

다중 셀 상향링크에서 부분공간 간섭 정렬의 사용자 선택 방법

준회원 서종필*, 김현수*, 안재진*, 종신회원 정재학*

User Selection Method of Subspace Interference Alignment in Multi-cell Uplink Systems

Jong-pil Seo*, Hyun-soo Kim*, Jae-jin Ahn*, *Associate Members*
Jaehak Chung* *Lifelong Member*

요 약

본 논문에서는 다중 셀 다중 사용자 시스템에서 상향링크시 셀 간 간섭을 완화시키기 위한 부분공간 간섭 정렬을 적용했을 때 높은 합용량을 유지하기 위한 사용자 선택 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 각 사용자가 인접 셀에 미치는 간섭이 큰 사용자를 선택하고 간섭 정렬을 적용함으로써 간섭 정렬을 하는 사용자 수를 줄이는 동시에 높은 합용량을 유지시킨다. 전산 모의 실험을 통해 전체 합용량을 달성 가능한 최대 합용량의 90%로 설정했을 때 부분공간 간섭 정렬을 위해 채널을 분해 하는 사용자 수가 50%이상 감소하는 것을 확인하였다.

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

ABSTRACT

We propose a user selection method in multi-cell multiuser uplink system with the subspace interference alignment to maintain the high sum-rate capacity. The proposed method selects users whose interference to adjacent cells are strong and apply the subspace interference alignment to the users. The proposed method provides that the number of users performing the interference alignment reduces and the high total sum-rate is maintained. Simulation results exhibit the proposed method reduces the number of users who would decompose the channel for the subspace interference alignment by 50% when the required sum-rate is 90% of the maximal achievable sum-rate.

I. 서 론

셀룰러 네트워크 환경에서 셀 경계에 위치한 사용자는 인접 셀의 기지국 및 사용자로 인한 간섭을 많이 받는다. 특히 주파수 재사용률이 1인 시스템은 모든 셀이 동일한 주파수 대역을 사용하기 때문에 다른 시스템에 비해 인접 셀 간 간섭의 영향을 많이 받는다. 이는 해당 사용자의 합용량을 낮추어 QoS(Quality of

Service)의 저하시키고 전체 시스템의 합용량(Sum-rate)도 감소시킨다. 이러한 문제를 개선하기 위해 효율적으로 간섭을 제어하는 기술이 연구되어왔다 [1]-[10].

현재 상용화되었거나 연구가 진행 중인 대표적인 셀 간 간섭 제어 기술로는 부분 주파수 재사용(Fractional Frequency Reuse), 소프트 주파수 재사용(Soft Frequency Reuse), 다중 셀 다중안테나

※ 본 연구는 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(KRF-2009-0075145)

* 인하대학교 전자공학과 무선이동통신 연구실(slavik00@inha.edu, dancingscv@inhaian.net, mejj@inha.edu, jchung@inha.ac.kr)
논문번호 : KICS2010-02-055, 접수일자 : 2010년 2월 4일, 최종논문접수일자 : 2010년 3월 8일

(Multi-cell MIMO) 등이 있다. 이 중에서 부분 주파수 재사용과 소프트 주파수 재사용 기술은 reuse partitioning 기술을 이용하여 한 개의 셀을 여러 개의 동심원인 sub-cell로 구분하여 각 sub-cell의 주파수 재사용률을 다르게 적용하여 간섭 신호의 크기를 줄인다^{[4]-[5]}. 이 기술은 셀 내에 분포되어 있는 사용자의 위치에 기반한 것이기 때문에 사용자의 분포 불균형에 따른 주파수 효율이 낮아지는 단점이 있다. 다중 셀 다중 안테나 기술은 일대일 다중 안테나 기술을 응용한 것으로 인접한 둘 이상의 기지국이 협력 통신을 통해 인접 셀로부터의 간섭 신호를 유효한 신호로 사용하도록 하여 합용량을 향상시킨다^{[6]-[8]}. 그러나 협력하는 셀 간에 모든 사용자들에 대한 전송 데이터를 공유하기 위한 오버헤드가 문제이다.

이러한 단점을 극복하기 위해 여러 사용자가 존재하는 채널 환경에서 간섭을 완벽하게 제거하지 않고 주어진 자원 내의 특정 영역에 다른 사용자들의 간섭 신호를 정렬시키으로써 전체 시스템의 합용량을 향상시키는 간섭 정렬(Interference Alignment)의 개념이 제안되었다^[9]. 이 방법은 모든 사용자가 다른 사용자로부터의 간섭 신호를 가용한 자유도(Degree of Freedom)의 절반 내에 위치시키으로써 나머지 절반 내에서는 간섭이 전혀 없는 통신을 할 수 있게 하는 기술이다. 자유도란 송수신 노드 간의 간섭이 없는 채널의 수를 의미한다. 이 방법은 각 사용자가 네트워크 내의 모든 채널 정보를 알고 있어야 적용이 가능하다. 또한 한 사용자에 대한 간섭 정렬이 나머지 사용자들에 대한 간섭 정렬을 보장하지 않기 때문에 분산 네트워크가 아닌 다중 셀 환경에서는 적용이 용이하지 않다.

채널 정보 교환에 따른 오버헤드와 다중 셀 환경에서의 적용이 어려운 점을 보완하기 위해 부분공간 간섭 정렬 기법이 제안되었다^[10]. 이 방법은 각 사용자가 채널 행렬을 크로네커 곱 형태를 갖는 두 행렬로 분리하여 인접 셀로부터의 간섭을 전체 수신 신호 공간 내에서 다차원을 갖는 부분공간으로 정렬하는 방법이다.

그러나 이 방법은 셀 내의 사용자의 수가 늘어날수록 채널 행렬의 크기가 사용자 수의 제곱에 비례하여 커지게 되어 연산 복잡도가 사용자 수의 제곱에 비례하여 증가한다. 또한 기지국으로부터 멀리 떨어져 있는 다른 셀의 사용자의 간섭 신호는 상대적으로 적기 때문에 모든 사용자를 간섭 정렬시키는 것은 각 사용자의 단말기의 복잡도 측면에서 비효율적이다.

그러므로 본 논문에서는 상향링크 다중 사용자 시스템에서 부분공간 간섭 정렬을 위한 채널 분해 연산을 하는 사용자 수를 줄이면서도 높은 합용량을 유지

하기 위해 각 사용자가 인접 셀의 기지국에 미치는 간섭의 양을 측정하고 부분공간 간섭 정렬을 수행할 사용자를 선택하는 방법을 제안한다. 그리고 전산 모의 실험을 통해 제안된 방법을 적용했을 때의 선택된 사용자 수에 따른 합용량 변화를 보인다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서 부분공간 간섭 정렬 방법에 대해 소개하고 III장에서 각 사용자의 단말기에서의 연산 복잡도에 대해 설명하고 이를 완화하기 위한 사용자 선택 기법을 제안한다. IV장에서 전산 모의 실험을 통해 제안된 방법을 적용했을 때의 사용자 수 변화와 전체 합용량의 변화에 대해 분석한다. 마지막 V장에서 결론을 맺는다.

II. 부분공간 간섭 정렬

부분공간 간섭 정렬은 3개 이상의 다중 셀이 존재하는 셀룰러 네트워크 환경에서 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 (1)과 같이 정의한다. 식에서 다중 셀과 사용자가 증가하여도 항상 통신을 할 수 있는 자유도가 있음을 알 수 있다^[10].

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

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.

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

식 (2)에서 K는 각 셀 내의 사용자 수, $\mathbf{H}_{ik}^j \in \mathbb{C}^{n \times n}$

는 셀 i 에 속한 사용자 k 로부터 기지국 j 로의 채널이고 각 대각 성분은 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 분해한다.

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

여기서 \otimes 는 크로네커(Kronecker) 곱을 의미하고 다음과 같은 연산을 수행한다.

$$\mathbf{A} \otimes \mathbf{B} = \begin{pmatrix} a_{11}\mathbf{B} & \dots & a_{1n}\mathbf{B} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ a_{n1}\mathbf{B} & \dots & a_{nn}\mathbf{B} \end{pmatrix}$$

식 (3)과 같이 채널을 분해한 후 식 (4)와 같이 송신 벡터를 만든다.

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

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.

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

식 (5)에서 두 번째 항과 세 번째 항은 인접 셀로부터 받는 간섭이다. 각 사용자들과 연결된 유효 채널 벡터는 식 (6)과 같은 행렬로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{H}^a &= \left[\left\{ \mathbf{H}_{a1}^{a,2} (\mathbf{H}_{a1}^{c,2})^{-1} \mathbf{v}_r \right\} \otimes \left\{ \mathbf{H}_{a1}^{a,1} (\mathbf{H}_{a1}^{b,1})^{-1} \mathbf{v}_r \right\}, \right. \\ &\quad \dots, \left. \left\{ \mathbf{H}_{aK}^{a,2} (\mathbf{H}_{aK}^{c,2})^{-1} \mathbf{v}_r \right\} \otimes \left\{ \mathbf{H}_{aK}^{a,1} (\mathbf{H}_{aK}^{b,1})^{-1} \mathbf{v}_r \right\} \right] \\ \mathbf{H}^\beta &= \left[\mathbf{v}_r \otimes \left\{ \mathbf{H}_{\beta 1}^{a,1} (\mathbf{H}_{\beta 1}^{c,1})^{-1} \mathbf{v}_r \right\}, \right. \\ &\quad \dots, \left. \mathbf{v}_r \otimes \left\{ \mathbf{H}_{\beta K}^{a,1} (\mathbf{H}_{\beta K}^{c,1})^{-1} \mathbf{v}_r \right\} \right] \\ \mathbf{H}^\gamma &= \left[\left\{ \mathbf{H}_{\gamma 1}^{a,2} (\mathbf{H}_{\gamma 1}^{b,2})^{-1} \mathbf{v}_r \right\} \otimes \mathbf{v}_r, \right. \\ &\quad \dots, \left. \left\{ \mathbf{H}_{\gamma K}^{a,2} (\mathbf{H}_{\gamma K}^{b,2})^{-1} \mathbf{v}_r \right\} \otimes \mathbf{v}_r \right] \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 \mathbf{H}^a 는 원하는 수신 신호 벡터들로 이루어진 행렬이고 \mathbf{H}^β 와 \mathbf{H}^γ 는 간섭 신호 벡터들로 이루어진 행렬이다. 연산자 \otimes 양쪽에 위치한 벡터는 $\mathbb{C}^{\sqrt{K}+1}$ 의 원소이다. \mathbf{H}^a 의 열벡터는 \otimes 양쪽의 벡터가 모두 임의성(randomness)을 가지고 있기 때문에 rank로 K 를 갖는다. 반면 \mathbf{H}^β 와 \mathbf{H}^γ 의 열벡터는 \otimes 양쪽의 벡터 중 하나만 임의성을 가지고 있기 때문에 rank가 $\sqrt{K}+1$ 이 된다. 따라서 $n = (\sqrt{K}+1)^2$ 차원을 갖는 전체 신호 공간 내에서 간섭 신호는 $\sqrt{K}+1$ 차원 부분공간으로 정렬되고 원하는 신호는 K 차원 공간으로 수신되어 식 (1)을 만족하게 된다.

III. 사용자 선택 방법

3.1 채널 분해 과정의 연산 복잡도

부분공간 간섭 정렬을 적용했을 때 각 사용자는 기지국으로 신호를 전송하기 전에 식 (3)과 같이 채널을 분해한다. 이때 크로네커 곱의 역 연산 과정이 필요한데 임의의 행렬에 대해서 이러한 연산을 하는 방법은 알려져 있지 않다. 그러므로 nearest Kronecker product problem(NKP) 방법을 사용하여 우회적으로 채널을 분해할 수 있다.

각 사용자는 인접 셀의 개수 만큼 NKP를 수행한다. 이때 채널 행렬의 크기는 $n = (\sqrt{K}+1)^2$ 이다. 따라서 한 셀 내의 간섭 정렬 사용자에게 요구되는 연산 복잡도는 $O(K^3)$ 이다.

실제 다중 셀 다중 사용자 환경에서는 자신의 기지국과 가까운 거리에 위치한 사용자는 상대적으로 인접 셀의 기지국에 미치는 간섭 신호의 세기가 작다. 이 경우 인접 셀의 기지국에서 간섭 신호를 잡음으로 간주하여 처리해도 전체 시스템 성능에 큰 영향을 미치지 않는다. 따라서 간섭 신호를 상대적으로 많이 주는 셀 경계 지역에 위치하여 강한 간섭을 야기하는 사용자에게 한해서 간섭 정렬을 적용하는 것이 부분공간 간섭 정렬을 위해 채널 분해 연산을 하는 사용자 수를 줄이면서 높은 합용량을 유지할 수 있다.

3.2 셀 간 간섭의 양에 따른 사용자 선택 방법

본 절에서는 부분공간 간섭 정렬 기법을 이용한 다중 셀 환경에서 간섭 정렬을 수행하는 사용자 수를 줄이는 동시에 시스템 합용량을 유지하기 위한 사용자 선택 방법에 대해 제안한다. 제안한 방법은 각각의 모든 사용자가 인접 셀의 기지국에 미치는 간섭을 측정하고 기지국에서 부분공간 간섭 정렬을 수행할 사용

자를 선택하는 방법이다.

II장에서 보인 바와 같이 부분공간 간섭 정렬에서 각 사용자는 다른 기지국의 신호를 수신하여 복호할 수 있기 때문에 자신이 속한 셀의 채널과 인접 셀의 기지국과의 채널을 알 수 있다. 그리고 동일 셀 내의 사용자끼리는 간섭을 미치지 않는다고 가정한다. 그러면 각 셀의 상향링크 신호의 합용량은 식 (7)과 같다.

$$C_{\alpha} = \log_2 \left(1 + \frac{\sum_{k \in \{1, \dots, K\}} P_{\alpha k}^a \| \mathbf{u}^H \mathbf{H}_{\alpha k}^a \mathbf{v}_{\alpha k} \|^2}{\sum_{i \in \{\beta, \gamma\}, m \in \{1, \dots, K\}} P_{\alpha k}^a \| \mathbf{u}^H \mathbf{H}_{\alpha k}^a \mathbf{v}_{\alpha k} \|^2 + N_0} \right) \quad (7)$$

여기서 C_{α} 는 셀 α 내의 사용자에게 대한 상향링크 합용량이고 P_{ik}^j 는 셀 i 내의 사용자 k 에서 기지국 j 로 전송된 신호의 수신 전력을 의미한다. 그리고 \mathbf{u} 는 참조벡터 \mathbf{v}_r 과 직교하는 수신 벡터이다.

만일 모든 사용자에게 간섭 정렬을 적용하는 경우 식에서 간섭 신호 $P_{\alpha k}^a \| \mathbf{u}^H \mathbf{H}_{\alpha k}^a \mathbf{v}_{\alpha k} \|^2$ 는 모두 제거되기 때문에 C_{α} 는 식 (8)과 같이 주어진다.

$$C'_{\alpha} = \log_2 \left(1 + \frac{\sum_{k \in \{1, \dots, K\}} P_{\alpha k}^a \| \mathbf{u}^H \mathbf{H}_{\alpha k}^a \mathbf{v}_{\alpha k} \|^2}{N_0} \right) \quad (8)$$

전체 L 개의 셀 관점에서 전체 사용자에게 대해서 간섭 정렬을 적용했을 때 합용량은 식 (9)과 같다.

$$C_{IA} = \sum_{\alpha=1}^L C'_{\alpha} \quad (9)$$

채널 용량은 $C = \log_2(1 + SINR)$ 이므로 SINR이 커질수록 채널 용량도 증가한다. 만일 한 셀만의 송신 전력을 키우면 해당 셀의 합용량도 증가한다. 그러나 다중 셀 환경에서는 한 셀 내의 송신 전력을 증가시키면 인접 셀에서도 자신의 셀의 SINR을 증가시키기 위해 송신 전력을 같이 증가시키기 때문에 간섭도 증가하여 전체 SINR을 증가시키지 못한다. 따라서 본 논문에서는 인접 셀에 미치는 간섭을 제어함으로써 SINR을 증가시키는 방법을 사용한다. 그리고 간섭 정렬을 수행할 사용자 수를 줄이기 위해 유효한 간섭을 미치는 사용자를 선택하고 이 사용자들을 간섭 정렬시키는 방법을 제안한다. 이때 선택된 사용자에게 간섭 정렬을 적용한 후의 전체 셀의 합용량은 식 (10)과

같다.

$$C_{sel} = \sum_{j=1}^L \log_2 \left(1 + \frac{\sum_{m \in \{1, \dots, K\}} P_{jm}^j \| \mathbf{u}^H \mathbf{H}_{jm}^j \mathbf{v}_{jm}^* \|^2}{\sum_{\{i,k\} \notin \{i^*, k^*\}} P_{ik}^j \| \mathbf{u}^H \mathbf{H}_{ik}^j \mathbf{v}_{ik}^* \|^2 + N_0} \right) \quad (10)$$

$$\max C_{sel} \leq C_{IA} \quad (11)$$

제안하는 방법은 부분공간 간섭 정렬 사용자 선택을 통해 얻을 수 있는 합용량 C_{sel} 이 C_{IA} 에 최대한 근접하도록 하는 것이다. 식 (10)에서 $\{i^*, k^*\}$ 는 각각 간섭 정렬을 적용하도록 선택된 사용자의 셀 인덱스와 사용자 인덱스의 집합이다. 이때 선택된 사용자는 송신벡터 \mathbf{v}_{ik}^* 를 식 (4)와 같이 계산하고, 선택되지 않은 사용자인 경우 각각의 부분송파에 대해서 가중치를 주지 않고 모든 부분송파가 동일한 이득으로 전송되도록 한다.

모든 사용자는 각각 자신이 인접 셀에 미치는 간섭의 양을 측정한다. 측정된 간섭 정보는 각 기지국으로 전송되고 전체 기지국은 모든 사용자의 간섭 정보를 공유하여 간섭이 강한 순서대로 사용자를 정렬한다. 그리고 이를 가지고 간섭 정렬을 적용할 N 명의 사용자를 선택한다. 이때 각 사용자가 인접 셀의 기지국에 미치는 간섭의 양은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{ik} = \sum_{m \neq i} \text{tr} \{ (\mathbf{H}_{ik}^m)^H \mathbf{H}_{ik}^m \} P_{ik}^m \quad (12)$$

간섭이 큰 순서대로 사용자를 정렬하는 과정을 구체적으로 나타내면 다음과 같다.

- 1) 모든 사용자가 식의 I_{ik} 를 측정하여 기지국으로 전송.
- 2) 전체 셀 내에서 I_{ik} 가 가장 큰 사용자 선택.

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

여기서 i^* 와 k^* 는 각각 선택된 사용자의 셀 인덱스와 사용자 인덱스를 의미한다.

- 3) 2)에서 선택된 사용자를 정렬.

$$B \leftarrow B \cup \{i^*\}, U \leftarrow U \cup \{k^*\}$$

B 와 U 는 각각 정렬된 사용자의 셀 인덱스와 사용자 인덱스로 이루어진 집합이다.

- 4) 3)에서 정렬된 사용자에 한해서 간섭 정렬을 적용했을 때의 식 (10)의 합용량 C_{sel} 계산.
- 5) $C_{sel} \geq C_{THR}$ 가 될 때 까지 3)~5)를 반복.
- 6) 선택된 사용자에 한해서 간섭 정렬을 적용하여 전송 시작.

위의 과정은 각 단계에서 계산된 C_{sel} 이 미리 정해진 C_{THR} 값 이상이 될 때까지 반복한다. 여기서 C_{THR} 는 전체 시스템 측면에서 설정하는 합용량으로, 최대 합용량보다 적게 정한다. 예를 들어 최대 합용량의 90% 정도로 합용량을 얻기 위해서 $C_{THR} = 0.9 \cdot C_{IA}$ 로 놓을 수 있다.

제안된 방법으로 간섭 정렬을 수행할 사용자를 선택하면 모든 사용자에 대해서 간섭 정렬을 수행하지 않기 때문에 선택되지 간섭 정렬을 위해 채널을 분해해야 하는 사용자 수가 줄어든다. 또한 요구되는 문턱값 이상의 합용량을 얻을 수 있기 때문에 높은 합용량을 유지할 수 있는 장점을 다음 장의 전산 모의 실험을 통해 보인다.

IV. 전산 모의 실험

본 장에서는 제안된 사용자 선택방법을 적용했을 때 선택된 사용자 수에 따른 합용량의 변화를 알아보기 위해 전산 모의 실험을 수행하였다.

전체 3개의 다중 셀 환경에서 각 셀 내의 사용자 수는 동일하다고 가정하였다. 셀 커버리지는 1km로 가정하였고 각 사용자는 그림 1과 같이 기지국과 셀 경계점을 잇는 육각 격자 구역 내에서 랜덤하게 위치하도록 설정하였다. 채널은 레일리 페이딩 채널 (Rayleigh fading channel)을 가정하였고 모든 사용자는 각 기지국으로의 채널을 완벽히 알고 있다고 가정한다. 채널 정보 교환과 사용자 선택으로 인한 전송 시간 지연은 없다고 가정한다. 각 사용자의 송신 전력은 10dBm으로 고정하고 별도의 송신 전력 제어는 고려하지 않는다고 가정한다. 잡음 전력 밀도는 -150dBm으로 가정한다. 그리고 path loss exponent는

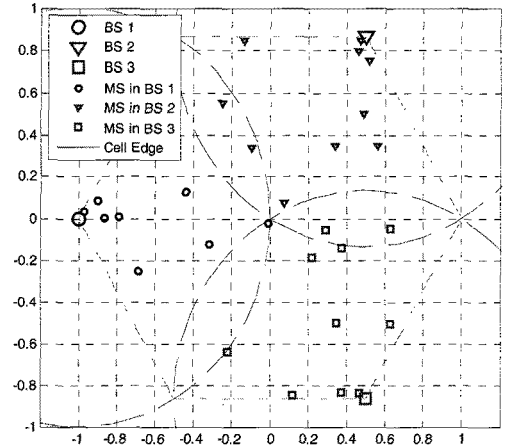


그림 1. 기지국과 사용자 분포

3.76로 가정하였다.

그림 2는 각 셀마다 5명씩 총 15명의 사용자가 존재하는 환경에서 제안된 사용자 선택 방법을 적용했을 때 전체 합용량을 나타낸 것이다. 가로축은 전체 사용자 중 선택된 사용자의 수를 나타내고 세로축은 세 개의 셀의 각각의 상향링크 합용량의 합을 나타낸다. 여기서 최대 합용량은 $C_{IA} = 69.5\text{bps/Hz}$ 이다. $C_{THR} = 0.9 \cdot C_{IA}$ 로 설정하면 $C_{THR} = 62.6\text{bps/Hz}$ 가 된다. 7명을 선택한 경우의 합용량은 $C_7 = 64.3\text{bps/Hz}$ 로 5.2bps/Hz 만의 성능 열화가 발생한다. 전체 사용자 중 간섭 정렬을 수행하는 사용자 수는 47%이지만 전체 합용량 손실은 7.5%에 불과함을 알 수 있다. 이는 제안된 사용자 선택 방법을 적용했을 때 부분공간 간섭 정렬을 위한 채널 분해 연산을

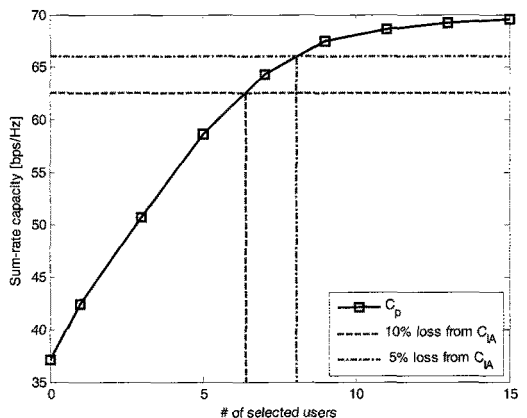


그림 2. 셀 당 사용자가 5명일 때 선택된 사용자 수에 따른 합용량

수행할 사용자 수가 53% 감소하지만 단 7.5%만의 성능 저하가 발생함을 알 수 있다. 다른 예로 그림 2에서 합용량을 전체의 95%로 설정하는 경우 $C_{THR} = 0.95 \cdot C_{IA}$ 가 된다. 그리고 $C_{THR} = 66\text{bps/Hz}$ 가 되고 이때 9명을 선택하면 합용량은 $C_9 = 67.5\text{bps/Hz}$ 이다. 이때 간섭 정렬을 수행하는 사용자 수는 40% 감소하지만 전송률 저하는 2.9%에 불과하다.

그림 3과 그림 4는 각각 셀 당 사용자가 10명, 15일 때 제한된 사용자 선택 방법을 적용했을 때의 합용량을 나타낸 것이다. 그림 3과 같이 셀 당 사용자가 10명일 때 허용 손실이 10%인 경우 총 14명을 선택하여 간섭 정렬 사용자 수는 53.3% 감소하고 성능 저하는 8.2%이다. 반대로 허용된 손실이 5%인 경우 총 16명을 선택하여 간섭 정렬 사용자 수가 46.7% 감소하고 4.6%의 성능 저하가 발생한다.

그림 4에서 셀 당 사용자가 15명일 때 허용된 손실이 10%이면, 총 21명을 선택하여 간섭 정렬 사용자 수가 64.4% 감소하고 8.7%의 성능 저하가 생긴다. 허용된 손실이 5%인 경우 총 24명을 선택하여 간섭 정렬 사용자 수를 57.8% 줄이는 대신 성능은 4.5% 감소하게 된다.

전산 모의 실험 결과를 살펴보면 선택된 사용자 수가 전체 사용자의 약 50%가 될 때 까지는 사용자 수가 증가함에 따라 합용량이 선형적으로 증가하다가 그 이후부터는 증가 폭이 점차 줄어드는 것을 알 수 있다. 전체 사용자 수가 증가할수록 이러한 현상은 더욱 두드러진다. 그림 3에서 전체 30명의 사용자의 90%인 27명의 사용자를 선택했을 때의 합용량은 최대 합용량에 비해 거의 변화가 없다. 반면 그림 4에서

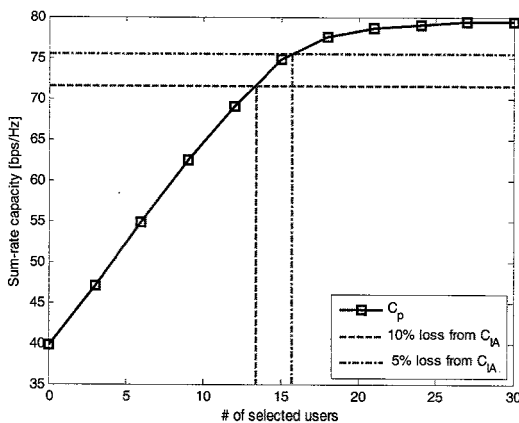


그림 3. 셀 당 사용자가 10명일 때 선택된 사용자 수에 따른 합용량

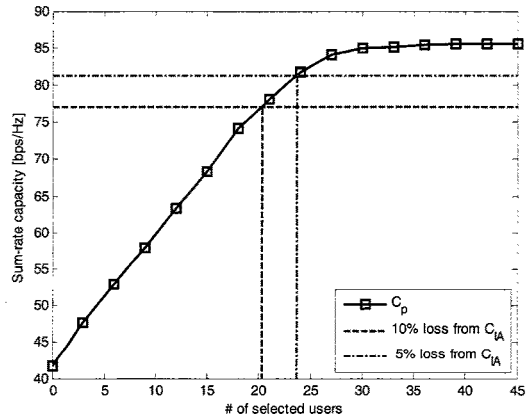


그림 4. 셀 당 사용자가 15명일 때 선택된 사용자 수에 따른 합용량

전체 45명 중 66.7%인 30명을 선택했을 때의 합용량은 최대 합용량과 거의 비슷하다. 선택되지 않은 사용자의 비율이 같다면 전체 사용자 수가 많을수록 선택되지 않은 사용자가 미치는 간섭의 양이 상대적으로 더 적다. 또한 전체 사용자 수가 많을수록 간섭신호의 크기가 작은 사용자의 수가 늘어나기 때문에 선택된 사용자 수의 비율이 같더라도 SINR은 더욱 빠르게 최대값에 도달하게 된다. 따라서 제안된 방법은 전체 사용자 수가 증가할수록 더욱 효과적이다.

VI. 결 론

본 논문에서는 다중 셀 환경에서 상향링크 통신시 인접 셀 내의 사용자로부터의 간섭을 제어하기 위한 기법인 부분공간 간섭 정렬에서 전체 사용자 수가 많을 때 부분공간 간섭 정렬을 위해 채널 분해를 하는 사용자 수를 줄이고 높은 합용량을 유지할 수 있는 부분공간 간섭 정렬 사용자를 선택하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법은 각 사용자의 위치를 기반으로 하여 인접 셀의 기지국에 미치는 간섭을 측정하고 이 값이 큰 순서대로 간섭 정렬을 적용할 사용자를 선택하였다. 전산 모의 실험을 통해 3개의 셀을 갖는 다중 셀 환경에서 전체 합용량을 최대값의 90%로 설정했을 때, 모든 사용자가 간섭 정렬을 수행했을 때에 비해 간섭 정렬을 수행하는 사용자 수가 50% 이상 감소하는 것을 확인하였다.

참 고 문 헌

[1] C. Rose, S. Ulukus and R. Yates, "Wireless

Systems and Interference Avoidance,” *IEEE Trans. on Wireless Communications*, Vol.1, pp. 415-428, July. 2002.

[2] W. Yu, W. Rhee, S. Boyd and J. M. Cioffi, “Iterative Waterfilling for Gaussian Vector Multiple-Access Channels,” *IEEE Trans. on Information Theory*, Vol.50, No.1, pp.145-152, Jan. 2004.

[3] T. Han and K. Kobayashi, “A New Achievable Rate Region for the Interference Channel,” *IEEE Trans. on Information Theory*, Vol.27, No.1, pp.49-60, Jan. 1981.

[4] N. Niato, F. Srethli, A. Sala and A. Capone, “Interference Mitigation Strategies for WiMax Networks,” in *Proc. of IEEE International Symposium of Wireless Communication Systems (ISWCS '07)*, Oct. 2007.

[5] X. Zhang, C. He, L. Jiang and J. Xu, “Inter-cell Interference Coordination based on Softer Frequency Reuse in OFDMA Cellular Systems,” in *Proc. of IEEE International Conference on Neural Networks and Signal Processing(ICNNSP '08)*, June. 2008.

[6] S. Parkval, E. Dahlman, A. Furuskar, Y. Jading, M. Olsson, S. Wanstedt and K. Zangi, “LTE-Advanced - Evolving LTE towards IMT-Advanced,” *Proc. of IEEE Vehicular Technology Conference 2008(VTC '08)*, Sep. 2008.

[7] 3GPP, R1-082896, “Coordinated Multi-cell Transmission for LTE-Advanced Downlink,” ETRI.

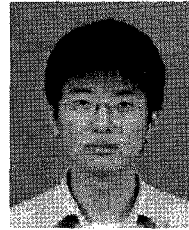
[8] 3GPP, R1-082942, “Network MIMO in LTE-Advanced,” LG Electronics.

[9] 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.

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

서 종 필 (Jong-pil Seo)

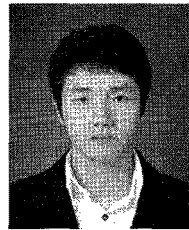
준회원



2009년 2월 인하대학교 전자공학과
2009년 3월~현재 인하대학교 전자공학과 석사과정
<관심분야> OFDM시스템, MIMO, Cognitive radio, LTE-Advanced

김 현 수 (Hyeon-soo Kim)

준회원



2008년 2월 인하대학교 전자공학과
2008년 3월~현재 인하대학교 전자공학과 석사과정
<관심분야> 수중 음향 통신, IMT-Advanced, cooperative MIMO, IPTV

안 재 진 (Jae-jin Ahn)

준회원



2009년 8월 인하대학교 전자공학과
2009년 9월~현재 인하대학교 전자공학과 석사과정
<관심분야> OFDM시스템, MIMO, Cognitive radio, LTE-Advanced

정 재 학 (Jae-hak Chung)

중신회원



1988년 2월 연세대학교 전자공학과
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