

선택적 부분공간 간섭 정렬을 이용한 상황인식 시스템

정희원 조형원*, 박종훈*, 홍석진**, 서종필**,
 종신회원 정재학**, 정종문***

Selective Subspace Interference Alignment for Cognitive Radio Systems

Hyungwon Cho*, Jonghun Park*, Sukjin Hong**, Jongpil Seo** *Regular Members*,
 Jaehak Chung**, Jongmoon Chung*** *Lifelong Members*

요약

본 논문에서는 상황인식(CR: Cognitive Radio) 시스템에서 CR 시스템이 우선사용자와 spectrum leasing 관계에 있을 때 간섭을 많이 주는 사용자를 선택하고 이들에게 선택적으로 부분공간 간섭정렬방식을 적용하여 우선사용자와 CR 사용자에게 모두 데이터 전송을 가능케 하는 방식을 제안하였다. 각 기지국들은 사용자의 간섭 신호량을 가지고 자신의 기지국에서 요구하는 복호 가능한 SINR(signal-to-interference ratio)를 넘지 않도록 주변 셀의 간섭신호가 큰 사용자들을 순환적으로 선택하고 이들에게 선택적으로 부분공간 간섭정렬방식을 적용하는 방법이다. 제안된 방법으로 모든 사용자들은 다른 간섭에 대한 제약 없이 통신이 가능하게 된다. 전산모의실험으로 제안한 방법은 선택적 간섭정렬을 적용 안 하는 방법보다 합 용량에서 약 350% ~400% 증가함을 보였다.

Key Words : User Selection, Subspace Interference Alignment, Inter-cell Interference Management

ABSTRACT

This paper presents a selective interference alignment for cognitive radio system with spectrum leasing. The proposed method selects users who cause severe interference to other basestations that have required SINR. Since few users are selected to apply subspace interference alignment, the total complexity of the system is not high compared with that of the system who utilizes subspace interference alignment to all users. In addition, all users can transmit without considering interference. The computer simulation shows the proposed method exhibits 350% throughput enhancement at a two cell case, and 400% increase at a three cell case.

1. 서론

현재 스마트폰 같은 무선기기의 사용이 늘면서 무선 통신 시스템에서 처리할 데이터 요구량이 나날이 증가하고 있는 추세이다. 많은 양의 무선 데이터를 전송하기 위해서는 주파수당 전송 효율이 높은 무선 통신 시스템의 개발이 요구되고 이를 위해서 다중안테

나와 효율적인 스케줄링 등 다양한 방법의 무선통신 기술이 개발되어왔고 몇몇 기술들은 현재 무선통신 표준 기술로 채택되고 있다^{1,2)}.

일반 사용자들이 고품질의 화상데이터 같은 데이터를 사용하기 원하는 사용자의 요구는 상용화된 무선 데이터 전송 시스템의 한계를 넘어서고 있다. 이러한 수요자의 요구를 만족하기 위해서는 고도의 전송기술

※ 본 논문은 2011년도 삼성탈레스(주)의 재원을 지원 받아 수행된 연구임.

* 삼성탈레스(주), ** 인하대학교 전자공학과, *** 연세대학교 전기전자공학부

논문번호 : KICS2011-05-215, 접수일자 : 2011년 5월 12일, 최종논문접수일자 : 2011년 5월 19일

을 가진 새로운 무선통신 시스템이 구축되어야 하는데 이를 위해서는 신규 주파수가 필요하다. 그러나 현재 거의 모든 무선 주파수 대역들은 주파수 할당이 되어있어서 추가적으로 새로운 무선 통신 시스템을 위한 주파수를 확보하기 쉽지 않은 실정이다^{13,41}.

이와 같은 주파수 부족현상을 극복하기 위한 방법으로 제안된 것이 상황인지(CR: Cognitive Radio) 시스템이다. CR 시스템은 주파수 스펙트럼을 돈을 주고 사용하는 우선사용자(PU: Primary user)가 해당 주파수를 사용하지 않을 경우에 이를 센싱(sensing)하고 사용할지 여부를 결정하는 방법이다. 이 방법의 기본 개념은 2000년도 Mitola에 의해 처음으로 제안되었으며 IEEE802.11의 주파수 호핑 방법에 개념이 적용되어있고 CR 시스템의 표준인 IEEE802.22등에 국제 표준화되어 있다^{5,61}.

CR 시스템은 주파수 공유를 위해서 다양한 기법들이 연구되어왔다. 대부분의 방법들은 PU가 무선통신을 할 때 피해를 주지 않는 방법으로 개발되었기 때문에 우선사용자를 센싱하는 방법이 매우 중요한 기법으로 알려져 있다. 그러나 이 경우에 PU의 데이터 정보를 알지 못한다는 점에서 전체 시스템의 스펙트럼 효율을 증가시키는데 한계가 있다. 이 문제를 해결하기 위해서 우선사용자가 자신의 전송정보를 CR 사용자에게 알려줌으로써 전체 시스템의 전송효율을 높이고 지역 당 스펙트럼 효율을 높이는 방법들도 제안되었다. 이 방법은 기존의 CR 시스템보다 적극적인 방법으로 전체 시스템의 복잡도는 더 올라가게 된다⁷¹⁸¹. 이와 같이 CR 사용자가 PU의 전송 정보를 알려면 우선사용자에게 정보를 요청하여야 하는데 일반적으로 주파수 임대(spectrum leasing) 계약을 함으로써 얻을 수 있다. 이 경우에도 우선사용자에게 간섭을 주지 않는 방법으로 CR 시스템의 2차 사용자의 전송방식을 결정해야 한다^{9,101}.

본 논문에서는 이러한 spectrum leasing을 통해서 우선사용자에 주파수 사용 정보를 알려주지만 주파수를 회피하여 사용하는 기존의 방법과는 달리 우선사용자에게 간섭 정렬기법^{11,121}을 적용하도록 하고 CR 사용자도 간섭 정렬 방법을 사용함으로써 PU와 CR 사용자 간의 간섭을 회피하는 방법을 제안한다. 본 논문에서는 이방법의 구현을 위해서 PU와 CR의 모든 사용자들에게 간섭정렬을 사용하지 않고 전체 시스템의 복잡도를 줄이기 위해 우선사용자 기지국과 CR 시스템의 기지국에서 복호가 가능한 정도의 간섭을 허용하고 상호 다른 셀에 강하게 간섭을 주는 사용자만을 선택하며 선택된 사용자에게 간섭 정렬을 하는 방

법을 제안하였다. 일반 간섭정렬 방법은 모든 사용자의 채널 정보를 사용자끼리 공유해야 하는 문제를 가지고 있어서 사용자간의 정보교환이 어렵기 때문에 사용자간의 정보 교환 없이 간섭정렬을 수행할 수 있는 부분공간 간섭정렬방법을 사용하였다. 간섭정렬을 적용하는 사용자는 미리 정해 놓은 간섭제한 온도에 맞추어서 복호가 가능한 SINR을 설정하고 반복적으로 간섭에 영향을 주는 사용자를 선택하는 방법을 제안하였다.

본 논문의 구성은 제 2절에서 간섭온도와 간섭 정렬 방식에 대해서 설명을 하였고, 제 3절에서는 선택적 간섭정렬을 통한 CR 시스템에 대해서 제안을 하였고, 제 4절에는 제안한 방법의 성능 검증을 위한 전산모의 실험을 하였으면 제 5절에서는 결론을 맺는다.

II. 간섭 온도 제한과 간섭 정렬

2.1 간섭 온도 제한

무선 통신 시스템에서 전송을 하는 경우 수신을 원하는 신호의 수신된 신호 크기와 수신기 내부에 존재하는 잡음과의 비율(SNR: Signal-to-Noise Ratio)이 수신기 복호 성능에 영향을 준다. 그러나 사용자수가 증가하면 같은 주파수를 다른 사용자도 사용하게 됨으로 다른 사용자의 전송 신호도 수신을 하게 된다. 이 때 이 신호는 간섭으로 작용하여 수신기의 신호 대 간섭 잡음비(SINR: Signal-to-Interference and Noise Ratio)에 간섭의 양에 영향을 준다. CR 시스템에서는 간섭의 양이 매우 중요한 수치로 사용이 되고 이러한 간섭의 양을 간섭 온도(interference temperature)라 한다. 만일 외부 간섭 신호의 영향으로 수신단의 신호 대 간섭 잡음비가 복호 가능한 SINR 이하가 되면 수신기의 신호 복호가 불가능하게 되며 이러한 최대 간섭 온도 한계량을 간섭 온도 제한(interference temperature limit)이라 한다.

송신기의 송신 전력이 거리에 따라 변화하는 수신기에서 측정되는 수신 전력, 간섭 신호, 간섭 온도 제한 및 수신기의 잡음 전력을 도식화하면 그림 1과 같다. 그림 1은 일정한 전력으로 송신기가 송신을 할 때 수신기가 송신기에서 멀어지면서 발생하는 경로 손실(path loss)에 의해 수신신호의 크기가 작아지게 된다. 여기에 외부 간섭이 더해지고 수신기의 잡음이 더해져서 수신기에서 SINR을 측정할 수 있다. 그림 1에서 위치 (a)의 수신기는 외부 신호의 간섭이 존재하지 않지만, 수신 신호의 세기가 작아 간섭 온도 제한 아래에 존재하기 때문에 복호가 불가능하다. (b) 위치의

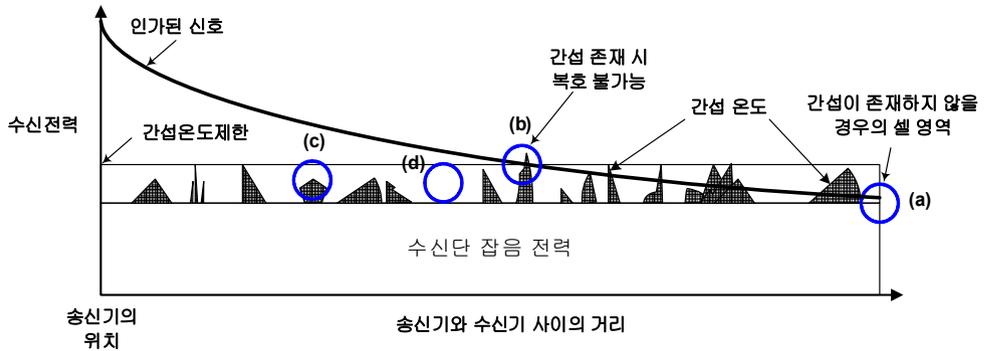


그림 1. 간섭 온도 제한 (interference temperature limit)

수신기는 (a) 위치에 비해 기지국과의 거리가 가깝고, 간섭 온도 제한 이상의 수신 전력을 갖지만 외부 간섭 신호의 영향으로 SINR이 간섭온도 제한보다 낮아져 신호의 복호가 불가능하다. 그리고 (c)와 (d)의 위치에서는 수신신호의 전력이 높고 간섭의 양이 적기 때문에 SINR이 간섭온도제한 값 보다 커서 복호가 가능하고 수신 신호와 간섭온도제한 전력 값의 차이만큼의 간섭 신호가 들어와도 복호할 수 있는 여지를 가지고 있다.

CR 시스템에서 PU가 이러한 간섭온도제한 값 이상에서 동작을 할 때 CRU (CR 사용자)가 같은 주파수 대역을 사용하면서 PU에 적은 양의 간섭을 주어서 PU의 사용자가 복호 가능 전력 값 이상으로 동작을 하도록 하면 PU와 CRU는 같은 지역에서 같은 주파수를 사용하면서 공존할 수 있게 된다. 그러나 이러한 방법은 무선 채널의 값이 시간에 따라 변화하기 때문에 PU에 미치는 간섭 양을 적절히 조절하기 어렵다. 그리고 CRU와PU가 공유 지역이 많이 있는 경우에 SU 사용자와 PU 사용자가 같은 위치에 존재할 수 있다. 이 경우에 PU와 CRU가 같은 전력으로 송신을 한다면 상향링크에서의 기지국이 측정하는 SINR은 0dB에 근접을 함으로써 복호가 어느 경우에서나 불가능하게 된다.

본 논문은 이러한 경우에 상호간 간섭에 의해 SINR을 떨어뜨리는 PU와 CRU를 찾아내고 이러한 사용자들에게 간섭 정렬을 이용함으로써 PU와 SU 기지국에서의 SINR 값을 간섭온도제한 값 이상으로 유지하여 PU와 CRU가 공존하도록 하게 하는 방법이다. 그러나 이 경우에 PU가 일반 전송이 아닌 간섭정렬을 해야 하므로 복잡도가 증가되기 때문에 CRU가 PU와 계약을 맺어서 복잡도가 증가되는 만큼의 금액을 지불하는 spectrum leasing 개념으로 이 문제를 해결할 수 있다. 본 논문에서 제안하는 방법은 일반적인

spectrum leasing 과는 달리 PU가 주파수를 점유하는 시간대에도 사용이 가능하고 PU에게 전송효율을 떨어뜨리지 않는 장점이 있다. 본 논문에서는 일반 간섭 정렬방식을 사용하는 경우 사용자 상호간에 채널 정보를 공유해야 하기 때문에 사용자간에 채널 정보를 알지 않고 간섭 정렬을 할 수 있는 부분공간 간섭 정렬 방식을 사용한다.

2.2 부분공간 간섭 정렬

부분공간 간섭정렬^[12]은 3개 이상의 다중 셀이 존재하는 셀룰러 네트워크 환경에서 간섭 정렬방식이 적용 가능하다. 본 논문에서는 상향링크만을 고려한다. 각 사용자는 네트워크 내의 모든 채널 정보를 필요로 하지 않고 오직 각 사용자가 인접 셀의 기지국에 미치는 채널 정보만을 알고 있으면 적용할 수 있다. 각 기지국은 유한한 차원을 갖는 수신 신호 공간을 설정하고 인접 셀의 사용자로부터 받는 간섭 신호를 한 곳으로 모으기 위해 다차원을 갖는 부분공간을 생성한다. 이때 원하는 신호 공간의 차원과 전체 신호 공간의 차원의 비를 간섭 자유(interference-free) 자유도라 하고 식 과 같이 정의한다. 식 (1)에서 다중 셀과 사용자가 증가하여도 항상 통신을 할 수 있는 자유도가 있음을 알 수 있다.

$$\frac{K}{(G-1)\sqrt{K}+1} \rightarrow 1 \text{ as } K \rightarrow \infty. \quad (1)$$

식 (1)에서 G는 전체 셀의 개수, K는 각 셀 내의 사용자 수를 의미한다. 전체 셀이 3개인 경우, 각 사용자가 할당 받은 채널을 $n = (\sqrt{K}+1)^2$ 개의 스펙트럼으로 나눈 뒤 인접 셀의 기지국에 미치는 간섭 신호를 $\sqrt{K}+1$ 개의 스펙트럼으로 정렬한다. 그러면 기지국에서 받은 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{y}^a = \sum_{k=1}^K \mathbf{H}_{ak}^a \mathbf{v}_{ak} x_{ak} + \sum_{k=1}^K \mathbf{H}_{\beta k}^a \mathbf{v}_{\beta k} x_{\beta k} + \sum_{k=1}^K \mathbf{H}_{\gamma k}^a \mathbf{v}_{\gamma k} x_{\gamma k} + \mathbf{w}^a \quad (2)$$

식 (2)에서 K 는 각 셀 내의 사용자 수, $\mathbf{H}_{ik}^a \in \mathbb{C}^{n \times n}$ 는 셀 i 에 속한 사용자 k 로부터 기지국 j 로의 채널이고 각 대각 성분이 채널의 주파수 응답으로 이루어진 대각 행렬이다. $\mathbf{v}_{ik} \in \mathbb{C}^{n \times 1}$ 는 셀 i 에 속한 사용자 k 의 송신 벡터이고 $x_{ik} \in \mathbb{C}$ 는 전송 심볼, $\mathbf{w}^a \in \mathbb{C}^{n \times 1}$ 은 부가 가우시안 잡음이다.

각 사용자는 자신이 속한 셀의 채널과 인접 셀의 기지국과의 채널을 알고 있고 각 채널을 다음과 같이 채널을 분리한다.

$$\mathbf{H}_{ik}^j = \mathbf{H}_{ik}^{j,2} \otimes \mathbf{H}_{ik}^{j,1} \quad (3)$$

여기서 \otimes 는 크로네커(Kronecker) 곱을 의미한다. 식 (3)과 같이 채널을 분해한 후 식 (4)와 같이 송신 벡터를 만든다.

$$\begin{aligned} \mathbf{v}_{ak}^1 &= (\mathbf{H}_{ak}^{b,1})^{-1} \mathbf{v}_r, & \mathbf{v}_{ak}^2 &= (\mathbf{H}_{ak}^{c,2})^{-1} \mathbf{v}_r, \\ \mathbf{v}_{\beta k}^1 &= (\mathbf{H}_{\beta k}^{a,1})^{-1} \mathbf{v}_r, & \mathbf{v}_{\beta k}^2 &= (\mathbf{H}_{\beta k}^{a,2})^{-1} \mathbf{v}_r, \\ \mathbf{v}_{\gamma k}^1 &= (\mathbf{H}_{\gamma k}^{a,1})^{-1} \mathbf{v}_r, & \mathbf{v}_{\gamma k}^2 &= (\mathbf{H}_{\gamma k}^{b,2})^{-1} \mathbf{v}_r. \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 $\mathbf{v}_{ik} = \mathbf{v}_{ik}^2 \otimes \mathbf{v}_{ik}^1$ 이다. 식 (3)과 (4)를 식 (2)에 대입하면 기지국 a 에서의 수신 신호는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{y}^a &= \sum_{k=1}^K \left[\left\{ \mathbf{H}_{ak}^{a,2} (\mathbf{H}_{ak}^{c,2})^{-1} \mathbf{v}_r \right\} \otimes \left\{ \mathbf{H}_{ak}^{a,1} (\mathbf{H}_{ak}^{b,1})^{-1} \mathbf{v}_r \right\} \right] x_{ak} \\ &+ \sum_{k=1}^K \left[\mathbf{v}_r \otimes \left\{ \mathbf{H}_{\beta k}^{a,1} (\mathbf{H}_{\beta k}^{b,1})^{-1} \mathbf{v}_r \right\} \right] x_{\beta k} \\ &+ \sum_{k=1}^K \left[\left\{ \mathbf{H}_{\gamma k}^{a,2} (\mathbf{H}_{\gamma k}^{b,2})^{-1} \mathbf{v}_r \right\} \otimes \mathbf{v}_r \right] x_{\gamma k} + \mathbf{w}^a. \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)에서 첫 번째 항은 각 사용자들과 해당 기지국 사이의 유효채널 벡터이고 두 번째 항과 세 번째 항은 인접 셀로부터 받는 간섭 신호의 유효채널 벡터이다. 각 기지국에서는 강제 영점(zero-forcing) 벡터 $\mathbf{u} = \mathbf{v}_r^1 \otimes \mathbf{v}_r^2$ 를 이용하여 인접 셀에 의한 간섭을 모두 제거하며 최종적인 수신 신호는 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{u}^H \mathbf{y}^a &= \sum_{k=1}^K \mathbf{u}^H \left[\left\{ \mathbf{H}_{ak}^{a,2} (\mathbf{H}_{ak}^{c,2})^{-1} \mathbf{v}_r \right\} \right. \\ &\quad \left. \otimes \left\{ \mathbf{H}_{ak}^{a,1} (\mathbf{H}_{ak}^{b,1})^{-1} \mathbf{v}_r \right\} \right] x_{ak} + \mathbf{u}^H \mathbf{w}^a \end{aligned} \quad (6)$$

III. 부분공간 간섭 정렬을 이용한 상황인식 시스템

본 논문에서 고려하고 있는 CR 시스템은 그림 2에 나타나있다. 그림 2와 같이 PU가 존재하고 있는 상황에서 같은 지역에 CR1과 CR2가 공존하고 있다. 본 논문에서 제안하는 방식은 CR1과 CR2는 PU에게 주파수 사용권을 leasing하고 PU는 일반적인 leasing과는 다르게 상향 링크에서 PU 기지국(BS: basestation)에 간섭온도제한 이상으로 간섭을 미치는 CR 사용자와 CR BS에게 간섭 온도 이상으로 간섭을 주는 PU의 사용자를 선택하고 이들에게 간섭 정렬 방식으로 전송을 하도록 하는 것이다. 그리고 나머지 사용자들은 간섭 온도 제한 이하로 서로 동작을 하기 때문에 일반통신을 하는 방식이다. 제안하는 방식은 기존의 CR 시스템에서 사용하는 주파수 점유에 대한 센싱 부분이 없고 항상 주파수를 점유하여 사용한다는 장점이 있다. 그러므로 기존의 상황인지 시스템보다 상향링크 시 단위 면적 당 스펙트럼 효율을 개선할 수 있다.

전체 시스템은 그림 2에 나타난 것과 같이 PU 시스템과 2개의 CR 시스템으로 구성되어있다고 가정한다. 물론 이 기지국의 개수는 확장을 할 수 있다. PU와 CR은 spectrum leasing 관계에 있기 때문에 서로의 사용자들에 대한 정보를 교환할 수 있도록 PU BS와 CR BS들은 backhaul로 서로 연결되어 있다고 가정한다.

본 논문에서 제안하는 시스템의 동작은 다음과 같다. PU 시스템은 통신을 시작하기 전에 휴지시간(QT: quiet time)을 가지고 주변에 있는 CR BS1과 CR BS2의 존재를 인지한다. 그리고 CR BS1과 CR BS2도 PU의 존재를 인지하고 각 CR BS들은 PU BS에 동기를 맞춘다. 각 BS들은 서로 backhaul로 연결되어 있기 때문에 모두 동기를 맞출 수 있다. 각 기지국들이 동기를 맞추는 이유는 변화하는 무선채널을 상호 간에 지속적으로 교환함으로써 변화하는 환경에 따라

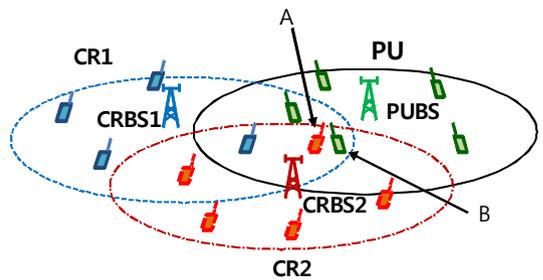


그림 2. 고려하고 있는 CR 시스템

간섭의 양을 조절하기 위함이다.

이후 각 기지국은 PU와 CRU의 사용자들은 자기 주변의 기지국과의 채널 상태를 인지할 수 있도록 각 기지국은 직교(orthogonal)하게 beacon 같은 신호를 이용하여 BS 정보를 송신한다.

각 PU 사용자와 CR 사용자는 각 PU BS과 CR BS에서 보낸 BS의 beacon 신호에 있는 cell ID를 통해 자신이 속한 기지국과의 신호크기와 인접 셀의 기지국의 신호 크기를 알 수 있으므로 자신이 인접 셀에 미치는 간섭의 양을 측정할 수 있다. 각 사용자는 자신의 기지국으로 측정된 채널 정보와 간섭신호 전력 측정값을 전송하고 CR BS는 backhaul을 통해 PU BS에 CR 사용자의 채널 정보와 간섭신호 전력 측정값을 전송한다.

PU BS에서 측정되는 간섭신호의 양은 모든 주변 CR 사용자들이 전송하는 신호 전력의 합과 같다. 그러므로 $I_{\Sigma} = \sum_{i,k} I_{i,k}$ 과 같이 주어진다. 여기서 $I_{i,k}$ 는 주변 셀 i 의 사용자 k 가 측정하는 PU 기지국에 미치는 간섭신호 전력이다. CR BS들도 이와 유사하게 간섭의 양을 측정한다. 측정된 간섭의 양에 의한 신호 대 간섭 잡음비가 해당 기지국에서 복호할 수 있는 문턱값(threshold) $SINR_{THR}$ 보다 크다면 다음 식 (7)과 같이 간섭을 많이 미치는 사용자를 선택한다.

$$\{i^*, k^*\} = \arg \max_{i \in \{\alpha, \beta, \gamma\}, k \in \{1, \dots, K\}} I_{i,k} \quad (7)$$

만일 PU BS에서 셀 i^* 의 사용자 k^* 를 선택하면 PU BS는 선택되지 않은 사용자 리스트에서 해당 사용자를 제거한 후 다시 PU BS의 신호 대 간섭 잡음비 $SINR_{PU}$ 를 계산한다. 이 값을 간섭 온도 제한에 따른 신호 대 간섭 잡음비의 문턱값 $SINR_{THR}$ 과 비교한다. 여기서 $SINR_{THR}$ 은 BS가 자신의 셀 내에서 가장 신호 크기가 적은 사용자를 기준으로 정한다. $SINR_{PU}$ 값이 $SINR_{THR}$ 값보다 작은 경우에 다시 위 과정을 반복하고 $SINR_{PU}$ 값이 큰 경우에 사용자 선택 과정을 중지한다.

이러 PU BS에서 $SINR_{THR}$ 과 비교하여 인접 셀의 간섭 사용자를 선택하는 과정은 CR BS에서도 똑 같은 방법으로 PU와 다른 CR 사용자를 선택한다. 여기서 $SINR_{PU}$ 를 계산할 때, 사용자들은 BS 전송신호를 수신되었기 때문에 상·하향링크 시 송신 전력의 차이가 있지만 SINR은 상대적인 값이므로 이에 대한 조

절을 할 필요가 없다.

본 논문에서 제안한 방법을 정리하면 다음과 같다.

- 1) PU BS가 QT동안 CR BS1과 CR BS2 인지
- 2) CR BS도 PU BS와 주변의 CR BS를 인지
- 3) 모든 BS들은 backhaul을 통해 PU BS와 동기화
- 4) T_1 동안 PU BS는 beacon 신호를 이용하여 BS 정보 송신하고 각 CR 셀의 사용자가 PU BS신호를 측정함으로써PU BS에 미치는 간섭신호 전력 측정
- 5) T_2 동안 CR BS1에서 beacon 신호를 이용하여 BS 정보를 송신하고 PU와 다른 CR의 사용자가 CR BS1에 미치는 간섭신호 전력 측정
- 6) T_3 동안 CR BS2에서 beacon 신호를 이용하여 BS 정보를 송신하고 PU와 다른 CR의 사용자가 CR BS2에 미치는 간섭신호 전력 측정
- 7) 주위의 모든 CR BS에 대해서 같은 방법으로 간섭 신호 전력 측정
- 8) 각 사용자가 측정한 신호 전력 값을 해당 기지국으로 전송
- 9) 모든 CR BS와 PU BS가 각 사용자의 간섭신호 전력 값을 backhaul을 통해 각 BS로 전송
- 10) PU BS에서 $SINR_{PU} \leq SINR_{THR}$ 면, $I_{i,k}$ 가 가장 큰 에서 셀 i^* 의 사용자 k^* 사용자를 선택한 뒤 이를 제외하고 $SINR_{PU}$ 를 연산. 여기서 $SINR_{THR}$ 은 모든 BS가 자신의 셀 내에서 가장 신호 크기가 적은 사용자를 기준으로 정함
- 11) $SINR_{PU} \geq SINR_{THR}$ 를 만족할 때까지 10)번을 반복
- 12) 나머지 CR BS도 간섭신호 전력의 합 $SINR_{CR}$ 계산하고 10)-11)번과 같은 방법으로 주변 셀의 간섭사용자를 선택
- 13) 선택된 사용자들에게 부분간섭정렬기법을 적용하여 식 (4)를 이용하여 송신벡터 \mathbf{v}_{ik} 계산
- 14) 각 사용자들은 데이터 전송 시작

IV. 전산 모의 실험

본 논문에서 제안된 무선 자원 공유 방법을 적용하였을 때 PU 시스템에 통신의 제약을 안주고 PU 시스템과 CR 시스템의 상향링크 평균 셀의 합 합용량(sum rate)의 변화를 보이기 위해 전산 모의 실험을 수행하였다.

전산 모의 실험을 위해 PU 시스템과 CR 시스템의 각 노드(node)는 단일 안테나(SISO) 시스템을 가정하였고 PU 시스템은 하나 또는 두 CR 시스템과 무선 자원을 공유한다고 가정하였다. 또한 QT동안 PU 시스템과 CR 시스템의 각 사용자는 각 BS 사이의 전력을 정확하게 측정한다고 가정하였다.

각 사용자의 송신 전력은 23dBm, 각 사용자의 안테나 높이는 2m으로 하며 각 BS의 높이는 15m에 위치한다. PU 시스템과 CR 시스템은 서로 동일한 주파수 대역과 대역폭을 사용한다고 가정하며 본 논문에서는 800MHz 대역에서 6MHz 대역폭을 사용하였다. 경로 손실 모델은 suburban area Hata 모델을 사용하였으며, 각 기지국 사이의 거리는 1.73km로 한다. PU 시스템과 CR 시스템의 각 사용자는 최대 반경 1km의 원 위에 균일하게 분포(uniform distribution)한다고 가정한다. 각 기지국이 복호 가능한 상향링크 신호의 최소 요구 SINR은 5.6dB로 가정하였다. CR 시스템은 기존 CR방법인 스펙트럼 센싱 기술과 주파수 도약 과정을 거치지 않고 항상 데이터를 전송하여 해당 주파수 대역을 사용한다고 가정하였다. 또한 별도의 송신단 전력 제어 없이 일정한 송신 전력을 사용하여 주파수를 공유한다고 가정하였다.

그림 3은 이와 같은 환경에서 PU 시스템의 사용자가 10명으로 고정되어있을 때 CR 시스템의 사용자가 증가함에 따라 간섭의 양이 증가하는 일반적인 간섭 상황에서의 셀 당 합용량을 나타낸다. CR 시스템이 간섭을 주지 않는 경우 PU 시스템의 셀 합용량은 14Mbps이다. 그러나 CR 시스템의 사용자가 증가할수록 각 사용자들의 신호가 간섭신호로 작용을 하여 PU 시스템의 데이터 전송량이 감소한다. CR 시스

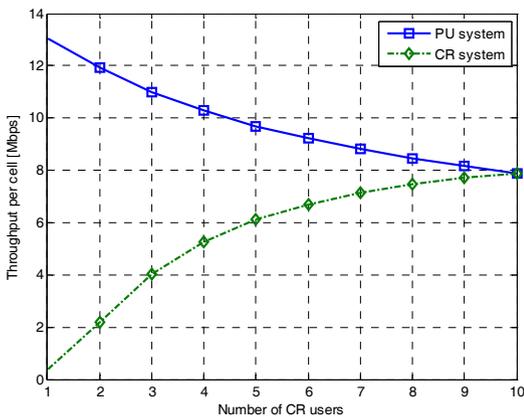


그림 3. CR 시스템에서 별도의 처리가 없을 때 PU와 CR 시스템의 셀 당 합용량

템의 사용자 수가 계속 늘어나면 전송량이 증가하지만 간섭에 의해서 일정 크기 이상 증가하지 않는다.

그림 4은 PU 시스템이 하나의 CR 시스템과 주파수를 공유할 때 셀 당 합용량을 나타낸 그림이다. 여기서 '□'는 간섭을 많이 주는 사용자들을 선택한 후 부분공간 간섭 정렬을 같이 적용했을 때의 합 용량을 나타내고, '◇'은 사용자들에게 부분공간 간섭 정렬을 적용하지 않고 모든 사용자들이 간섭신호를 받아들일 때의 합용량을 나타낸다. 각 셀 내의 사용자 수가 15명일 때, 부분공간 간섭 정렬을 적용하지 않고 주파수를 공유하는 경우 셀 합용량은 7.5Mbps이다. 그러나 제안된 선택적 부분공간 간섭 정렬을 이용한 주파수 공유 방법을 적용하면 31Mbps의 셀 합용량을 얻을 수 있다. PU BS와의 협력 또는 전력 제어를 하지 않고 주파수를 공유하는 경우 각 셀의 사용자 수가 증가하더라도 인접 BS에 미치는 간섭 또한 지속적으로 증가하기 때문에 셀 합용량이 일정한 값으로 수렴하게 된다. 이 경우 그림 4에서 보인 바와 같이 약 7.5Mbps로 수렴하게 된다. 제안된 방법은 각 셀의 사용자 수가 증가하면 셀 합용량도 증가함을 확인할 수 있다. 이는 부분공간 간섭 정렬에서 식 의 간섭-자유(interference-free) 자유도를 얻을 수 있고 이를 통해 다중 사용자 다이버시티(multi-user diversity) 이득을 얻을 수 있기 때문이다.

그림 5는 PU 시스템이 두 CR 시스템과 주파수를 공유할 때 각 셀의 합용량을 나타낸 것이다. 각 셀의 사용자 수가 15명일 때 사용자들에게 부분공간 간섭 정렬을 적용하지 않고 주파수를 공유하는 경우 셀 합용량은 5Mbps이다. 제안된 선택적 부분공간 간섭정렬 방법을 이용해 주파수를 공유하면 21Mbps의 셀

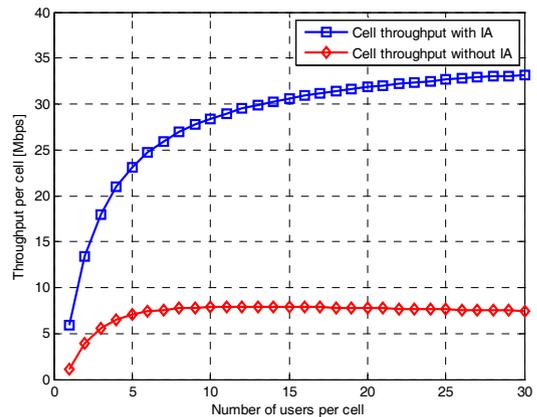


그림 4. PU 시스템이 하나의 CR 시스템과 주파수를 공유할 때의 셀 당 합용량

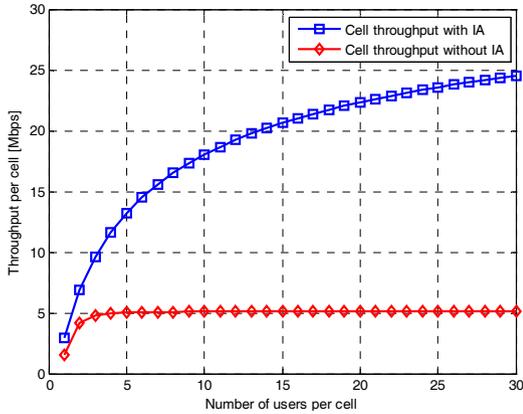


그림 5. PU 시스템이 두 CR 시스템과 주파수를 공유할 때의 셀 당 합용량

합용량을 얻을 수 있다.

아래의 표 1은 제안된 방법에서 부분공간 간섭 정렬을 수행하기 위해 선택된 사용자 수를 나타내었다. 전체 사용자의 40~63%에게만 부분공간 간섭 정렬을 적용하더라도 간섭 온도 제한 이내의 간섭만을 미침을 확인할 수 있다.

그림 4과 5에서 보인 바와 같이 각 셀의 사용자 수가 15명인 경우 제안된 방법을 적용했을 때의 셀 합용량은 각각 31Mbps와 21Mbps로써 PU 시스템과 주파수를 공유하는 CR 시스템의 수가 많아질수록 셀 합용량이 다소 줄어든다. 각 셀의 합용량이 감소하는 원인은 부분공간 간섭 정렬에서 다중 사용자 다이버시티 이득에 관여하는 간섭-자유 자유도식 (1)에 있다. II. 2에서 설명한 바와 같이 간섭-자유 자유도는 간섭이 전혀 없는 신호 공간의 차원과 전체 신호 공간의 차원의 비이다. 간섭-자유 자유도는 셀 당 사용자 수가 무한히 커지면 1에 수렴하나 실제 무선 통신 환경에서와 같이 사용자 수가 제한된 환경에서는 셀의 수에 따라 그 값이 달라진다. 예를 들어 그림 3과 같이 2-셀 환경에서는 자유도가 $K/(K+1)$ 지만 3-셀에서는 $K/(\sqrt{K}+1)^2$ 이다. 이는 전체 셀 수가 증가할수록 전체 신호 공간에서 간섭이 전혀 없는 신호 공간의 비중이 점차 감소함을 의미한다. 그러므로 상대적으로 다중 사용자 다이버시티 이득을 더 적게 얻을 수 있다. 그림 6에 부분공간 간섭 정렬에서 셀의 수에 따른

표 1. 제안된 방법에서 부분공간 간섭 정렬을 수행하기 위해 선택된 사용자 수

셀 당 사용자	5	10	20	30
2 cells	2	5	11	16
3 cells	3	6	13	19

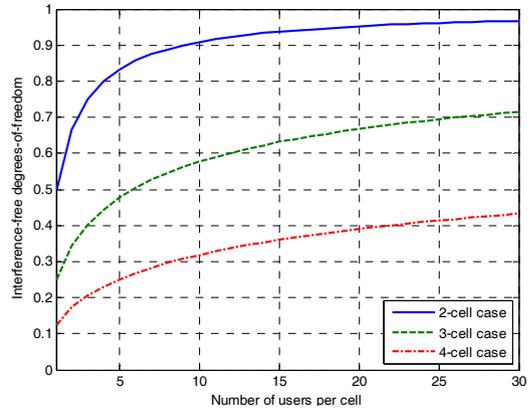


그림 6. 부분공간 간섭 정렬에서 셀의 수에 따른 간섭-자유(interference-free) 자유도

자유도의 변화를 나타내었다. 그림 6에서 보는 바와 같이 셀의 수가 증가하면 셀 당 자유도도 감소를 한다.

그러나 제안된 방법은 기존의 방법에 비해 선택적으로 간섭을 제어하여 시스템 합용량을 증대시키고 전체 시스템의 복잡도도 줄인다.

V. 결 론

본 논문에서는 CR 시스템에서 CR 사용자가 PU에게 spectrum leasing을 하여 주파수를 공유하는 경우 선택적인 간섭정렬방법을 사용해서 간섭을 제어하고 시스템의 복잡도를 줄인 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 기존의 spectrum leasing 상황인지 시스템과는 달리 우선 사용자가 간섭을 허용하되 우선사용자 BS와 CR BS가 요구하는 복호 가능 SINR을 규정하고 간섭량의 총합이 이 값을 넘지 않도록 큰 간섭을 주는 주변 셀 사용자를 선택하고 이들에게 선택적으로 부분공간 간섭정렬방식을 적용하여 간섭을 회피하도록 하는 방법이다. 제안된 방법은 모든 사용자들에게 간섭정렬을 적용하지 않아도 되므로 전체 시스템 복잡도가 커지지 않는 장점을 가지고 있다. 전산모의 실험에서 보인 것과 같이 2셀과 3셀의 경우에 전체 합용량이 각각 350%, 400% 증가함을 보였다.

참 고 문 헌

[1] IEEE Std 802.11n-2009, "IEEE Standard for Information Technolgh-Telecommunications and Information Exchanges Between Systems-Local and Metropolitan Area Networks-Specific Requirements Part 11: Wireless Lan

Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specification Amendment 5: Enhancements for Higher Throughput.”

[2] IEEE Std 802.16-2009, “IEEE Standard for Local and Metropolitan Area Networks Part 16: Air Interface for Broadband Wireless Access Systems.”

[3] FCC, Spectrum policy task force report, ET Docket No.02-155, Nov. 2002.

[4] FCC ET Docket No.03-322, “Notice of Rule Making and Order,” Dec. 2003.

[5] J. Mitola, “Cognitive radio for flexible mobile multimedia communications,” in *Proc. of IEEE workshop on Mobile Multimedia Comm*, Nov. 1999.

[6] IEEE 802.22-06/0004r0, A PHY/MAC Proposal for IEEE 802.22 WRAN systems, Part 1: The PHY, Jan. 2006.

[7] S. Haykin, “Cognitive radio : Brain-empowered wireless communications,” *IEEE Journal on Selected areas in Comm*, Vol.23, No.2 , pp.201-220, Feb. 2005.

[8] D. Cabric and R. Broderon, “Physical layer design issues unique to cognitive radio systems,” in *Proc. IEEE PIMRC*, Berlin, Germany, pp.759-763, Sep. 2005.

[9] K. Jayaweera and T. Li, “Dynamic spectrum leasing in cognitive radio networks via primary-secondary user power control games,” *IEEE Trans. Wireless Comm.*, Vol.8, No.6, pp.3300-3310, Jun. 2009.

[10] G. Vazquez-Vilar, C. Mosquera and K. Jayaweera, “Primary user enters the game : performance of dynamic spectrum leasing in cognitive radio networks,” *IEEE Trans. Wireless Comm.*, Vol.9, No.12, pp.3625-3629, Dec. 2010.

[11] V. R. Cadambe and S. A. Jafar “Interference Alignment and Degrees of Freedom of the K-User Interference Channel,” *IEEE Trans. on Information Theory*, Vol.54, No.8, pp.3424-3441, Aug. 2008.

[12] C. Suh and D. Tse “Interference Alignment for Cellular Networks,” in *Proc. of Communication, Control and Computing*, 2008 46th Annual

Allerton Conference, Sep. 2008.

조 형 원 (Hyung-Weon Cho)

정회원



1992년 2월 광운대학교 전자재
료공학과 졸업
1994년 2월 광운대학교 전자재
료공학과 석사
1997년 7월~현재 삼성탈레스
재직
2006년 9월~현재 연세대학교
전기전자공학과 박사과정

박 종 훈 (Jonghun Park)

정회원



2005년 8월 한국정보통신대학
교 전자공학과 학사
2008년 2월 한국정보통신대학
교 전자공학과 석사
2010년 4월~현재 삼성탈레스
선임연구원
<관심분야> Military Wireless
Communication System, Multi-carrier System,
Estimation Theory

홍 석 진 (Suk-jin Hong)

정회원



1978년 2월 인하대학교 전자공
학과 학사
1977년~현재 MBC 기술국 재직
2009년 2월~현재 인하대학교
전자공학과 석사과정
<관심분야> Cognitive Radio,
DTV, DMB

서 종 필 (Jong-pil Seo)

정회원



2009년 2월 인하대학교 전자공학과 학사
2011년 2월 인하대학교 전자공학과 석사
2011년 2월~현재 인하대학교 전자공학과 박사과정
<관심분야> OFDM시스템, MIMO,

Cognitive radio, LTE-Advanced

정 종 문 (Jong-Moon Chung)

중신회장



1992년 2월 연세대학교 전기전자 공학과 졸업
1994년 2월 연세대학교 전기전자 공학과 석사
1999년 8월 펜실베이니아 주립대 박사
2000년~2004년 오클라호마 주

립대 조교수

2004년~2005년 오클라호마 주립대 부교수(정년보장)

2000년~2005년 미국 OCLNB 연구소 소장

2000년~2005년 미국 국방부(US DoD) 연구책임자

2005년 연세대학교 조교수

2006년~현재 연세대학교 부교수

2005년~현재 국방부 자문위원

<관심분야> 이동통신, 무선 에드혹 망 통신, 위성통신, 통신 시스템 및 네트워크 설계 및 최적화

정 재 학 (Jae-hak Chung)

중신회원



1988년 2월 연세대학교 전자공학과 학사
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 부교수, 인하대학교

<관심분야> Cognitive radio, 차세대 무선 이동 통신, MIMO-OFDM, UWB, Cross layer설계