보 SU의 수가 증가함에 따라 제안 기법과 기존 기법의 차이가 줄어드는 것을 알 수 있으며 이는  $\alpha$ 에 상관없이 같은 값으로 수렴한다. 이는 N=max의 경우에는 다수의 SU가 PU에게 미치는 간섭 전력 세기의 합이  $\gamma_{th(dB)}$ 를 넘지 않을 때까지 SU를 선택하므로 제안 기법과 기존 기법 모두 PU가 받는 간섭의 크기는 간섭 임계값인 0.5dB에 근사하기 때문이다. 따라서 제안 기법은 허용된 간섭 전력 안에서 PU와 SU의 성능을 모두 고려함을 알 수 있다.

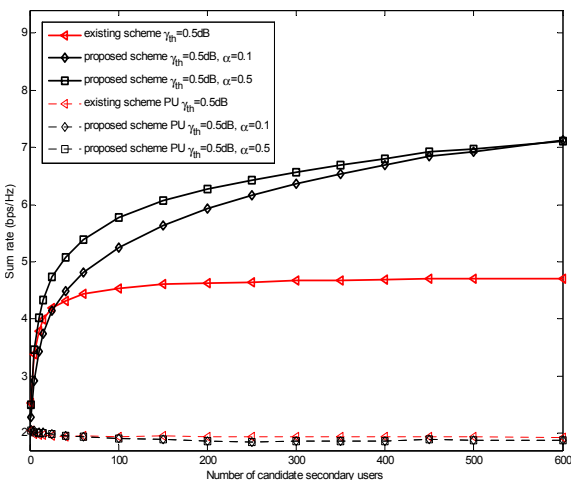


그림 3. N=max일 때 secondary user 수에 따른 제안 기법과 기존 기법의 합 용량  
Fig. 3. Average throughput of proposed scheme and existing scheme in terms of the number of candidate secondary users (N=max)

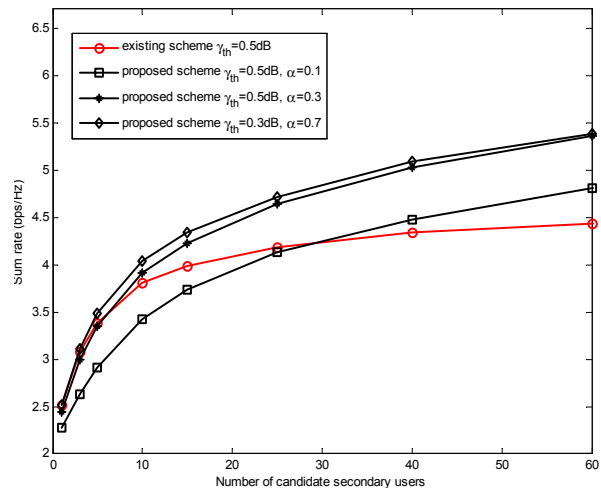


그림 4. N=max일 때 2차 사용자 선택 상수에 따른 제안 기법의 합 용량 비교  
Fig. 4. Comparison of the average throughput for proposed scheme with different second user selection coefficient (N=max)

것을 보였으며 SU의 수가 많아질수록 제안 기법이

### 5.3. 2차 사용자 선택 상수에 따른 제안 기법의 성능

그림 4는 2차 사용자 선택 상수  $\alpha$ 에 따른 제안 기법의 합 용량을 나타낸 그래프이다. 그림 2와 그림 3에서 살펴본 바와 같이 제안 기법은 모든 SU 수 구간에서 기존 기법보다 향상된 성능을 나타내지 않았으며 이는  $\alpha$ 에 따라 다르다. 그림 4에서 간섭 임계값  $\gamma_{th(dB)}$ 는 0.5B로 이 때 식 (16)에 의해 계산되는  $\alpha_b$ 는 0.42이다.  $\alpha = 0.1$ 일 때는 후보 SU의 수가 25명이 될 때 까지는  $\gamma_{th(dB)} = 0.5dB$ 를 적용한 기존 기법보다 낮은 합 용량을 나타낸다. 이는 식 (11)에 의하여 2차 사용자 후보 집합에 포함될 수 있는 SU가 가질 수 있는  $I_{i'}$ 의 최대값이 제한되어서 실제로는 식 (17)에 의해 0.12dB의 간섭 임계값이 적용되는 셈이 되기 때문이다.  $\alpha = 0.3$ 인 경우 역시 여전히  $\alpha$ 가  $\alpha_b$ 보다 작으므로 후보 SU의 수가 10명 미만인 구간에서 제안 기법이 기존 기법보다 근소하게 저하된 성능을 나타낸다.  $\alpha$ 가 0.7인 경우는 제안 기법의 합 용량이 모든 후보 SU의 수 구간에서 기존 기법보다 향상되는 것을 알 수 있다.

## VI. 결 론

본 논문에서는 CR 시스템에서 독립적인 페이딩을 겪는 채널 벡터들 중 직교하는 채널 벡터를 이용한 underlay 모드 기반의 사용자 선택 기법을 제안하였다. 제안 기법은 선순위 시스템이 받는 간섭만을 고려하는 기존 기법과 달리 사용자 선택 절차를 두 단계로 나누어 후순위 시스템의 채널 상태를 추가적으로 고려함으로써 기존 기법에서 상대적으로 소홀히 다뤄졌던 후순위 시스템의 성능을 향상시키고자 하였다. 특히 제안 기법은 기존의 underlay 모드에서 단지 주파수 사용의 효율성 향상을 위한 손실로만 여겨졌던 간섭 임계값을 후순위 시스템의 성능을 향상시킬 수 있는 기회로 활용하였다. 모의 실험결과 제안 기법 후보 SU의 수가 증가할수록 다중사용자 다이버시티에 의해 합 용량이 향상되는 것을 확인하였다. 또한 제안 기법은 후순위 시스템 성능 고려를 위해 추가된 2차 사용자 선택 상수  $\alpha$ 에 따라 성능의 변화를 보이며 모든 후보 SU 수 구간에서 기존 기법보다 향상된 성능을 얻을 수 있는  $\alpha$ 의 범위가 있음을 확인하였다. 특히 간섭 임계값 조건을 만족하는 하에서 다수의 SU를 선택하는  $N = \max$ 의 경우 PU의 성능은 동일하면서 전체 시

스템의 합 용량은 증가하는 것을 보였다. 또한 기존 기법에서는 선순위 시스템의 기지국이 모든 SU의 채널 상태를 수집하여 직교성을 계산하였던 것과 달리, 제안 기법의 1차 사용자 선택 과정을 선순위 시스템의 대역에 접속을 요청하는 각 SU 단말에서 수행하도록 하여  $\alpha$ 조건을 만족하는 사용자들만 자신의 채널 정보를 선순위 시스템으로 보내도록 한다면 선순위 시스템의 기지국이 받는 피드백 부하를 줄일 수 있을 것으로 기대된다.

## References

- [1] J. Mitola, "Cognitive radio for flexible mobile multimedia communications," in *Proc. of IEEE workshop on Mobile Multimedia Commun.(MoMuC)*, San Diego, USA, Nov. 1999.
- [2] E. Hossain, D. Niyato, and Z. Han, *Dynamic Spectrum Access and Management in Cognitive Radio Networks*, Cambridge University Press, 2009.
- [3] A. M. Wyglinski, M. Nekovee, and Y. T. Hou, *Cognitive radio communications and networks : principles and practice*, Academic Press, 2010.
- [4] K. Hamdi, W. Zhang, and K. B. Letaief, "Joint beamforming and scheduling in cognitive radio networks," in *Proc. IEEE Globecom*, pp.2977-2981, Washington, D. C., USA, Nov. 2007.
- [5] H. Du, T. Ratnarajah M. Pesavento, and C. B. Papadias, "Joint transceiver beamforming in MIMO cognitive radio network via second-order cone programming," *IEEE Trans. Signal Process.* vol. 60, no. 2, pp.781-792, Feb. 2012.
- [6] S. Stotas and A. Nallanthan, "Enhancing the capacity of spectrum sharing cognitive radio networks," *IEEE Trans. Veh. Technol.* vol. 60, no. 8, pp.3768-3779, Oct. 2011.
- [7] B. Wang and D. Zhao, "Scheduling for long term proportional fairness in a cognitive radio wireless networks with spectrum underlay," *IEEE Trnas. Wireless Commun.*, vol. 9, no. 3, pp.1150-1158, Mar. 2010.



- [8] Y. Kwon, J. Yoo, I. Lee, and J. Chung, "Spectrum co-existence method using orthogonal beamforming in cognitive radio systems," *J. KICS*, vol. 33, no. 11, pp.1013-1020, Nov. 2008.
- [9] A. Bayesteh and A. K. Khandani, "On the user selection for MIMO broadcast channels." *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 54, no. 3, pp.1086-1107, Mar. 2008.
- [10] M. Trivellato, F. Boccardi, and F. Tosato, "User selection schemes for MIMO broadcast channel with limited feedback," in *Proc. IEEE Veh. Technol. Conf. (VTC)*, pp.2089-2093, Dublin, Ireland, Apr. 2007.
- [11] S. Sagong, J. Lee, and D. Hong, "Capacity of reactive DF scheme in cognitive relay networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 10, no. 10, pp.3133-3138, Oct. 2011.
- [12] J. Xiang, Y. Zhang, T. Skeie, and L. Xie, "Downlink spectrum sharing for cognitive radio femtocell networks." *IEEE Sys. J.*, vol. 4, no. 4, pp.524-534, Dec. 2010.
- [13] B. A. Fette, *Cognitive Radio Technology*, Academic Press, 2009.
- [14] H. Guo and V. C. M. Leung, "Orthogonal transmissions for spectrum underlay MISO cognitive radio," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 11, no. 4, pp.1266-1270, Apr. 2012.
- [15] C. Shem and M. P. Fitz, "Opportunistic spatial orthogonalization and its application in fading cognitive radio networks," *IEEE J. Sel. Topics Signal Process.*, vol. 5, no. 1, pp.182-189, Feb. 2011.
- [16] R. Choe, Y. S. Byun, "User selection scheme for performance improvement of secondary system in cognitive radio system," in *Proc. Korea Signal Processing Conference (KSPC)*, vol. 25, no.1, pp.226-228, Suwon, Korea, Sep. 2012.
- [17] T. W. Ban, W. Choi, B. C. Jung, and D. K. Sung, "Multi-user diversity in an spectrum sharing system," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 8, no. 1, pp.102-106, Jan. 2009

최 로 미 (Romi Choe)



2012년 2월 인천대학교 전자공학과 졸업  
 2012년 3월~현재 인천대학교 전자공학과 석사과정  
 <관심분야> Cognitive radio, 디지털 통신 및 신호 처리

변 윤 식 (Youn-Shik Byun)



1978년 2월 연세대학교 전기공학과 졸업  
 1981년 2월 연세대학교 전자공학과 석사  
 1985년 2월 연세대학교 전자공학과 박사  
 1990년 8월~1991년 7월 미국 Stanford대학 전자공학과 객원 교수  
 2004년 9월~2005년 8월 고려대학교 전파통신 공학과 객원 교수  
 2006년 7월~2008년 2월 인천대학교 공과대학장  
 2008년 3월~2008년 7월 인천대학교 교무처장  
 2010년 8월~2011년 12월 인천대학교 대학원장  
 1987년 3월~현재 인천대학교 전자공학과 교수  
 <관심분야> 디지털 통신 및 신호 처리