

협력적 스케줄링 및 빔형성을 위한 순환적 코드북 기법

정회원 김 성 현*, 종신회원 이 상 훈*

Cyclic Codebook Scheme for Coordinated Scheduling and Beamforming

Seonghyun Kim* *Regular Member*, Sanghoon Lee*^o *Lifelong Member*

요 약

본 연구는 다중 셀 환경에서 셀 간 간섭의 영향을 극복하기 위한 제한적 되먹임 기반의 협력적 스케줄링 및 빔형성 기법에 관한 것으로, 셀 간 간섭의 영향이 크게 작용하는 셀 외곽에서의 성능을 향상시키면서 또한 전체 시스템의 성능을 보장하는 것을 목표로 한다. 기존 전체 채널상태정보 기반의 협력적 스케줄링 및 빔형성 기법의 경우, 사용자와 기지국은 채널상태정보의 되먹임 및 채널상태정보 교환에 대한 과부하가 크게 발생한다. 본 연구에서는 제한된 되먹임 기반의 협력적 스케줄링 및 협력적 빔형성 기법에서 인접 셀 간 간섭을 줄일 수 있는 간섭 채널의 영공간의 효율적 확보를 위한 코드북을 제안하고, 제안하는 코드북을 기반으로 외곽의 성능 및 전체 시스템의 성능을 높이기 위한 협력적 스케줄링 및 빔형성 기법을 제안한다. 제안하는 기법에 대한 성능은 비례적 공정 스케줄링을 통하여 외곽사용자의 채널용량 증가 및 전체 시스템의 채널용량 증가를 보임으로써 제시하였다.

Key Words : 다중안테나, 제한적 되먹임, 협력적 전송, Quality-of-service, 인접 셀 간 간섭

ABSTRACT

In this paper, we propose coordinated scheduling and beamforming based on limited feedback to overcome the effects of inter-cell interference in multi-cell environment. The goal of this study is to improve a performance of cell-edge area significantly affected by the inter-cell interference and also to guarantee a performance of the entire system. Existing coordinated scheduling and beamforming based on the perfect channel state information generates an overhead for the channel state information feedback and exchange at the users and base stations, respectively. In this study, first we propose a novel codebook to obtain a null space of an interference channel efficiently which can be used to reduce the inter-cell interference. Using the proposed codebook, we propose coordinated scheduling and beamforming to improve the performance of cell-edge area and the entire system. Through the proportional fair scheduling, the performance of the proposed technique is shown as improvement of channel capacity for users located cell-edge area and entire system.

I. 서 론

다중안테나 기술이 발전함에 따라 공간적 자원의

중요성이 대두되고, 송수신단에서 다중안테나를 적용함에 따라 동일 주파수 대역에서 multiple stream 의 전송이 가능해졌다. 이와 같은 다중안테나 기술

* 이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (2010-0011995)

※ 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원 대학 IT 연구센터 육성지원사업의 연구결과로 수행되었음 (NIPA2011-C1090-1111-0006)

* 연세대학교 무선네트워크 연구실 (sh-kim@yonsei.ac.kr, slee@yonsei.ac.kr), (° : 교신저자)

논문번호 : KICS2011-06-273, 접수일자 : 2011년 6월 29일, 최종논문접수일자 : 2011년 11월 4일

의 특성에 따라 동일 주파수 대역에서 다수의 사용자를 서비스할 수 있다. 다중 사용자를 서비스할 때 얻을 수 있는 최적의 전송 용량은 dirty paper coding (DPC)를 통해 얻을 수 있다¹¹. 하지만 DPC는 높은 복잡도로 인해 현실적이지 못한 기술로서, 보다 현실적인 기법인 빔형성 기법이 제안되었다. 다중안테나의 중요 기술 중 하나인 빔형성 기법은 다중안테나를 갖고 있는 전송단이 multiple stream을 각각에 해당하는 빔을 구성하여 할당함으로써, 동일 주파수 대역에서 다중안테나 수만큼의 독립된 데이터를 전송하는 방식으로 빔의 방향에 따라 수신단의 전송률을 유연하게 조절할 수 있다는 큰 장점이 있다. 높은 복잡도를 갖는 DPC와 달리 빔형성 기법은 선형적 전처리 행렬을 이용하여 낮은 복잡도로 다중 사용자 서비스가 가능하다는 장점을 갖고 있기 때문에, 빔형성 기법에 대한 다양한 연구가 이루어졌다. Zero-forcing 빔형성 기법은 다중 사용자를 서비스할 수 있는 대표적인 기법으로써 사용자 수가 증가함에 따라 DPC에 근접하는 성능을 얻을 수 있다¹². 또한 제한적 되먹임을 고려하여 보다 현실적인 빔형성 기법에 대한 연구도 수행되었다¹³. 기존 통신 분야의 빔형성 기법은 주로 단일 셀에서 다중 사용자를 서비스하는 연구에 초점을 맞추어서, 주로 빔형성 기법에서 발생하는 사용자간 간섭을 완화할 수 있는 전송 기법 및 스케줄링 기법에 대한 연구가 이루어졌다.

최근에는 하나의 셀 관점의 연구가 아닌, 다수의 셀 환경으로 연구가 확장되어 단일 셀 구조에서 발생하는 사용자간 간섭뿐만 아니라 인접 셀에 의한 간섭을 고려한 연구가 진행되고 있다. 특히 셀 외곽 지역에 위치한 사용자에 대하여 인접 셀간 간섭의 영향이 크기 때문에, 기존 단일 셀 관점의 빔형성 기법만으로는 셀 외곽 지역에 위치한 사용자의 성능을 보장할 수 없다¹⁴. 이와 같이 인접 셀간 간섭에 의한 외곽 사용자의 성능 저하를 극복하기 위한 방식으로 기지국간 협력적 통신 기법이 대두되고 있다¹⁵. 기지국간 협력적 통신을 위해서는 먼저, 기지국 사이에 사용자에 대한 채널상태정보와 사용자에 대한 데이터가 공유되어야 하므로, 기지국 사이에 유선의 백홀망이 존재한다는 가정을 기본적으로 요구된다¹⁶. 기지국간 협력적 통신 기법은 기지국 사이의 정보교환 정도에 따라 크게 두 가지로 나뉘어진다. 한 가지는 다수의 기지국이 서로에게 속한 사용자에 대한 채널상태정보와 사용자에 대한 데이터 모두를 공유하여 인접 셀로부터의 간섭신호를

데이터신호로 바꾸어 받는 방식으로서, 간섭을 완벽히 제거할 수 있는 장점이 있지만 기지국간 정보 공유량이 많다는 단점이 있다¹⁷. 다른 한 가지는 다수의 기지국이 서로에게 속한 사용자의 채널상태정보만 공유하여, 인접 셀로부터의 간섭 영향을 완화할 수 있도록 사용자를 협력적으로 스케줄링하여 서비스하는 방식이다. 이 방식은 간섭을 완벽하게 없앨 수는 없지만, 기지국 사이의 정보 공유량이 적다는 장점이 있기 때문에 앞선 방식보다 현실적인 방식이라고 볼 수 있다^{18,19}. 이와 같은 협력적 스케줄링 방식과 관련한 기존의 연구에서는 사용자에 대한 채널상태정보를 완벽하게 알고 있다는 가정을 가지고 있지만, 이 또한 실제 시스템에서 완벽한 채널상태정보를 알고 있기 어렵다는 점에서 보다 현실적인 연구가 필요하다.

본 논문에서는 다중 셀 환경에서 외곽사용자의 QoS를 보장하기 위하여 제한적 되먹임 기반의 협력적 스케줄링 및 협력적 빔형성 기법을 연구한다. 기존 협력적 스케줄링 기법은 시스템 내에 존재하는 사용자에게 기지국에 대한 전체 채널상태정보의 되먹임이 요구되고, 기지국들은 백홀을 통한 사용자의 전체 채널상태정보의 교환이 요구되므로, 사용자와 기지국은 채널상태정보 되먹임 및 교환에 대하여 부담이 크게 발생한다. 제한적 되먹임 방식은 사용자에서 채널상태정보를 약속된 코드북을 이용하여 기지국으로 보내는 방식으로, 보다 현실적인 시스템이라는 측면에서 많은 연구가 이루어졌다. 제안하는 시스템은 기존의 협력적 스케줄링 기법에 대하여 제한적 되먹임 방식을 사용함으로써 보다 현실적인 협력적 통신 시스템을 고려하여, 사용자와 기지국의 채널상태정보 되먹임 및 교환에 대한 부담을 줄일 수 있다. 기지국간 협력적 스케줄링을 위해서는 인접 셀간 간섭을 완화할 수 있는 공간적 자원이 요구된다. 즉, 각 기지국에서 전처리 행렬을 구성할 때, 최대 랭크를 사용하는 것이 아니라 여분의 공간적 자원을 비워서 전처리 행렬을 구성하고, 이로 인해 간섭채널에 대한 영공간을 얻을 수 있다. 인접 셀에서는 전처리 행렬이 사용하지 않는 공간적 자원인 영공간을 인접 셀간 간섭 완화에 사용함으로써 성능 저하를 극복할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 우선, 인접 기지국에 대한 간섭 채널의 영공간의 효율적 확보를 위한 코드북을 제안하고, 이후 제안하는 코드북을 기반으로 외곽지역의 성능 및 전체 시스템의 성능을 높이기 위한 협력적 스케줄링 및 협력적 빔형성 기법을 제안한다.

본 논문을 통해, 우리는 제한적 되먹임으로 인해 발생하는 양자화 오류를 고려한 신호 대 잡음 및 간섭비의 하한값을 수학적으로 제시하고, 이를 기반으로 협력적 스케줄링 및 협력적 빔형성 기법에 대한 알고리즘을 제시한다.

II. 시스템 모델

그림 1은 전체 시스템의 구조를 나타낸다. 사용자는 홈 기지국에 대한 채널과 인접 기지국에 대한 채널 정보를 되먹임 채널을 통해 홈 기지국에 제공하고, 기지국들은 서로 간에 연결된 유선의 백홀을 통하여 사용자의 채널정보를 교환하는 시스템을 고려한다. 기지국의 송신 안테나 수를 N_t , 사용자는 단일 안테나를 가지고 있다고 가정한다. 여기서 b 번째 셀에 속한 사용자 k 의 수신 신호를 정의하면 다음과 같다.

$$y_{b,k} = \sqrt{\rho} \mathbf{h}_{b,k} \mathbf{w}_{b,k} x_{b,k} + \underbrace{\sqrt{\rho} \mathbf{h}_{b,k} \sum_{j \in S_b, j \neq k} \mathbf{w}_{b,j} x_{b,j}}_{\text{Inter-user interference}} + \underbrace{\sqrt{\rho} \sum_{\hat{b} \in B, \hat{b} \neq b} \mathbf{h}'_{\hat{b},k} \sum_{l \in S_{\hat{b}}} \mathbf{w}'_{\hat{b},l} x'_{\hat{b},l}}_{\text{Inter-cell interference}} + \mathbf{n}_{b,k} \quad (1)$$

여기서 $\mathbf{h}_{b,k} \in \mathbb{C}^{1 \times N_t}$ 는 기지국 b 와 사용자 k 사이의 채널 벡터, $\mathbf{w}_{b,k} \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$ 은 전송 가중치 벡터, $x_{b,k}$ 는 전송 심볼, $\mathbf{n}_{b,k}$ 는 가우시안 잡음을 나타낸다. I 는 홈 셀과 인접 셀의 구분을 위한 인덱스

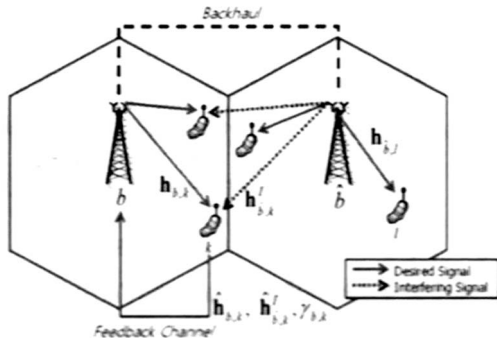


그림 1. 전체 시스템 구조

고, S_b 는 기지국에서 선택된 사용자 집합이다. 기지국은 동일 전력할당방식, 즉 $\rho = P/|S_b|$ 을 사용한다고 가정한다.

III. 제한적 되먹임 기반의 협력적 스케줄링 및 협력적 빔형성 기법

3.1 협력적 스케줄링 및 협력적 빔형성 기법을 위한 코드북 설계

협력적 스케줄링 및 협력적 빔형성 기법을 위해서는 각 기지국에 사용자의 홈 기지국으로부터의 채널과 인접 기지국으로부터의 간섭 채널에 대한 채널상태정보가 필요하므로, 각 채널을 양자화하기 위한 코드북 \mathbf{F} 와 \mathbf{N} 을 B Bit를 이용하여 각각 구성한다. 홈 기지국에 대한 채널을 양자화 하기 위한 코드북 $\mathbf{F} = [\mathbf{v}_1 \ \mathbf{v}_2 \ \dots \ \mathbf{v}_{2^B}]$, $\mathbf{F} \in \mathbb{C}^{N_t \times 2^B}$ 는 다음과 같은 조건을 만족하도록 구성한다.

$$\begin{cases} \|\mathbf{v}_i\| = 1, & (1 \leq i \leq 2^B) \\ \mathbf{v}_i \perp \mathbf{v}_{i+1} \perp \dots \perp \mathbf{v}_{i+N_t-2}, & (1 \leq i \leq 2^B - N_t + 2) \\ \mathbf{v}_i \perp \mathbf{v}_{i+1} \perp \dots \perp \mathbf{v}_{2^B} \perp \mathbf{v}_1 \perp \dots \perp \mathbf{v}_{i-2^B+N_t-2}, & (2^B - N_t + 3 \leq i \leq 2^B) \end{cases} \quad (2)$$

식 (2)은 코드북 \mathbf{F} 를 구성하는 크기가 1인 코드워드 \mathbf{v}_i 가 순환적 순서를 따른다고 하면, 즉 코드워드가 $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2, \dots, \mathbf{v}_{2^B}, \mathbf{v}_1, \dots$ 의 순서를 따를 경우, 임의의 연속한 $(N_t - 1)$ 개의 벡터가 서로 직교함을 의미한다. 코드북 \mathbf{F} 는 $N_t \times 2^B$ 의 크기를 갖는 행렬이므로, 총 $N_t \times 2^B$ 개의 변수를 행렬 구성 성분으로 갖는다. 식 (2)는 $(N_t - 2)2^B$ 개의 조건을 나타낸다. 이와 같이 코드북 \mathbf{F} 는 $(N_t - 2)2^B$ 개의 조건보다 많은 $N_t \times 2^B$ 개의 변수로부터 결정되므로, 식 (2)를 만족하는 코드북 \mathbf{F} 는 Bit 수 B , 송신안테나 수 N_t 에 따라 다양한 크기로 무수히 많이 존재한다.

식 (2)에서 코드워드 \mathbf{v}_i 부터 연속한 $(N_t - 1)$

개의 벡터들을 직교부분집합 $\mathcal{V}^{(i)} \in \mathbb{C}^{N_t \times (N_t-1)}$ 으로 정의하고 $\mathbf{v}_j^{(i)}$ 는 i 번째 직교 부분집합의 j 번째 벡터로 정의할 수 있다.

그림 2는 $N_t = 4, B = 3$ 인 경우의 코드북 \mathbf{F} 와 직교 부분집합 $\mathcal{V}^{(i)}$ 의 관계를 나타낸다. 일반적인 직교 빔형성 기법은 $N_t = 4, B = 3$ 에 대하여 최대 N_t 의 랭크를 갖는 2개의 직교 부분집합을 코드북으로 얻을 수 있는 반면, 제한하는 코드북은 $(N_t - 1)$ 의 랭크를 갖는 직교 부분집합을 이용하여 8개의 직교 부분집합을 얻을 수 있다.

인접 기지국에 대한 간섭 채널을 양자화 하기 위한 코드북 $\mathbf{N} = [\mathbf{u}_1 \ \mathbf{u}_2 \ \dots \ \mathbf{u}_{2^B}]$, $\mathbf{N} \in \mathbb{C}^{N_t \times 2^B}$ 는 $\mathcal{V}^{(i)}$ 를 이용하여 다음과 같은 조건을 만족하도록 구성한다.

$$\begin{cases} \|\mathbf{u}_i\|=1, & (1 \leq i \leq 2^B) \\ \mathbf{u}_i \perp \mathcal{V}^{(i)}, & (1 \leq i \leq 2^B) \end{cases} \quad (3)$$

인접 기지국은 i 번째 직교 부분집합 $\mathcal{V}^{(i)}$ 내의 벡터들을 이용하여 i 번째 전처리 행렬 $\mathbf{W}_\eta^{(i)} \in \mathbb{C}^{N_t \times (N_t-\eta)}$ 을 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$\mathbf{W}_\eta^{(i)} = [\mathbf{v}_1^{(i)} \ \dots \ \mathbf{v}_{N_t-\eta}^{(i)}] \quad (4)$$

여기서 η 는 전처리 행렬 $\mathbf{W}_\eta^{(i)}$ 에서 사용하지 않는 영공간에 대한 랭크를 의미한다. 인접 기지국에서 $\mathbf{W}_\eta^{(i)}$ 를 사용하여 직교 빔형성을 수행할 경우, 홈 기지국은 $\mathbf{u}_{i-\eta+1}, \dots, \mathbf{u}_i$ 중 하나를 간섭 채널로 갖는 사용자를 스케줄링함으로써 인접 셀간 간섭을 줄일 수 있다.

그림 3은 $N_t = 3$ 일 때, $\eta = 1, 2$ 인 경우에 대

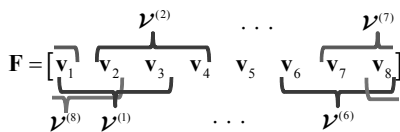


그림 2. $N_t = 4, B = 3$ 인 경우, 코드북과 직교 부분집합

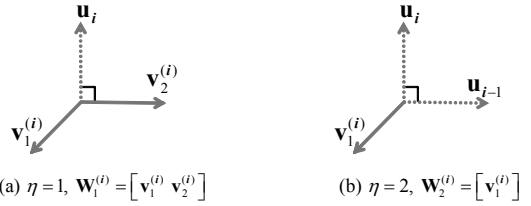


그림 3. $N_t = 3$ 일 때, η 에 대한 전처리 행렬과 영공간의 관계

한 전처리 행렬과 영공간에 해당하는 \mathbf{u}_i 의 관계를 나타낸다.

b 번째 셀에 속한 사용자 k 는 홈 기지국과 인접 기지국에 대한 채널의 방향벡터 $\tilde{\mathbf{h}}_{b,k} = \mathbf{h}_{b,k} / \|\mathbf{h}_{b,k}\|$, $\tilde{\mathbf{h}}'_{b,k} = \mathbf{h}'_{b,k} / \|\mathbf{h}'_{b,k}\|$ 에 대하여 최소 거리 기준에 따라 홈 기지국에 대한 코드북 \mathbf{F} , 인접 기지국에 대한 코드북 으로부터 양자화 된 채널벡터 $\hat{\mathbf{h}}_{b,k}$, $\hat{\mathbf{h}}'_{b,k}$ 를 다음과 같이 선택한다.

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{h}}_{b,k} &= \mathbf{v}_{\alpha(b,k)}, \text{ where } \alpha(b,k) = \arg \max_{1 \leq i \leq 2^B} |\tilde{\mathbf{h}}_{b,k} \mathbf{v}_i| \\ \hat{\mathbf{h}}'_{b,k} &= \mathbf{u}_{\alpha(\hat{b},k)}, \text{ where } \alpha(\hat{b},k) = \arg \max_{1 \leq i \leq 2^B} |\tilde{\mathbf{h}}'_{b,k} \mathbf{u}_i| \end{aligned} \quad (5)$$

여기서 양자화 오류는 $\varepsilon_{b,k} = 1 - |\hat{\mathbf{h}}_{b,k} \hat{\mathbf{h}}_{b,k}^H|^2 = \sin^2 \theta_{b,k}$ 으로 정의한다. 사용자는 되먹임 채널을 통해 홈 기지국으로부터의 채널과 인접 기지국으로부터의 채널 각각에 해당하는 코드워드 번호 $\alpha(b,k)$, $\alpha(\hat{b},k)$ 를 자신이 속한 기지국에 전송함으로써 자신의 채널방향정보를 제공한다. 또한 사용자는 기지국에 신호 대 잡음 및 간섭비를 자신의 채널품질정보로 보낸다. b 번째 셀에 속한 사용자 k 의 신호 대 잡음 및 간섭비는 다음과 같다.

$$\text{SINR}_{b,k} = \frac{\rho \|\mathbf{h}_{b,k}\|^2 |\tilde{\mathbf{h}}_{b,k} \mathbf{w}_{b,k}|^2}{\left(1 + \rho \|\mathbf{h}_{b,k}\|^2 \sum_{j \in S_1, j \neq k} |\tilde{\mathbf{h}}_{b,k} \mathbf{w}_{b,j}|^2 + \rho \sum_{\hat{b} \in B, \hat{b} \neq b} \|\mathbf{h}'_{\hat{b},k}\|^2 \sum_{l \in S_{\hat{b}}} |\tilde{\mathbf{h}}'_{\hat{b},k} \mathbf{w}'_{\hat{b},l}|^2 \right)} \quad (6)$$

여기서 분모의 $\rho \|\mathbf{h}_{b,k}\|^2 \sum_{j \in S_1, j \neq k} |\tilde{\mathbf{h}}_{b,k} \mathbf{w}_{b,j}|^2$ 는 사용자 간 간섭을 나타내고, $\rho \sum_{\hat{b} \in B, \hat{b} \neq b} \|\mathbf{h}'_{\hat{b},k}\|^2 \sum_{l \in S_{\hat{b}}} |\tilde{\mathbf{h}}'_{\hat{b},k} \mathbf{w}'_{\hat{b},l}|^2$ 는

인접 셀 간섭을 나타낸다.

홈 기지국에서 i 번째 전처리 행렬 $\mathbf{W}_\eta^{(i)}$ 을 이용하여 직교 빔형성을 수행할 때, 사용자 k 에 해당하는 전송 가중치 벡터는 $\mathbf{w}_{b,k} = \hat{\mathbf{h}}_{b,k}^H$ 이고, 전처리 행렬에 대한 영공간의 랭크가 $\eta = 1$ 인 경우를 고려하면, 최대로 선택된 사용자 수는 $|\mathcal{S}_b| = N_t - 1$ 이 된다. 홈 기지국에 대한 채널과 인접 기지국에 대한 채널의 방향벡터는 양자화 벡터를 이용하여 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{h}}_{b,k} &= (\cos \theta_{b,k}) \hat{\mathbf{h}}_{b,k} + (\sin \theta_{b,k}) \mathbf{g}_{b,k} \\ \tilde{\mathbf{h}}'_{b,k} &= (\cos \theta_{b,k}) \hat{\mathbf{h}}'_{b,k} + (\sin \theta_{b,k}) \mathbf{g}'_{b,k} \end{aligned} \quad (7)$$

식 (7)과 같이 두 채널의 방향벡터 $\tilde{\mathbf{h}}_{b,k}$, $\tilde{\mathbf{h}}'_{b,k}$ 를 각각의 양자화된 채널벡터 $\hat{\mathbf{h}}_{b,k}$ 와 $\hat{\mathbf{h}}'_{b,k}$ 에 직교하는 벡터 $\mathbf{g}_{b,k}$, $\mathbf{g}'_{b,k}$ 의 합으로 표현 가능하다. 두 기지국 사이에 협력이 완벽하게 이루어진다는 가정하면, b 번째 셀에 속한 사용자 k 의 양자화 된 간섭채널의 방향 벡터 $\hat{\mathbf{h}}'_{b,k}$ 와 인접한 기지국 \hat{b} 에서 사용하는 전송 가중치 벡터 $\mathbf{w}'_{b,l}$ 가 서로 직교함으로써 두 벡터의 내적이 $\hat{\mathbf{h}}'_{b,k} \mathbf{w}'_{b,l} = 0$, $l \in \mathcal{S}_{\hat{b}}$ 이 되기 때문에, 인접 셀 간 간섭이 줄어든다. 두 기지국 사이에 협력이 완벽하게 이루어진다는 가정 하에, 식 (7)을 이용하여 식 (6)을 정리하면 다음과 같다.

$$\text{SINR}_{b,k} = \frac{\rho \|\mathbf{h}_{b,k}\|^2 \cos^2 \theta_{b,k}}{\left(1 + \rho \|\mathbf{h}_{b,k}\|^2 \sin^2 \theta_{b,k} \sum_{j \in \mathcal{S}_b, j \neq k} |\mathbf{g}_{b,k} \mathbf{w}_{b,j}|^2 \right) + \rho \sum_{\hat{b} \in \mathcal{B}, \hat{b} \neq b} \|\mathbf{h}'_{\hat{b},k}\|^2 \sin^2 \theta_{\hat{b},k} \sum_{l \in \mathcal{S}_{\hat{b}}} |\mathbf{g}'_{\hat{b},k} \mathbf{w}'_{\hat{b},l}|^2 } \quad (8)$$

b 번째 셀에 속한 사용자 k 가 홈 기지국 채널의 방향에 대한 채널방향정보로서 코드북 \mathbf{F} 내의 코드워드 $\mathbf{v}_{\alpha(b,k)}$ 를 기지국 b 에 되먹임 할 경우, $\mathbf{v}_{\alpha(b,k)}$ 를 포함한 $(N_t - 1)$ 개의 전처리 행렬 $\mathbf{W}_1^{(\alpha(b,k))}$ 으로부터 서비스 받을 수 있기 때문에, 다른 사용자에게 해당하는 전송 가중치 벡터 $\mathbf{w}_{b,j}$ 를

알 수 없다. 단, 다른 사용자에게 해당하는 전처리 가중치 벡터 $\mathbf{w}_{b,j}$ 와 자신의 양자화 된 채널 $\mathbf{v}_{\alpha(b,k)}$ 에 직교하는 벡터 $\mathbf{g}_{b,k}$ 는 되먹임 한 코드워드 $\mathbf{v}_{\alpha(b,k)}$ 과 수직인 공간 $(N_t - 1)$ 차원 내에 있으므로 $\beta(1, N_t - 2)$ 의 베타분포를 따를 수 있다. 반면에 인접 기지국 채널의 방향 $\hat{\mathbf{h}}'_{\hat{b},k}$ 에 대한 채널 방향정보로서 코드북 \mathbf{N} 내의 코드워드 $\mathbf{u}_{\alpha(\hat{b},k)}$ 를 되먹임 할 경우, $\mathbf{u}_{\alpha(\hat{b},k)}$ 를 포함한 단 하나의 전처리 행렬 $\mathbf{w}_1^{(\alpha(\hat{b},k))}$ 에 대하여 기지국 \hat{b} 로부터 오직 한 가지 협력전송만을 받을 수 있으므로 인접 기지국에서 사용하는 전송 가중치 벡터 $\mathbf{w}'_{\hat{b},l}$ 를 알 수 있다. 그러므로 식 (8)에 대한 평균적 신호 대 잡음 및 간섭비의 하한값 $\gamma_{b,k}$ 은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} &\mathbb{E}[\text{SINR}_{b,k}] \\ &\geq \frac{\rho \|\mathbf{h}_{b,k}\|^2 \cos^2 \theta_{b,k}}{\left(1 + \rho \sum_{\hat{b} \in \mathcal{B}, \hat{b} \neq b} \|\mathbf{h}'_{\hat{b},k}\|^2 \sin^2 \theta_{\hat{b},k} \right) + \rho \|\mathbf{h}_{b,k}\|^2 \sin^2 \theta_{b,k} \mathbb{E} \left[\sum_{j \in \mathcal{S}_b, j \neq k} \beta(1, N_t - 2) \right]} \quad (9) \\ &= \frac{\rho \|\mathbf{h}_{b,k}\|^2 \cos^2 \theta_{b,k}}{\left(1 + \rho \sum_{\hat{b} \in \mathcal{B}, \hat{b} \neq b} \|\mathbf{h}'_{\hat{b},k}\|^2 \sin^2 \theta_{\hat{b},k} \right) + \rho \|\mathbf{h}_{b,k}\|^2 \sin^2 \theta_{b,k} \left(\frac{N_t - 2}{N_t - 1} \right)} \equiv \gamma_{b,k} \end{aligned}$$

식 (9)에서 Jensen's Inequality에 의해 하한값을 얻을 수 있고, 베타분포 $\beta(1, N_t - 2)$ 의 평균값 $1/(N_t - 1)$ 과 기지국 b 가 사용하는 $(N_t - 1)$ 개의 전송 가중치 벡터 중에서 자신에게 해당하는 전송 가중치 벡터를 제외한 $(N_t - 2)$ 개의 전송 가중치 벡터가 발생시키는 사용자간 간섭에 대하여 $(N_t - 2)/(N_t - 1)$ 의 평균값을 얻을 수 있다. 사용자는 식 (9)에서 구한 평균적 신호 대 잡음 및 간섭비의 하한값 $\gamma_{b,k}$ 를 기지국에 전송함으로써 채널품질정보를 제공한다.

3.2 협력적 스케줄링 및 빔형성 기법

기지국들은 협력적 스케줄링 및 협력적 빔형성 기법을 위해 동일한 코드북 \mathbf{F} 와 \mathbf{N} 을 가지고 있고, 유선의 백홀을 통해 사용자들의 채널방향정보와 채널품질정보를 완벽하게 교환한다고 가정한다. 세 개의 기지국 b, \hat{b}, \tilde{b} 에서 각각 m 번째 전처리 행렬 $\mathbf{W}_\eta^{(m)}$, n 번째 전처리 행렬 $\mathbf{W}_\eta^{(n)}$, l 번째 전처리 행렬 $\mathbf{W}_\eta^{(l)}$ 으로 서비스할 경우, 기지국 b 는 $\mathbf{W}_\eta^{(m)}$ 내의 벡터 $\mathbf{v}_i^{(m)}$ 에 대하여 다음과 같은 사용자 집합을 구성한다.

$$\mathcal{I}_i^{(b,m,n,l)} = \left\{ \mathbf{k} \begin{cases} \hat{\mathbf{h}}_{b,k} = \mathbf{v}_i^{(m)}, \\ \hat{\mathbf{h}}_{\hat{b},k}^l = \{\mathbf{u}_{n-\eta+1}, \dots, \mathbf{u}_n\}, \\ \hat{\mathbf{h}}_{\tilde{b},k}^l = \{\mathbf{u}_{l-\eta+1}, \dots, \mathbf{u}_l\} \end{cases} \right\}, \quad (10)$$

$(1 \leq i \leq N_t - \eta)$

식 (10)에서 정의된 사용자 집합은 코드북 \mathbf{F} 내의 코드워드 $\mathbf{v}_i^{(m)}$ 를 되먹임하고, 기지국 \hat{b} 에 대하여 코드북 \mathbf{N} 내의 코드워드 $\mathbf{u}_{n-\eta+1}, \dots, \mathbf{u}_n$ 중 하나를 되먹임하고, 기지국 \tilde{b} 에 대하여 코드북 \mathbf{N} 내의 코드워드 $\mathbf{u}_{l-\eta+1}, \dots, \mathbf{u}_l$ 중 하나를 되먹임한 사용자들의 집합을 의미한다. $\mathcal{I}_i^{(b,m,n,l)}$ 에 속한 사용자들 중에서 최대 $\gamma_{b,k}$ 를 갖는 사용자에게 $\mathbf{v}_i^{(m)}$

을 할당함으로써 $\mathbf{W}_\eta^{(m)}$ 에 대하여 다음과 같은 선택된 사용자 집합을 구성한다.

$$\mathcal{S}^{(b,m,n,l)} = \left\{ \mathbf{k} \begin{cases} \mathbf{k} = \arg \max_{j \in \mathcal{I}_i^{(b,m,n,l)}} \gamma_{b,j}, \\ 1 \leq i \leq N_t - \eta \end{cases} \right\} \quad (11)$$

식 (11)과 같이 m 번째 전처리 행렬 $\mathbf{W}_\eta^{(m)}$ 으로 서비스 받는 선택된 사용자 집합 $\mathcal{S}^{(b,m,n,l)}$ 에 대하여 다음과 같은 전송률을 정의할 수 있다.

$$\mathbf{R}^{(b,m,n,l)} = \sum_{\mathbf{k} \in \mathcal{S}^{(b,m,n,l)}} \log_2(1 + \gamma_{b,k}) \quad (12)$$

위 과정과 동일하게, 기지국 \hat{b} 과 \tilde{b} 는 각각 n 번째 전처리 행렬 $\mathbf{W}_\eta^{(n)}$ 과 l 번째 전처리 행렬 $\mathbf{W}_\eta^{(l)}$ 을 사용할 경우에 대한 전송률 $\mathbf{R}^{(\hat{b},m,n,l)}$ 과 $\mathbf{R}^{(\tilde{b},m,n,l)}$ 을 얻을 수 있다. 그림 4는 기지국의 안테나 수가 3 일 때, 세 기지국에서 각각 전처리 행렬 $\mathbf{W}_\eta^{(m)}$, $\mathbf{W}_\eta^{(n)}$, $\mathbf{W}_\eta^{(l)}$ 으로 서비스할 경우의 협력적 스케줄링 및 협력적 빔형성 기법을 나타낸다.

협력적 스케줄링 및 빔형성 기법을 통해 전체 시스템의 전체 전송률을 최대화할 수 있는 최적의 전처리 행렬 조합 (m^*, n^*, l^*)를 다음과 같이 얻는다.

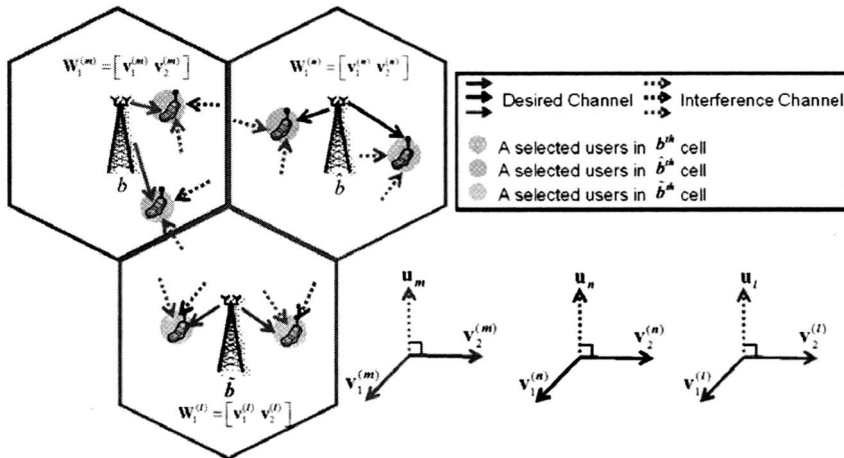


그림 4. $N_t = 3, \eta = 1$ 일 때, 두 기지국 사이의 협력적 스케줄링 및 빔형성 기법

$$(m^*, n^*, l^*) = \arg \max_{1 \leq m, n, l \leq 2^B} \left\{ R^{(b, m, n, l)} + R^{(\hat{b}, m, n, l)} + R^{(\check{b}, m, n, l)} \right\} \quad (13)$$


식 (13)를 통해 각 기지국의 전송률의 합을 최대화할 수 있는 전처리 행렬 조합 (m^*, n^*, l^*) 을 찾았으므로 전체 시스템의 전체 전송률을 최대화한다.

IV. 순환적 코드북 기반 협력적 스케줄링 및 빔형성 기법의 성능 검증

4.1 실험 환경 및 파라미터

제안하는 코드북 기반의 협력적 스케줄링 및 협력적 빔형성 기법의 성능을 검증하기 위해, 표 1의 실험 환경 및 파라미터를 사용하였다. 섹터 당 10명의 사용자는 정규화 된 셀 반경 1에 대하여 기지국과의 거리 0.7을 기준으로 안쪽 사용자와 바깥쪽 사용자를 구분하였다. 실험은 기지국 안테나 수 $N_t = 4$ 를 사용한다. 코드북에 사용되는 Bit 수가

표 1. 시뮬레이션 파라미터

Channel Model	Rayleigh Channel + Path Loss	
Path Loss Exponent	4	
Cell Structure	Hexagonal, 3CellSites, 3Sectors/Cell	
Min Distance Between BS And MS	50m	
Cell Radius	500m	
BS Tx Power	46dBm	
MS Noise Power	-174dBm	
Number Of BS Tx Antennas	4	
Number Of MS Rx Antennas	1	
Number Of MS Per Sector	10 Active Users Per Sector (Uniform Distribution)	
	Inner : 5	Outer : 5
Scheduling	Proportional Fair, Scheduling Period =2000Frame	

$B = 2$ 인 경우, 임의의 직교행렬을 사용하면 제안하는 코드북의 특성을 만족한다. $B = 3$ 인 경우는 다음과 같은 코드북 \mathbf{F} 와 \mathbf{N} 을 사용한다.

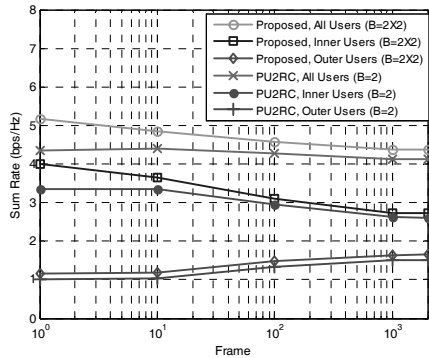
$$\mathbf{F} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & 0 & -1 \end{bmatrix}, \quad (14)$$

$$\mathbf{N} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & -1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -1 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & 0 & -\frac{1}{\sqrt{2}} & 1 \\ 1 & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & 0 & \frac{1}{\sqrt{2}} & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix}$$

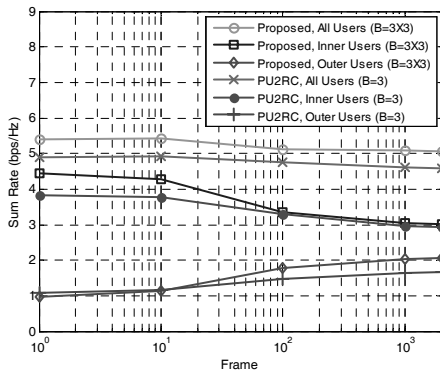
4.2 실험 결과

제안하는 기법과의 성능 비교를 위한 참조 시스템은 Per User Unitary Rate Control (PU2RC) [1]를 사용하고, 성능은 비례적 공정 스케줄링 [2]에 대한 섹터 당 전송률로 확인한다. 세 개의 셀이 위치한 환경을 고려하였을 때, PU2RC에서 사용자는 홈 기지국에 대한 채널방향정보에 대하여 B Bit의 되먹임을 하고, 제안하는 기법에서 사용자는 협력적 스케줄링 및 협력적 전송을 위해 홈 기지국에 대한 채널방향정보에 대하여 B Bit의 되먹임과 두 인접 기지국에 대한 채널방향정보에 대하여 각 B Bit씩 되먹임을 수행한다. 제안하는 기법이 추가적인 되먹임으로 인해 얻을 수 있는 성능의 분석을 위해 B Bit를 사용하는 PU2RC를 비교한다.

그림 5는 전처리 행렬의 영공간 랭크가 $\eta = 1$ 인 직교 빔형성 기법을 사용하는 제안하는 기법과 PU2RC에 대하여 비례적 공정 스케줄링의 2000 시간 프레임에 대한 전송률 비교를 나타낸다. 그림 5에서 제안하는 기법은 하나의 홈 기지국에 대한 채널과 2개의 인접 기지국에 대한 채널에 대하여 (a) $B = 2$, (b) $B = 3$ Bit씩, 총 (a) 8, (b) 9 Bit의 되먹임을 사용하고, PU2RC는 홈 기지국에 대한 채널에 대해서만 (a) $B = 2$, (b) $B = 3$ Bit를 사용한다. 두 기법 모두 2000 Frame에서 안쪽 및 바깥



(a)

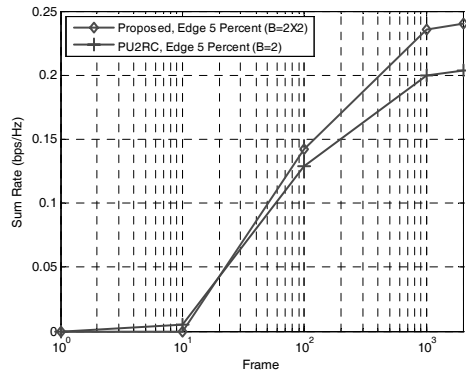


(b)

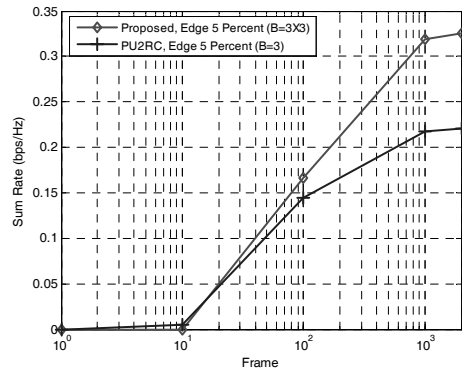
그림 5. 제안하는 기법과 PU2RC의 비례적 공정 스케줄링 성능 비교 (a) B=2, (b) B=3

쪽 사용자의 전송률이 수렴하는 것을 알 수 있다. 제안하는 기법과 B=2 Bit의 PU2RC를 비교하였을 때, 안쪽 사용자와 바깥쪽 사용자의 전송률이 증가하는 것을 알 수 있다. 특히, 제안하는 기법과 B=3 Bit의 PU2RC를 비교하였을 때, 안쪽 사용자의 전송률은 2.69%, 바깥쪽 사용자의 전송률은 23.84%, 전체 사용자의 전송률은 10.34% 향상된다. 제안하는 기법은 B=3 Bit의 PU2RC에 비하여 간섭 채널에 대한 추가적인 채널방향정보가 주어지고, 이를 이용하여 모든 사용자에게 협력적 스케줄링 및 협력적 전송을 수행함으로써 인접 셀 간 간섭의 영향을 줄이기 때문에 외곽뿐만 아니라 안쪽 사용자에게 대한 Sum Rate 또한 향상된다.

제안하는 협력적 스케줄링 및 협력적 전송기법은 인접 셀 간 간섭의 영향이 큰 외곽 사용자의 성능 향상을 목적으로 하고 있으므로, 이를 정확히 확인하기 위해 외곽 5 percent의 성능을 갖는 사용자에게 대한 성능비교를 하였고, 이는 그림 6에서 확인할 수 있다. 그림 6을 통해 제안하는 기법과 B=2, 3



(a)



(b)

그림 6. 외곽 5 percent의 사용자에게 대한 성능 비교 (a) B=2, (b) B=3

Bit의 PU2RC를 비교하였을 때, 18.11%와 47.09%의 성능 향상을 나타내는 것을 알 수 있다. 이는 제안하는 기법이 외곽 사용자의 QoS 보장에 유효함을 의미하고, 피드백 비트수가 늘어남에 따라 외곽 사용자의 QoS 향상이 증가함을 의미한다.

V. 결론

본 연구에서는 다중 셀 환경에서 외곽 사용자의 성능저하를 유발하는 인접 셀 간 간섭의 영향을 극복하기 위한 제한적 피드백 기반의 협력적 스케줄링 및 협력적 빔형성 기법을 제안하였다. 제안하는 협력적 스케줄링 및 협력적 빔형성 기법을 위한 코드북 설계를 통해 전처리 행렬의 영공간의 효율적 확보가 가능하고, 이에 따른 제한적 피드백으로 인해 발생하는 양자화 오류를 고려한 신호 대 잡음 및 간섭비의 하한값을 수학적으로 제시함으로써 협력적 스케줄링 및 협력적 빔형성 기법에 대한 알고리즘을 제시하였다. 기존 단일 셀 관점의 빔형성 기

법과 비교하였을 때, 제안하는 협력적 스케줄링 및 협력적 빔형성 기법을 통해 셀 간 간섭의 영향이 크게 작용하는 셀 외곽 지역에서의 성능이 향상되고, 실험 결과를 통하여 알 수 있듯이 제한하는 협력적 스케줄링 및 협력적 빔형성 기법은 비례적 공정 스케줄링에 대하여 외곽 사용자의 QoS를 효과적으로 보장할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] P. Viswanath and D. Tse, "Sum capacity of the vector Gaussian broadcast channel and uplink-downlink duality," *IEEE Trans. Inform. Theory*, Vol.49, No.8, pp.1912-1921, Aug., 2003.
- [2] T. Yoo and A. Goldsmith, "On the optimality of multiantenna broadcast scheduling using zero-forcing beamforming," *IEEE J. Selected Areas Commun.*, Vol.24, No.3, pp.528-541, Mar., 2006.
- [3] K. Huang, J. G. Andrews, and R. W. Heath, "Performance of Orthogonal Beamforming for SDMA with limited feedback," *IEEE Trans. Vehicular Technology*, Vol.58, No.1, pp.152-164, Jan., 2009.
- [4] J. G. Andrews, "Interference cancellation for cellular systems: A contemporary overview," *IEEE Wireless Commun. Mag.*, Vol.12, No.2, pp.19-29, Apr., 2005.
- [5] LG Electronics, "Network MIMO in LTE-Advanced," *RI-082942*, 3GPP TSG RAN WG1 Meeting #54, 2008.
- [6] D. Gesbert et al., "Multi-cell MIMO cooperative networks: A new look at interference," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, Vol.28, No.9, pp.1380-1408, Dec., 2010.
- [7] M. K. Karakayali, G. J. Foschini, and R. A. Valenzuela, "Network coordination for spectrally efficient communications in cellular systems," *IEEE Wireless Commun.*, Vol.13, No.4, pp.56-61, Aug., 2006.
- [8] H. Zhang and H. Dai, "Cochannel interference mitigation and cooperative processing in downlink multicell multiuser MIMO networks," *EURASIP J. Wireless Commun. and Networking*, Vol.2004, No.2, pp.222-235, Dec., 2004.

- [9] Samsung Electronics, "Inter-cell interference mitigation through limited coordination," *RI-082886*, 3GPP TSG RAN WG1 Meeting # 54, 2008.

김 성 현 (Seonghyun Kim)

정회원



He received his B.S. in E.E. from Yonsei University in 2009. He is pursuing an M.S. and Ph.D. in the wireless network laboratory at Yonsei University. His research interests are in the areas of multiuser MIMO systems, interference management, and cooperative communications.

이 상 훈 (Sanghonn Lee)

중신회원



He received the B.S. in E.E. from Yonsei University in 1989 and the M.S. in E.E. from Korea Advanced Institute of Science and Technology (KAIST) in 1991. From 1991 to 1996, he worked for Korea

Telecom. He received his Ph.D. in E.E. from the University of Texas at Austin in 2000. In June - Aug. 1999, he worked for Bell-Lab., Lucent Technologies on wireless multimedia communications. From Feb. 2000 to Dec. 2002, he worked on developing real-time embedded software and communication protocols for 3G wireless networks, Lucent Technologies. In March 2003, he joined the faculty of the Department of Electrical and Electronics Engineering, Yonsei University, Seoul, Korea, where he is an Associate Professor. He is an associate editor of the *IEEE Trans. Image Processing* and an editor of the *JOURNAL of COMMUNICATIONS and NETWORKS (JCN)*. Currently, he is a chair of the IEEE standard working group for 3D quality assessment. His research interests include image/video quality assessments, wireless multimedia communications, multihop sensor networks, and 4G wireless networks.