

코그니티브 라디오 시스템에서의 직교 빔을 이용한 주파수 공유 방법

준희원 권양수*, 유재호*, 이일신*, 종신회원 정재학*

Spectrum Co-existence Method using Orthogonal Beamforming in Cognitive Radio Systems

Yangsoo Kwon*, Jaeho Yoo*, Ilshin Lee* *Associate Members*,
Jaehak Chung* *Lifelong Member*

요 약

코그니티브 라디오(cognitive radio) 기술 중 같은 지역에서 코그니티브 사용자와 우선사용자가 주파수를 공유하여 사용하는 방법은 단위 지역 당 주파수 사용효율을 향상시킬 수 있는 중요한 기술로 인식되고 있다. 본 논문에서는 코그니티브 라디오 시스템이 우선사용자에게 간섭을 미치지 않으며 동일 지역에서 우선사용자와 주파수를 공유할 수 있는 직교 빔 형성 방법을 제안한다. 제안된 방법은 우선사용자의 채널상태정보(channel state information)로부터 얻어진 부공간에 직교하는 코그니티브 라디오 사용자들을 위한 부공간을 형성함으로써 우선사용자에게 간섭을 주지 않으며 주파수를 공유할 수 있는 코그니티브 라디오 사용자들을 위한 다중 빔을 생성한다. 그리고, 코그니티브 라디오 시스템의 합 용량을 증가시키기 위해 기회적 무선자원할당 기법을 적용하였다. 전산모의 실험을 통해 제안된 주파수 공유 방법이 우선사용자에게 간섭을 주지 않음을 보였고 코그니티브 라디오 기지국이 2개의 안테나를 사용할 경우 시스템 합용량이 일반 셀룰라 시스템의 빔 포밍을 적용한 결과와 유사하게 사용자 20명에서 최대 2.72bps/Hz를 얻을 수 있음을 확인하였다.

Key Words : Cognitive radio, Co-existence, Sum-rate, Orthogonal beamforming, Orthogonalization.

ABSTRACT

Cognitive radio(CR) techniques have been considered as a strong solution of frequency scarcity due to the limitation of frequency resource, In this paper, an orthogonal beamforming method is proposed that enables cognitive radio systems to coexist with a primary users' system in the same spectrum and region without causing interference to primary systems. The orthogonal multiple beams for multi-users of CR systems are obtained through the generation of orthogonal subspaces from primary users' channel state information. To increase the sum-rate of the CR systems, the proposed scheme adopts opportunistic radio resource allocation techniques. Simulation results provides that the proposed scheme achieves 2.72bps/Hz, the sum-rate capacity at 20 cognitive users in an area with two antennas at the cognitive radio basestation.

※ 본 연구는 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT 연구센터 지원 사업의 연구결과로 수행되었음.(IITA-2008-C1090-0801-0019)

* 인하대학교 전자공학과 무선이동통신 연구실(jysookwon, jaebakki, ilshin82@inhaian.net, jchung@inha.ac.kr)

논문번호 : KICS2008-07-317, 접수일자 : 2008년 7월 15일 최종논문접수일자 : 2008년 10월 13일

I. Introduction

무선 통신 기술의 급속한 발달은 사용자들에게 보다 높은 데이터 전송률과 서비스 품질을 제공하고 있다. 무선 통신 기술은 음성 데이터의 전송을 주요 목적으로 하던 제 2세대를 거쳐서 음성과 멀티미디어 정보등과 같은 보다 많은 데이터의 전달을 위한 제 3세대로 발전하였으며 3GPP(3rd Generation Partnership Project)와 같은 다양한 무선통신기술들이 차세대 통신 표준을 위해 현재 개발 중에 있다. 그러나 새로운 무선 통신 기술들의 출현과 데이터 요구량의 증가에 비해 무선 자원은 유한하기 때문에 새로운 통신기술이 사용가능한 주파수 대역은 부족한 실정이다. 특히 채널 품질이 좋은 주파수 대역을 사용할 수 있는 여지는 거의 없는 실정이다. 이러한 문제점의 해결 방안으로 Mitola는 사업자에게 할당되어 있지만, 실제 사용하지 않고 있는 주파수 대역을 감지하여 무선 통신을 하는 기술인 코그니티브 라디오(CR: Cognitive Radio)의 기본 개념을 제시하였다^[1].

2002년 12월 FCC(Federal Communications Commission)는 주파수의 실제 사용률에 대한 연구를 시작하여 할당되어 있는 주파수 대역에 대한 실제 사용 효율을 분석하였고, 그 결과 사업자에게는 할당되어 있으나 지역적으로 실제 이용 효율은 약 15%에서 약 85% 미만인 것으로 나타났다^[2]. 이를 바탕으로 FCC는 보다 높은 주파수 사용 효율을 달성하기 위해 NPRM(Notice of Proposed Rule Making)을 통하여 비어 있는 주파수의 사용에 대한 내용을 발표하였다^[3]. 그리고 2004년 11월에 CR 기술을 기반으로 한 IEEE802.22 WRAN(Wireless Regional Area Networks)의 표준화가 시작되었다^[4]. 이와 같이 CR 기술은 차세대 통신 시스템을 위한 보다 실제적인 기술로 인식되어 왔으며 현재 연구가 활발히 진행 중이다^{[5][6]}.

CR의 중요한 기술 중 하나는 주파수에 대한 권리를 가진 우선사용자(primary users: PU)가 해당 주파수를 사용하지 않을 때를 인지하는 스펙트럼 센싱(spectrum sensing) 기술이다. 현재의 스펙트럼 센싱 기술은 PU 시스템의 주파수 사용을 짧은 시간 내에 인지할 수 있고, CR 시스템이 다른 주파수로 옮겨 통신을 하는 것이 가능하다^[7]. 그러므로 CR 시스템은 비어있던 주파수를 사용하다 PU가 그 주파수를 사용하는 것을 감지하면 통신을 멈추고 새로운 가용한 채널을 검색하고 사용하여야 한다.

그러나 만약 CR 시스템이 사용 중이던 주파수에서의 통신을 멈추지 않고 PU 시스템과 주파수를 공유할 수 있다면, 해당지역내의 주파수 효율을 현저히 증가시킬 수 있다.

이 때문에 CR 시스템이 PU 시스템과 주파수를 공유할 수 있도록 하는 기술이 연구되어 왔다^{[5][6][8][9][10]}. 기존의 주파수 공유 기술의 예로써 PU에게 미치는 전력을 제어하는 CR 시스템의 송신 전력 제어(transmit power control)와 동적 자원 관리(dynamic resource management) 등이 연구되었다^{[5][6][10]}. 그러나 PU와 CR 시스템이 근접해 있는 경우에는 주파수를 사용할 수 없기 때문에 CR 시스템의 주파수 사용효율은 효과적이지 못하게 된다. 이러한 문제를 극복하기 위해 다중 안테나(Multiple Input Multiple Output: MIMO) 기술을 적용하여 주파수 효율을 높이기 위한 연구가 활발히 진행되고 있다^{[11][12][13]}. 참고문헌 [11]은 CR 시스템의 하향링크에서 빔 포밍(beamforming)과 전력 제어를 통해 주파수를 공유하여 합 용량(sum-rate)을 증가시키는 알고리즘을 제안하였으며 PU 시스템과 CR 시스템 사이의 협력(collaboration)과 비협력(no collaboration)의 두 가지 경우로 나누어 고려하였다. 이 알고리즘을 적용하였을 경우 CR 시스템이 PU에게 미치는 허용 가능한 신호 대 간섭 잡음비 제한(tolerable signal to interference and noise ratio constraint(SINR))내에서 두 시스템이 주파수를 공유할 수 있다. 참고문헌 [12]는 다중 접속 환경(multiple access)에서 PU에게 허용 가능한 SINR을 고려하여 주파수를 공유할 수 있는 방법을 제안하였다. 그러나 참고문헌 [11]과 [12]는 순차적으로 CR 시스템의 PU에 대한 간섭량과 CR 시스템의 합-용량을 동시에 고려하여 CR 사용자를 선택하여야하므로 시스템의 복잡도가 매우 크다. 참고문헌 [13]에서는 빔 포밍과 스케줄링(scheduling) 방법을 결합한 방법을 제안하였다. 이 방법은 우선사용자의 허용 가능한 SINR 내에서 PU의 채널 값과 준직교(quasi orthogonal)인 CR 사용자(CRU)를 선택하여 주파수를 공유하여 CR 시스템의 높은 하향링크 합 용량을 얻을 수 있다. 그러나 같은 시간 슬롯에 동일 주파수를 사용하는 CRU가 많을 경우 PU에게 간섭이 누적되므로 PU의 통신서비스 품질(Quality of Service: QoS)은 보장되지 않을 수 있다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해 PU에게 간섭을 전혀 미치지 않고 주파수를 공유할 수 있는 직교 빔을 이용한 주파수 공유 방법을 제

안한다. 제안된 방법은 CR 기지국과 PU와의 채널 정보를 기본 부공간으로 정하고 이와 직교가 되는 CRU의 부공간을 구함으로써 CR 기지국과 CRU의 링크(link)로써 사용한다. 직교하는 부공간을 생성하는 방법에는 SVD(Singular Value Decomposition), QR 분해(QR decomposition) 그리고 그람-슈미츠 직교화 방법(Gram-Schmidt orthogonalization) 등이 잘 알려져 있고, 또한 낮은 복잡도를 갖고 직교화를 보장하는 다양한 방법들이 연구되고 있다 [14][15][16][17]. 본 논문에서는 다양한 직교화 방법 중 상대적으로 낮은 복잡도를 갖기 때문에 구현이 용이한 그람-슈미츠 직교화 방법(Gram-Schmidt orthogonalization)을 사용하였다. 다중 PU의 경우는 SVD 방법과 같이 직교화 부공간 기법을 사용하여 직교 부공간을 얻어낼 수도 있다. 일반적으로 PU의 CSI(Channel State Information)를 기반으로 얻어진 CR 부공간에 맞는 적합한 CRU를 선택하는 것은 어렵다. 그러므로 본 논문에서는 적은 피드백(feedback)으로 다중 사용자 다이버시티(multi-user diversity)를 이용한 최적적 무선자원할당 기법을 적용하여 향상된 합 용량을 얻었다. 전산모의실험을 통해 제안된 직교 빔 포밍 방법이 PU에게 간섭을 미치지 않으며 동시에 합 용량을 증가시키는 결과를 보였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장은 논문에서 사용한 CR 시스템 모델을 보이고, CR 시스템이 PU에게 미치는 간섭량을 설명한다. III장에서는 직교 부공간을 이용한 주파수 공유 방법을 제안하고 증가된 합 용량을 위한 스케줄링 방법을 기술한다. IV장에서는 전산모의실험을 통해 제안된 방법의 우수성을 보였다. 마지막 V장에서 결론을 맺는다.

II. 코그니티브 라디오 시스템 시나리오

본 논문에서 고려하는 시스템은 CR 시스템과 PU가 공존하여 주파수를 공유하는 것이며 이를 도식화하면 그림 1과 같이 나타낼 수 있다.

N_c 개의 안테나를 가진 CR 기지국(CR BS)이 K 명의 CRU를 지원하고 몇몇의 CRU가 PU 기지국(PU BS)이 단위 지역 내에 위치한다고 가정한다. 이 경우 하나의 PU의 수신신호는 식 (1)과 같다.

$$y_{pu} = g_{pu}x_{pu} + \sum_{i=1}^K h_{pu}w_i x_i + n_{pu}, \quad (1)$$

$$i = 1, \dots, K.$$

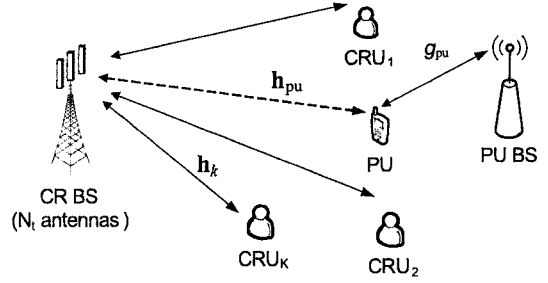


그림 1. CR 시스템 모델.

여기서, g_{pu} 는 PU와 PU BS 사이의 채널 값을 나타내고, x_{pu} 와 x_i 는 각각 PU BS가 PU에게 송신한 데이터와 CR BS가 i 번째 CRU에게 전송한 데이터를 나타낸다. $h_{pu} = [h_{1,pu}, h_{2,pu}, \dots, h_{N_c,pu}]$ 는 CR BS와 PU 사이의 채널 값 벡터이다. h_{pu} 는 PU 시스템이 IEEE802.16d/e와 같은 TDD 시스템을 기반으로 한다면 PU 시스템의 상향링크 시 CR BS에 의해 CSI의 측정이 가능하다. $w_k = [w_{1,k}, w_{2,k}, \dots, w_{N_c,k}]^T$ 는 k 번째 CRU를 위해 CR BS에 의해 형성되는 빔의 가중치 벡터이다. 여기서 $(\cdot)^T$ 는 벡터의 전치(transpose)를 나타낸다. n_{pu} 는 독립적이며 평균이 0이고 전력이 σ_n^2 인 백색 가우시안 잡음이다.

CR 시스템은 PU에게 허용 가능한 간섭레벨을 기준이하로 보장해야 한다. 이 PU의 간섭레벨을 SINR로 나타내면 식 (2)와 같이 표현할 수 있다.

$$SINR_{pu} = \frac{|g_{pu}|^2}{\sum_i |h_{pu}w_i|^2 + \sigma_n^2}. \quad (2)$$

참고문헌 [13]의 빔 포밍 방법은 PU의 채널에 준 직교하는 CRU를 선택한다. 즉, CR 시스템이 PU에게 미치는 간섭량을 I_{pu} 로 나타내고, PU의 허용 가능한 간섭레벨을 δ 라 할 때, $I_{pu} < \delta$ ($\delta > 0$)을 만족하는 CRU를 선택한다. 소수의 CRU들이 존재할 경우 $I_{pu} < \delta$ 가 성립할 수 있다. 그러나 CRU의 수가 많아지면 PU의 간섭량이 누적되므로, PU의 I_{pu} 는 보장되지 않을 수 있고 I_{pu} 를 CRU가 측정하기 어렵다. 본 논문에서는 이와 달리 PU에게 간섭을 미치지 않는 빔형성 기법을 제안한다.

III. 제안된 직교 빔 형성 방법

CR 시스템이 PU 시스템과 같은 지역에서 동일

주파수 밴드를 공유하기 위해 다중안테나를 기반으로 한 널링(nulling) 빔 포밍 기술을 이용해 PU에게 간섭신호인 CRU의 신호를 억제할 수 있다^{[14][15]}. 그러나 이러한 기술은 CR 기지국이 CRU들의 CSI를 모두 알아야 하기 때문에 빔형성을 효과적으로 하기 어렵다. 그러므로 본 논문에서는 모든 CRU에 대한 CSI정보 없이 PU에 간섭을 주지 않는 직교 빔형성을 하고, 이를 기반으로 시스템의 합-용량을 증대시키는 CR 통신방법을 제안한다.

3.1 직교 빔 형성 방법

CR BS가 N_t 개의 송신 안테나를 가지고 있을 때 \mathbf{v} 를 N_t 개로 구성된 벡터 공간(vector space, $\mathbf{v} \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$)이라 하고 \mathbf{w} 를 \mathbf{v} 의 부공간(subspace)라 하면, CR BS는 \mathbf{v} 의 부공간인 \mathbf{w} 를 통해 송신신호를 전송하게 된다. 그러므로 CR BS와 k 번째 PU간의 채널을 \mathbf{w}_k 부공간이라 하면 이에 대한 직교 부공간 \mathbf{w}_\perp 를 구성하고 이 부공간을 이용하여 전송하면 PU에 간섭을 주지 않게 된다. 직교 부공간에 포함되는 벡터값을 얻기 위해 일반적인 방법인 특이치 분해, QR 분해와 같은 다양한 방법을 사용할 수 있지만 연산량이 많은 단점이 있다. 따라서 본 논문에서는 알고리즘 구현의 상대적으로 낮은 복잡도를 갖고 다양한 빔 형성 알고리즘의 적용이 용이한 그람-슈미츠 직교화 (Gram-Schmidt orthogonalization) 방법을 적용한 예를 보였다^{[14][15][16][17]}. 만약 PU가 다수인 경우 SVD와 같은 기법을 적용하여 PU들과 직교하는 부공간을 구해냄으로써 다중 PU와 CRU가 갖는 부공간에 대해 직교하는 벡터를 얻어 다중 빔을 형성할 수 있다.

먼저, N_t 개의 안테나를 가진 CR BS가 PU와의 CSI인 \mathbf{h}_{pu} 를 이용해 $N_t - 1$ 개의 직교 빔을 생성하고, PU의 직교 빔 벡터를 이용해 CR BS는 PU에게 간섭을 미치지 않고 데이터를 전송한다. 이 방법을 상세히 기술하면 다음과 같다.

① PU의 상향링크 동안 PU와 CR BS 사이의 채널인 \mathbf{h}_{pu} 를 CR BS가 측정하고 이를 기반으로 \mathbf{h}_{pu} 를 기본 공간으로 설정한다. 이 기본 공간을 기반으로 임의의 빔 포밍 기술을 적용해 PU의 가중치 벡터 $\mathbf{w}_{pu} = [w_1, w_2, \dots, w_{N_t}]^T$ ($\mathbf{w}_{pu} \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$)를 구해낼 수 있고, 이 값을 식 (3)과 같이 기본 벡터 $N_t \times 1$ 의 \mathbf{u}_1 에 대입한다.

$$\mathbf{u}_1 = \mathbf{w}_{pu}. \quad (3)$$

② PU의 가중치 벡터 \mathbf{w}_{pu} 의 k 번째 원소에 임의의 α 를 더해줌으로써 PU의 \mathbf{w}_{pu} 에 대해 선형 독립인 $N_t - 1$ 개의 임의의 \mathbf{v}_k 벡터를 식 (4)과 같이 생성한다.

$$\mathbf{v}_k = [w_1, \dots, w_i + \alpha, \dots, w_{N_t}]^T, \quad (4)$$

$$k = 2, 3, \dots, N_t.$$

③ 선형 독립 벡터 \mathbf{v}_k 를 기본 벡터에 프로젝션 (projection)하고 이 두 벡터를 빼주는 그람-슈미츠 직교화 방법을 이용해 기본 벡터 \mathbf{u}_1 에 직교하는 가중치 벡터를 순차적으로 구할 수 있으며 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$\mathbf{u}_k = \mathbf{v}_k - \sum_{j=1}^{k-1} \frac{\mathbf{u}_j^H \mathbf{v}_k}{\mathbf{u}_j^H \mathbf{u}_j} \mathbf{u}_j, \quad (5)$$

$$k = 2, 3, \dots, N_t.$$

여기서 $(\cdot)^H$ 는 Hermitian(conjugate transpose) 연산을 나타낸다.

④ 식 (5)를 통해 얻어진 \mathbf{u}_k 는 정규화를 거쳐 PU에게 직교하는 CRU의 가중치 벡터를 구할 수 있고 식 (6)으로 표현할 수 있다.

$$\mathbf{w}_k = \mathbf{u}_k / \|\mathbf{u}_k\|, \quad (6)$$

$$k = 2, 3, \dots, N_t.$$

위의 과정 ③~④를 거쳐 $N_t - 1$ 개의 CRU를 위한 직교 빔 가중치 벡터는 순차적으로 구해진다.

CR BS에서 CRU에게 데이터를 전송하기 위해서 상기 과정을 통해 얻어진 직교 빔 가중치 벡터를 이용해 빔을 형성한다.

얻어진 $N_t - 1$ 개의 직교 가중치 벡터 \mathbf{w}_k 는 PU의 가중치 벡터 \mathbf{w}_{pu} 를 기반으로 구해졌으므로 두 벡터의 내적은 다음의 식 (7)의 조건을 만족한다.

$$\mathbf{w}_{pu}^H \mathbf{w}_k = \begin{cases} 1, & pu = k, \\ 0, & pu \neq k. \end{cases} \quad (7)$$

가중치 벡터 \mathbf{w}_k 는 서로 직교하기 때문에 공간 분할 다중접속(space division multiple access)이 가능하다.

앞서 설명한 빔 생성 벡터 사이의 직교성 때문에 식 (1)의 PU의 수신신호는 제안된 빔 포밍 방법을 적용하였을 경우 다음의 식 (8)과 같이 단순화할 수 있다.

$$y_{pu} = \sum_i h_{pu} w_i x_i + g_{pu} x_{pu} + n_{pu} \\ = g_{pu} x_{pu} + n_{pu}, \quad (8) \\ i = 2, 3, \dots, N_t - 1.$$

식 (8)에서 h_{pu} 부공간은 식 (7)의 w_{pu} 부공간과 같으므로 $h_{pu} = w_{pu}$ 를 만족하고 식 (7)에 의해 $\sum_i h_{pu} w_i = 0$ 이 된다. 즉, CR 시스템이 PU의 수신 신호에 간섭을 미치지 않는 것을 알 수 있다.

앞서 설명한 바와 같이 본 논문에서 제안한 직교 빔 포밍을 위한 가중치 벡터는 PU의 CSI를 기반으로 계산되어져 PU에게는 직교성이 보장되지만 임의의 k 번째 CRU는 다른 CRU를 위한 다중 빔에 의해 중첩된 신호를 수신하게 된다. 이 중첩 신호를 나타내면 식 (9)와 같다.

$$y_k = h_k w_k x_k + \sum_{i \neq k} h_k w_i x_i + g_{pu} x_{pu} + n_{pu}, \quad (9) \\ k = 1, 2, \dots, K, \quad i = 2, 3, \dots, N_t - 1.$$

식 (9)에 보인바와 같이 CRU들은 CR BS로부터의 다중 데이터 스트림(multiple data stream) 때문에 $\sum_{i \neq k} h_k w_i x_i$ 와 같은 자기 간섭(self-interference)을 겪게 된다. 이러한 문제를 해결할 때 CR 시스템 전체의 합-용량을 증대시키는 방법을 사용하며 다양한 기법들이 개발되어왔다^{[18][19]}. 본 논문에서는 CR 시스템의 합-용량을 증가시키기 위한 기회적 빔 포밍 기술을 적용하였다.

3.2 기회적 빔 포밍

본 논문에서 제안된 직교 빔 포밍 방법에 기회적 빔 포밍 기술을 적용하기 위해서 먼저 CR BS가 PU의 CSI를 기반으로 다중의 직교 빔을 형성한다. 다음으로 CR BS는 전체 CRU로부터 전송받는 CQI 또는 ESNR(Effective SNR)로써 사용자를 선택한다^[19]. 수신된 CQI 중 CR BS는 PFS(Proportional Fair Scheduling)나 max-SNR 등과 같은 스케줄링 기법을 적용하여 CRU를 선택한다.

Max-SNR 방법은 시스템의 합-용량을 극대화 시

킬 수 있는 장점이 있으나, 사용자들의 QoS를 보장하지 못한다. 그러므로 사용자의 형평성(fairness)과 QoS를 만족시키기 위해 PFS 스케줄링 방법이 IS-856등의 시스템에 널리 사용된다^[20].

PFS 방법은 CR BS가 CRU의 데이터 요구량과 전송률의 비가 가장 큰 CRU를 선택한다. 데이터 요구량 $R_k(t)$ 는 시간 슬롯 t 에서 k 번째 CRU의 전송률에 대한 피드백 정보이다. CR BS는 CRU사이의 평균 데이터 율 $T_k(t)$ 를 매 시간 슬롯마다 저장하고, CR BS는 다음 시간 슬롯에 데이터를 전송할 CRU를 선택하는데 있어 식 (10)이 최대인 k^* 번째 CRU를 선택한다.

$$\frac{R_k(t)}{T_k(t)}. \quad (10)$$

식 (10)은 CR BS가 일시적 데이터 율이 높은 사용자 또는 평균 데이터 율이 낮은 사용자를 선택하여 데이터를 전송함으로써 사용자의 형평성을 유지 하는 것을 의미한다.

평균 데이터 율 $T_k(t)$ 는 다음의 식 (11)에 의해 지속적으로 수정된다.

$$T_k(t+1) = \begin{cases} (1 - \frac{1}{t_c})T_k(t) + \frac{1}{t_c}R_k(t), & k = k^*, \\ (1 - \frac{1}{t_c})T_k(t), & k \neq k^*. \end{cases} \quad (11)$$

식 (11)에서 최대 형평성 보장시간 t_c 는 CRU의 형평성(fairness)을 유지하기 위해 사전에 정의한다. CR BS는 CRU 선택을 위해 임의의 빔 형성 벡터를 이용해 신호를 전송한다. CRU는 수신한 신호의 CQI 또는 ESNR을 CR BS에 피드백(feedback)하고 CR BS는 수집된 정보를 기반으로 CRU를 선택한다. CRU 선택 시 max-SNR이나 PFS를 적용하면 CRU의 CSI 없이 합-용량을 극대화시키거나 QoS를 보장하면서 합-용량을 증가시킬 수 있다. 이는 다수의 CRU 중 링크 성능이 좋은 CRU를 선택함으로써 다중사용자 다이버시티(multi-user diversity)를 얻기 때문이다. 추가적으로 CR BS의 각 안테나에 채널 상황을 고려하여 다른 전력을 할당함으로써 CR 셀 내의 합-용량을 증가시킬 수 있다^{[21][22]}. 본 논문에서는 직교 빔 형성과 기회적 빔 포밍 방법에 주안점을 두었기 때문에 균일 전력을 사용한 예를 보였다.

IV. 전산모의실험 및 결과

본 절에서는 제안된 직교 빔 형성 기술을 CR 시스템에 적용하였을 경우 PU에게 간섭을 미치지 않고, 기회적 빔 포밍 방법을 적용함으로써 합-용량의 증가 정도를 알아보는 전산모의실험을 하였다.

전산모의실험을 위해 CR BS는 다중안테나 시스템을 가정하였고, CRU와 PU는 각각 하나의 안테나를 가정하였다. 또한 PU의 상향링크동안 CR BS는 PU와 CR BS 사이의 CSI를 정확히 측정한다고 가정한다. 그리고 무선 채널은 각각 독립적인 레일리 페이딩 채널(Rayleigh fading channel)을 가정하였으며, 하나의 프레임동안 채널은 변하지 않는 블록 페이딩(block fading)을 가정하였다.

제안된 CR 환경에서의 제안된 직교 빔 형성 방법의 직교성을 알아보기 위해 CR BS가 4개의 안테나를 가지고 1개의 안테나를 가진 CRU와 PU를 가정하였다. 또한 PU는 CR BS로부터 DOA 30° 방향에 위치한다고 가정하고 CR BS는 안테나를 통해 수신된 PU의 CSI 정보를 정확히 측정한다고 가정한다. 그림 2는 상기 조건을 바탕으로 제안된 직교 빔 형성 방법의 빔 패턴을 나타낸 것이다. 그림 2에서 보이는 바와 같이 제안된 빔 포밍 방법은 PU가 위치한 30° 방향을 널링 시킴으로써 PU에게 신호의 전력이 전송되지 않음을 알 수 있다. 즉, 제안된 빔 포밍 방법은 PU에게 간섭 신호를 주지 않음을 알 수 있다.

그림 3은 참고문헌 [9]에서 제안된 방법의 간섭 신호의 레벨을 보인 것이다. 2개의 안테나를 가진 CR BS는 PU에게 미리 정해진 간섭레벨(허용 가능한 간섭량) 만을 미치는 CRU 중 최고 용량을 갖는

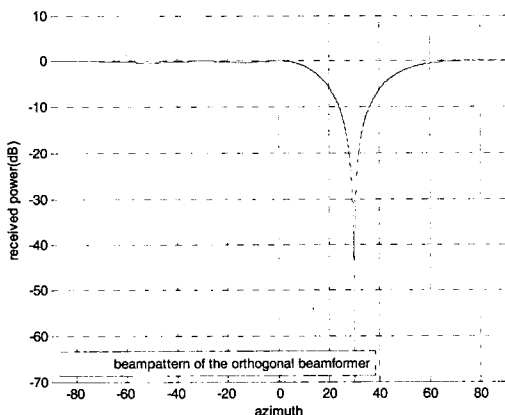


그림 2. 4x1 MISO 시스템에서의 제안된 직교 빔 형성 방법의 빔 패턴

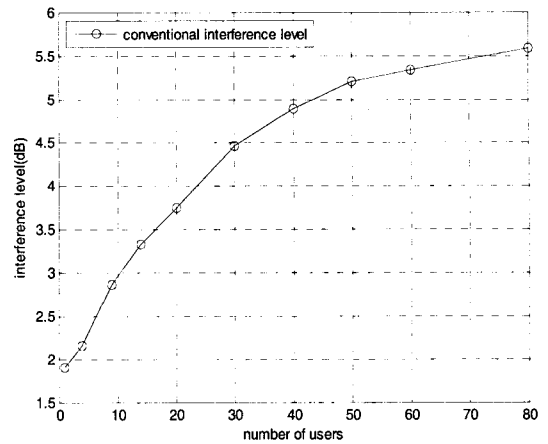


그림 3. 2x1 MISO 시스템에서의 기존 방법의 간섭 레벨.

CRU를 선택한다. 따라서 CRU가 많아질수록 미리 정해진 최대 간섭레벨인 6dB에 근접하는 것을 알 수 있다. 그러나 본 논문에서 제안된 직교 빔 방법은 CR BS에서 송신되는 신호가 PU의 CSI에 직교하게 함으로써 PU에게 간섭을 미치지 않기 때문에 PU의 QoS를 보장한다는 것을 알 수 있다.

그림 4는 CR 시스템에서의 제안된 직교 빔 포밍 방법에 기회적 빔 포밍을 적용하였을 경우의 합-용량을 나타낸 것이다. CR BS의 안테나 개수는 2개를 가정하였으며, CRU의 안테나 개수는 1개를 가정하였다. 또한, 기회적 빔 포밍을 위해 CRU 중 신호 대 간섭 잡음비(SINR: Signal to Interference and Noise Ratio)가 최대인 사용자를 선택하는 max-SINR 방법을 적용하였다. '○', '▽' 그리고 '□' 표시는 수신 SNR이 각각 0, 5 그리고 10dB일 때의 합-용량을 나타낸다. 그림 4에서 보이는 바와

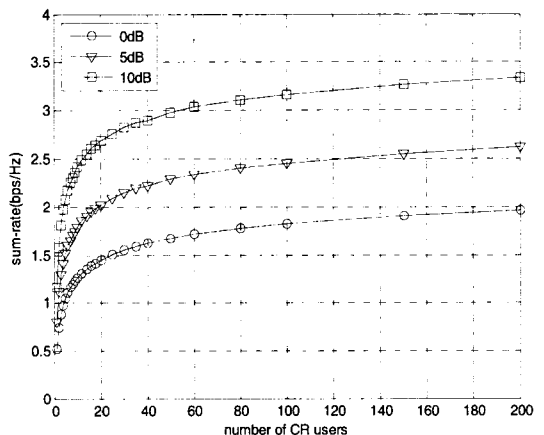


그림 4. 2x1 MISO 시스템에서의 제안된 직교 빔 형성 방법의 송신 전력에 따른 합-용량 비교

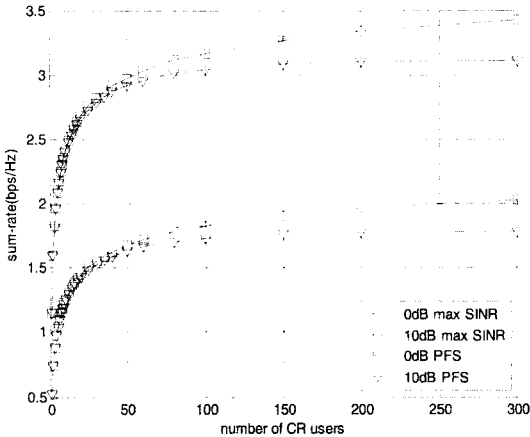


그림 5. 2x1 MISO 시스템에서의 제안된 직교 빔 형성 방법의 스케줄링 방법에 따른 성능 비교

같이, 시스템 셀 내의 CRU가 200명이고 0, 5 그리고 10dB일 때 1.92, 2.69 그리고 3.41bps/Hz의 합용량을 얻을 수 있다. 제안된 빔 포밍 방법에 최적적 빔 포밍을 적용하였을 경우 다른 최적적 빔 포밍 방법들과 같이 다이버시티 이득을 얻을 수 있다.

그림 5는 제안된 직교 빔 형성 방법에 최적적 빔 포밍의 기술 중 max-SINR과 PFS 방법을 적용하였을 때의 합용량을 나타낸 것이다. CR BS의 안테나는 2개이고 일점쇄선은 SNR 0dB를 나타내었고 실선은 SNR 10dB를 가정하였다. 그림 5에서 보이는 바와 같이 CRU가 300명인 환경에서 제안된 빔 형성 방법은 다중 사용자 다이버시티를 얻기 때문에 시스템의 합용량이 증가하는 것을 볼 수 있다. 또한 수신 SNR이 0dB와 10dB에 max-SINR을 적용하였을 때 각각 3.41과 2.07bps/Hz로써 약 1.34bps/Hz의 증가된 합용량을 얻을 수 있고, PFS의 경우 1.79와 3.1bps/Hz로 1.31bps/Hz의 합용량의 증가를 확인할 수 있다. 수신단에서의 SNR이 낮아짐에 따라 max-SINR과 PFS의 합용량 차가 줄어들는데 그 이유는 낮은 SNR 환경에서 잡음의 영향이 CR BS가 형성한 빔이 CRU에게 정확하게 매칭(matching)되지 않는 영향을 상쇄시키기 때문이다.

V. 결론

본 논문에서는 CR 시스템에서 빔 포밍 방법을 사용함으로써 PU에게 간섭을 미치지 않으며 CRU가 주파수를 PU와 공유하여 동일 지역에 공존할 수 있는 직교 빔 형성 방법을 제안하였다. 제안된

방법은 CR BS가 PU와 직교하는 부공간을 형성하고 이를 통해 CRU에 합용량을 극대화시키기 위한 최적적 자원할당기법을 이용하여 전송하는 기법이다. 전산모의실험을 통해 제안된 방법은 CR BS의 신호가 PU에 간섭을 주지 않음을 확인하였다. 그리고 직교 빔을 통해 주파수를 공유함으로써 CR BS가 2개의 안테나를 사용할 경우 CR 시스템의 합용량이 일반 셀룰라 시스템의 빔 포밍을 적용한 결과와 유사하게 CRU 20명에서 최대 2.72bps/Hz 임을 확인하였다.

참고 문헌

- [1] J. Mitola, "Cognitive radio for flexible mobile multimedia communications," in *Proc. of IEEE workshop on Mobile Multimedia Comm.*, Nov. 1999.
- [2] FCC, Spectrum policy task force report, ET Docket No.02-155, Nov. 2002.
- [3] FCC. ET. Docket No, 03-322, "Notice of Rule Making and Order," Dec. 2003.
- [4] IEEE 802.22-06/0004r0, A PHY/MAC Proposal for IEEE 802.22 WRAN systems, Part 1:The PHY, Jan. 2006.
- [5] S. Haykin, "Cognitive radio: Brain-empowered wireless communications," *IEEE Journal on Selected Areas in Comm.*, Vol.23, No.2, pp.201-220, Feb. 2005.
- [6] D. Cabric and R. Brodersen, "Physical layer design issues unique to cognitive radio systems," in *Proc. IEEE PIMRC*, Berlin, Germany, pp.759-763, Sep. 2005.
- [7] R. Tandra and A. Sahai, "SNR walls for signal detection," *IEEE Journal of Selected Topics in Signal Proc.*, Vol.2, No.1, pp.4-17, Feb. 2008.
- [8] R. Etkin, A. Parekh and D. Tse, "Spectrum sharing in unlicensed bands," *IEEE Journal on Selected Areas in Comm.*, Vol.25, No.3, pp.517-528, April 2007.
- [9] S. Srinivasa, S. Jafar, "Cognitive Radio Networks: How Much Spectrum Sharing is Optimal?," in *Proc. IEEE GLOBECOM*, Washington. D.C, USA, pp.3149-3153, Nov. 2007.
- [10] 권양수, 지영근, 정재학, "코그니티브 라디오 시스템에서의 전력 제어를 이용한 무선 자원 공유," *한국통신학회논문지*, 제32권 제10호,

pp.1057-1064, 2007.

- [11] M. H. Islam, Y. C. Liang, and A. T. Hoang, "Joint beamforming and power control in the downlink of cognitive radio networks," in *Proc. IEEE WCNC*, Hong Kong, pp.21-26, Mar. 2007.
- [12] L. Zhang, Y. Liang, and Y. Xin, "Joint beamforming and power allocation for multiple access channels in cognitive radio networks," *IEEE Journal on Selected Areas in Comm.*, Vol.26, No.1, pp.38-51, Jan. 2008.
- [13] K. Hamdi, W. Zhang, and K. B. Letaief, "Joint beamforming and scheduling in cognitive radio networks," in *Proc. IEEE GLOBECOM*, Washington, D.C, USA, pp.2977-2981, Nov. 2007.
- [14] L. Godera, *Smart Antennas*. LLC, New York: CRC-Press, 2004.
- [15] A. E. Zooghyby, *Smart Antenna Engineering*, Norwood, MA: Artech House, 2005.
- [16] 정진곤, 이용훈, "다중 사용자 MIMO 시스템을 위한 순차적 영공간 계산," *한국통신학회논문지*, 제32권 제12호, pp.1238-1243, 2007.
- [17] 오동찬, 이용환, "패킷 기반 무선 시스템에서 다중 사용자 이득과 다중화 이득 획득을 위한 다중 직교변 전송 기법," *한국통신학회논문지*, 제33권 제3호, pp.286-295, 2008.
- [18] P. Viswanath, D. Tse, and R. Larioa, "Opportunistic beamforming using dumb antennas," *IEEE Trans. on Inf. Theory*, Vol.48, No.6, pp.1277-1294, Jun. 2002.
- [19] J. Chung, C. Hwang, K. Kim, and Y. Kim, "A random beamforming technique in MIMO systems exploiting multiuser diversity," *IEEE Journal on Selected Areas in Comm.*, Vol.21, No.5, pp.848-855, Jun. 2003.
- [20] S. number IS-856 "CDMA 2000 standard: High rate packet data air interface specification," 2000.
- [21] M. Kountouris and D. Gesbert, "Robust multi-user opportunistic beamforming for sparse networks," *IEEE SPAWC workshop*, pp.975-979, June 2005.
- [22] N. Jindal, W. Rhee, S. Vishwanath, S. Jafar, and A. Goldsmith, "Sum power iterative water-filling for multi-antenna gaussian broadcast channels," *IEEE Trans. on Inf. Theory*, Vol.51, No.4, pp.1570-1580, April 2005.

권양수 (Yangsoo Kwon)

준회원



2006년 2월 인하대학교 전자공학과 졸업
 2008년 2월 인하대학교 전자공학과 석사
 2008년~현재 인하대학교 전자공학과 박사
 <관심분야> cognitive radio, network coding, 차세대 무선 이동 통신, cooperative MIMO, MIMO-OFDM

유재호 (Jaeho Yoo)

준회원



2008년 2월 인하대학교 전자공학과 졸업
 2008년~현재 인하대학교 전자공학과 석사
 <관심분야> cognitive radio, 4G, OFDM 시스템, MIMO, UWB, 수중통신

이일신 (Ilshin Lee)

준회원



2007년 8월 인하대학교 전자공학과 졸업
 2007년~현재 인하대학교 전자공학과 석사
 <관심분야> cognitive radio, 차세대 무선 이동 통신, cooperative MIMO, UWB

정재학 (Jaehak Chung)

종신회원



1988년 2월 연세대학교 전자공학과 졸업
 1990년 2월 연세대학교 전자공학과 석사
 2000년 University of Texas at Austin 전기전산 학과 박사
 2000년~2001년 post doctoral fellow, University of Texas at Austin
 2001년~2005년 수석연구원, 삼성종합기술원
 2005년~현재 조교수, 인하대학교
 <관심분야> cognitive radio, 차세대 무선 이동 통신, MIMO-OFDM, UWB, cross layer 설계