

순방향 셀 간 간섭 억제를 위한 충돌 회피 빔성형 기법

Collision Avoidance Beamforming for Mitigating Inter-cell Interference in Cooperative Wireless Communication Systems

문 철 · 정 창 규

Cheol Mun · Chang-Kyoo Jung

요 약

본 논문에서는 협력 무선 통신 시스템의 순방향 링크에서 각 이동국의 제한된 피드백 정보를 이용하여, 인접한 기지국들에서 동시에 전송되는 빔성형된 순방향 링크들 간의 간섭을 효과적으로 억제하는 충돌 회피 빔성형 기술을 제안한다. 제안하는 충돌 회피 빔성형 기술에서, 각 이동국은 서비스 기지국이 신호 전송을 위해 사용할 신호 가중치 벡터와 간섭 기지국이 해당 이동국에게 최대 간섭을 주는 주 간섭 가중치 벡터들에 대한 정보를 피드백한다. 또한, 클러스터 스케줄러는 각 기지국에서 사용하는 가중치들에 의해 성형되는 빔들 간의 충돌을 억제하도록, 동시에 데이터를 전송할 이동국들과 해당 이동국들이 사용할 빔성형 가중치들을 동시에 결정한다. 시뮬레이션을 통해 제안하는 충돌 회피 빔성형 기술이 기존의 기지국별로 빔성형을 수행하는 비 협력 빔성형 기술보다 높은 시스템 전송 용량을 제공할 수 있음을 보인다. 또한, 협력 공간 분할 다중 접속 기술과의 전송 용량을 비교하여, 제안하는 충돌 회피 빔성형 기술과의 장단점을 비교 분석한다.

Abstract

In this paper, collision avoidance beamforming(CA-BF) technology is proposed to mitigate inter-cell interference in cooperative wireless communications system with limited feedback. Each access terminal(AT) selects both the best BF weight vector for a serving base transceiver station(BTS) and the most interfering BF weight vectors of interfering BTSs within a cluster, and sends it back to a cluster scheduler. At the cluster scheduler, a set of transmit BF weights of BTSs and the corresponding scheduled ATs are jointly determined to avoid collision among beams formed by BTSs within a cluster, which enhances system throughput by mitigating inter-cell interference. It is shown that the proposed CA-BF outperforms existing non-coordinated BF schemes in terms of the average system throughput.

Key words : Network MIMO, Coordinated BF, Collision Avoidance BF, Limited Feedback

I. 서 론

무선 데이터 트래픽의 급증에 대응하기 위해 무선 통신 시스템의 전송 용량을 개선하기 위한 다양한 통신 기술들이 개발되고 있다. 최근 long term evo-

lution(LTE)와 mobile WiMAX에서는 multiple-input multiple-output(MIMO)와 orthogonal frequency division multiple access(OFDMA) 기술을 사용하여 단일 셀에서의 전송 용량을 개선시키고 있다. 특히, MIMO 기술에서는 제한된 피드백 정보량을 이용하는 space

「이 연구는 삼성전자 지원과 2012년도 한국교통대학교 교내학술연구비의 지원을 받아 수행한 연구임.」

국립한국교통대학교 정보통신공학과(Department of Information and Communications Eng., Korea National University of Transportation)

· Manuscript received July 25, 2012 ; Revised August 29, 2012 ; Accepted September 4, 2012. (ID No. 20120725-089)

· Corresponding Author : Chang-Kyoo Jung (e-mail : ckjung@ut.ac.kr)

division multiple access(SDMA) 기술이 핵심 MIMO 기술로써 개발되었다. 그러나, 다중 셀 네트워크의 전송 용량의 관점에서, MIMO와 OFDMA 기술은 다중 셀 네트워크의 이론적인 전송 용량에 근접하지 못하는 데, 이는 주로 셀 간 간섭(Inter-Cell Interference: ICI) 때문이다. ICI를 억제하기 위해서는, 인접하는 BTS (Base Transceiver Station)간 coordination을 통해 셀 간 간섭을 억제하는 기술이 필요하다^{[1],[2]}. 개념적으로 SDMA와 같은 단일 셀 MIMO 기술을 다수의 셀 확장하는 기술이 필요하다^{[3],[4]}.

최근 LTE-Advanced에서는 다수의 셀로 확장된 SDMA 기술, 즉 coordinated multi-point(COMP)에 대한 표준화를 진행하고 있다^[5]. 하향 링크 COMP는 협력 스케줄링/빔성형(coordinated scheduling/beamforming) 기술과 결합 전송(joint transmission) 기술로 나뉜다. 협력 스케줄링 기술에서 각 AT의 데이터는 serving cell에서만 전송되고 셀간 간섭을 억제하도록 스케줄링과 빔성형이 셀간 협력을 통해서 수행된다. 결합 전송 기술은 한 AT의 데이터가 다수의 셀에서 동시에 전송되는 기술이다. 현재까지, 하향 링크 COMP에서의 빔성형 기술은 주로 결합 전송에 대한 연구가 주로 진행되었다^{[6]~[8]}. 결합 전송에 의한 COMP 빔성형은 다수의 셀에서 사용할 결합 가중치 결정에 의해, 상당한 셀 간 채널 정보 교환이 필요하고 연산이 복잡하다.

협력 스케줄링에 기반한 빔성형 기술은 주로 coordinated beam selection과 스케줄링 기술에 대한 연구가 주로 진행되었다^{[9],[10]}. 그러나 실제 시스템에서 적용될 수 있는 구체적인 피드백 내용과 그에 따른 협력 스케줄링 기법은 제안되지 않았다.

한편, 협력 스케줄링을 통해 셀 간 간섭을 억제하는 다수의 셀에 대한 협력 SDMA 기술이 제안되었다^[11]. 협력 SDMA 기술은 각 셀에서 다수의 AT들에게 동시에 데이터를 전송하기 때문에, 데이터 전송을 요구하는 AT의 수가 충분치 않을 경우, 다중 사용자 다이버시티 이득에 의한 용량 개선을 기대할 수 없게 된다. 따라서, 다중 사용자 다이버시티 차수가 낮은 경우에도 다중 사용자 다이버시티 이득에 의한 용량 개선을 이룰 수 있는 빔성형 기반 협력 스케줄링 기술이 필요하다.

본 논문에서는 제한된 피드백 정보량을 사용하는

협력 무선 통신 시스템에서, 인접한 BTS들에서 동시에 전송되는 빔성형된 순방향 링크들 간의 간섭을 효과적으로 억제하는 충돌 회피 빔성형(collission avoidance beamforming: CA-BF) 기술을 제안한다. 특히, 효율적인 협력 스케줄링/빔성형을 위해 각 AT의 제한된 피드백을 통해 전달되어야 할 구체적인 피드백 내용과 그에 따른 협력 스케줄링 기술을 제안한다. 제안하는 CA-BF은 각 AT의 제한된 피드백 정보를 이용하여, 전달된 서비스 BTS가 신호 전송을 위해 사용하는 신호 가중치 벡터와 간섭 BTS가 해당 AT에게 최대 간섭을 주는 주 간섭 가중치 벡터들에 대한 정보를 이용하여, 각 BTS에서 사용하는 가중치들에 의해 성형되는 빔들간의 충돌을 억제하도록, 동시에 데이터를 전송할 AT들과 해당 AT들이 사용할 빔성형 가중치들을 동시에 결정함으로써, 시스템 전송 용량을 향상시킬 수 있다. 시뮬레이션을 통해 제안하는 CA-BF이 기존의 BTS별로 빔성형을 수행하는 비 협력 빔성형 기술보다 높은 시스템 전송 용량을 제공할 수 있음을 보인다. 또한, 협력 SDMA 기술과의 시스템 전송 용량을 비교하여, 제안하는 CA-BF과의 장단점을 비교 분석한다.

II. 시스템 모델

각 BTS는 n_T 개의 송신 안테나를 사용하고, 모든 AT는 n_R 수신 안테나를 사용하며, 각 BTS별로 K 사용자들이 분포하는 셀룰러 네트워크의 순방향 링크를 고려한다. 각 BTS는 순방향 링크 빔성형을 통해 하나의 AT에 데이터를 전송한다. 인접한 세 개의 BTS들이 backhaul 링크를 통해 하나의 클러스터(cluster)를 구성하고, 동일 클러스터 내의 coordinated BTS(C-BTS)들 간에 제한된 양의 정보를 서로 교환하고, 이를 이용하여 클러스터 내의 타 셀간 간섭을 최소화하기 위한 협동 빔성형(coordinated BF)을 수행한다. 본 논문에서는 설명을 위해 세 개의 C-BTS로 이루어진 클러스터를 고려하지만, 임의의 개수의 C-BTS를 포함하는 클러스터로 확장이 가능하다.

주파수 비선택적 페이딩을 가정하면, 한 클러스터의 세 개의 C-BTS는 각각 n_T 개의 송신 안테나들로부터 동시에 세 개의 신호 $\{x_m\}_{m=a,b,c}$ 를 송신할 때, k 번째 AT가 a serving BTS로부터 수신하는 $n_R \times 1$

신호 벡터 $\mathbf{y}_{k,a}$ 는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \mathbf{y}_{k,a} &= \sqrt{\gamma_{k,a}} \mathbf{H}_{k,a} \mathbf{f}_a x_a + \sum_{i=b,c} \sqrt{\gamma_{k,i}} \mathbf{H}_{k,i} \mathbf{f}_i x_i + \mathbf{n}_k \\ &= \sqrt{\gamma_{k,a}} [\mathbf{H}_{k,a} \mathbf{f}_a \sqrt{\alpha_b} \mathbf{H}_{k,b} \mathbf{f}_b \sqrt{\alpha_c} \mathbf{H}_{k,c} \mathbf{f}_c] \mathbf{x} + \mathbf{n}_k \\ &= \sqrt{\gamma_{k,a}} \mathbf{C}_{k,a} (\mathbf{f}_a \mathbf{f}_b \mathbf{f}_c) \mathbf{x} + \mathbf{n}_k \end{aligned} \quad (1)$$

여기서, $\gamma_{k,a}$ 는 k 번째 수신기가 a serving BTS로부터 수신한 평균 signal-to-noise ratio(SNR)을, $\gamma_{k,b}$ 와 $\gamma_{k,c}$ 는 k 번째 수신기가 간섭 BTS b 와 c 로부터 수신한 평균 SNR을, $\mathbf{H}_{k,a}$ 은 k 번째 수신기가 serving BTS로부터 수신한 $n_R \times n_T$ 복소 채널 행렬을, $\mathbf{H}_{k,b}$ 와 $\mathbf{H}_{k,c}$ 은 간섭 BTS b 와 c 로부터 수신한 $n_R \times n_T$ 복소 채널 행렬을, \mathbf{n}_k 는 $n_R \times 1$ additive white Gaussian noise 벡터를, \mathbf{f}_m 은 m 번째 BTS에서 사용하는 $n_T \times 1$ 빔성형 가중치 벡터를, 그리고 $\mathbf{x} = [x_a x_b x_c]^T$ 를 각각 나타낸다.

특히, $\mathbf{C}_{k,a}(\mathbf{f}_a \mathbf{f}_b \mathbf{f}_c)$ 는 클러스터에 속한 세 개의 C-BTS가 $\{\mathbf{f}_m\}_{m=a,b,c}$ 가중치에 의해 빔성형을 했을 때, a BTS를 serving BTS로 하는 k 번째 AT에서 수신되는 $n_R \times 3$ 크기의 등가 순방향 링크 채널 행렬을 나타낸다.

식 (1)은 세 개의 C-BTS로 구성된 클러스터로부터 a BTS에 속하는 k 번째 AT가 수신하는 signal-to-interference-plus-noise ratio(SINR)을 최대화하기 위해서는 serving BTS와 두 개의 간섭 BTS들이 사용하는 가중치 $\{\mathbf{f}_m\}_{m=a,b,c}$ 을 동시에 결정해야 함을 보여준다. 이와 같이 클러스터 내에서 동시에 전송되는 순방향 링크들의 수신 SINR을 최대 하도록 각 C-BTS에서 사용할 가중치를 동시에 결정하게 되면, serving BTS의 빔성형에 의한 이득은 증가시키는 동시에 간섭 BTS의 빔성형에 의한 타 셀 간섭을 최소화 하는 최적의 가중치 조합을 결정할 수 있다. 이를 위해서, G 개의 벡터로 이루어진 가중치 codebook을 사용할 경우, 3개의 C-BTS로 구성된 클러스터에서 고려해야할 가중치 조합의 수가 G^3 으로 상당히 크다. 따라서, 각 AT에서 각 가중치 조합에 대한 수신 가능 SINR 정보, 즉 CQI(Channel Quality Information) 정보를 클러스터 스케줄러로 피드백하기 위해서는 많은 피드백 정보량이 요구되므로, 스케줄러에서 적은 피드백 정보량을 이용하여 최적의 가중치 조합을

결정할 수 있도록 하기 위한, 피드백 정보 형태와 그에 따른 스케줄링 방법이 필요하다.

III. 충돌 회피 빔성형을 위한 제한된 피드백

제안하는 제한된 피드백을 사용하는 CA-BF을 위해 각 AT는 신호 가중치 벡터와 주 간섭 가중치 벡터를 결정하고 이를 피드백한다. k 번째 AT는 serving BTS로부터의 하향 링크 이득을 최대로 하는 신호 가중치 벡터 $\mathbf{f}_{k,a}$ 와 클러스터 내의 간섭 BTS에서 k 번째 AT로의 하향 링크 이득을 최대로 하는, 즉 간섭 BTS가 k 번째 AT에게 최대 간섭을 발생시키는 주 간섭 가중치 벡터 $\{\mathbf{d}_{k,i}\}_{i=b,c}$ 를 선택하고, 이를 클러스터 스케줄러로 피드백한다. 클러스터 스케줄러에서는 각 AT의 신호 가중치 벡터와 주 간섭 가중치 벡터 정보를 이용하여, 데이터를 전송할 AT는 해당 AT의 신호 가중치 벡터를 사용하는 동시에 간섭 BTS에서는 해당 AT의 주 간섭 가중치 벡터를 사용하지 않도록 충돌 회피 스케줄링을 수행한다.

G 개의 가중치 벡터들로 구성된 가중치 벡터 codebook $F = \{\mathbf{w}_1, \mathbf{w}_2, \dots, \mathbf{w}_G\}$ 를 사용한다고 가정하면, k 번째 AT를 위한 주 신호 가중치 벡터 $\mathbf{f}_{k,a}$ 와 주 간섭 가중치 벡터 $\{\mathbf{d}_{k,i}\}_{i=b,c}$ 를 다음 식 (2)와 같이 구한다.

$$\begin{aligned} \mathbf{f}_{k,a} &= \arg \max_{\mathbf{w}_l \in F} \|\mathbf{H}_{k,a} \mathbf{w}_l\|^2 \\ \mathbf{d}_{k,i} &= \arg \max_{\mathbf{w}_l \in F} \|\mathbf{H}_{k,i} \mathbf{w}_l\|^2, \quad i = b, c \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, $\{\mathbf{w}_l\}_{l=1, \dots, G}$ 은 가중치 벡터 codebook F 에 속한 G 개의 빔성형 가중치 벡터들이다. 따라서, 식 (2)는 F 에 속한 G 개의 가중치들 중에서, AT의 serving BTS와 두 개의 간섭 BTS로부터의 채널 이득을 가장 크게 하는 가중치들을 각각 주 신호 가중치 벡터 $\mathbf{f}_{k,a}$ 와 주 간섭 가중치 벡터 $\{\mathbf{d}_{k,i}\}_{i=b,c}$ 로 선택함을 보여준다.

본 논문에서는 가중치 벡터 codebook으로 DFT (Discrete Fourier Transform) codebook을 사용하는 것을 고려한다^[12]. DFT codebook은 G 개의 가중치 벡터들에 의해 형성되는 G 개의 주 빔 방향이 방위각 (azimuth angle)에서 균일하게 나누어지도록 디자인 된다. 따라서, codebook에 속하는 가중치 수가 많아질수록 각 가중치에 의해 형성되는 주 빔들 간의 방

위각 간격이 줄어들기 때문에, 인접한 방위각을 가리키는 가중치들에 의해 AT가 수신하는 채널 이득은 비슷하게 된다. 따라서, 선택된 주 간섭 가중치 벡터 $\{\mathbf{d}_{k,i}\}_{i=b,c}$ 뿐 아니라, $\{\mathbf{d}_{k,i}\}_{i=b,c}$ 가 가리키는 방위각과 인접한 방위각을 가리키는 가중치들 또한 해당 AT에 많은 간섭을 줄 수 있다. 따라서, 클러스터 스케줄링 시에 주 간섭 가중치 벡터 $\{\mathbf{d}_{k,i}\}_{i=b,c}$ 와 인접한 방위각을 가리키는 가중치들까지 주 간섭 가중치 벡터로 고려하여, 각 C-BTS에서 사용하는 가중치들에 의해 형성되는 빔 간의 충돌을 계산한다. 구체적으로, 주 간섭 가중치 벡터 $\{\mathbf{d}_{k,i}\}_{i=b,c}$ 와 해당 벡터에 인접하는 두 개의 가중치 벡터들을 k 번째 AT의 주 간섭 가중치 벡터 집합 $\{\Theta_{k,i}\}_{i=b,c}$ 에 추가시켜, 각 C-BTS에서 사용하는 가중치들에 의해 형성되는 빔 간의 충돌을 계산하는 것이 바람직하다. 각 AT는 codebook에서 선택한 주 신호 가중치 벡터 $\mathbf{f}_{k,a}$ 와 주 간섭 가중치 벡터 집합 $\{\Theta_{k,i}\}_{i=b,c}$ 의 인덱스를 피드백한다.

a 번째 BTS에 속하는 k 번째 AT는, 신호 가중치 벡터 $\mathbf{f}_{k,a}$ 를 a 번째 BTS에서 사용하고, 각 간섭 C-BTS에서 주 간섭 가중치 벡터 집합 $\{\Theta_{k,i}\}_{i=b,c}$ 에 속하는 가중치 벡터들을 사용하지 않았을 때의 수신 SINR을 다음과 같이 계산한다.

$$\rho_{k,a} = \frac{|\mathbf{f}_{k,a}^H \mathbf{H}_{k,a} x_a|^2}{\sum_{i=b,c} \alpha_i I_{k,i} + |\mathbf{f}_{k,a}^H \mathbf{n}_{k,i}|^2 / \gamma_{k,a}} \quad (3)$$

여기서, $I_{k,i}$ 는 k 번째 AT의 i 번째 간섭 BTS에서 주 간섭 가중치 벡터 집합 $\Theta_{k,i}$ 에 속하지 않은 가중치 벡터들을 사용할 경우 수신하는 간섭량을 평균하여 다음과 같이 계산한다.

$$I_{k,i} = \sum_{m \in F, m \notin \Theta_{k,i}} |\mathbf{w}_m^H \mathbf{H}_{k,a}|^2 / (G - |\Theta_{k,i}|) \quad (4)$$

여기서, $|\Theta_{k,i}|$ 는 집합 $\Theta_{k,i}$ 에 속하는 원소의 개수를 나타낸다. 이와 같이 구해진 k 번째 AT의 수신 SINR $\rho_{k,a}$ 은 클러스터 스케줄링에 의해 C-BTS에서 사용하는 가중치들에 의해 형성되는 빔들간의 충돌이 회피(Collision Avoidance: CA)되었을 때의 수신 SINR로, 이를 CA-BF CQI라고 명한다.

한편, 클러스터 내의 AT 수가 작을 경우, 클러스터 스케줄링에 의해 전송이 허락된 세 개 AT의 주 신호 가중치들이 형성하는 세 개의 빔 간의 충돌이 회피되지 않을 경우가 발생한다. 이러한 경우를 스케줄러에서 고려하기 위해서는 빔 간의 충돌이 회피되지 않을 경우의 CQI를 알고 있어야 한다. 따라서, a 번째 BTS에 속하는 k 번째 AT는 신호 가중치 벡터 $\mathbf{f}_{k,a}$ 를 a 번째 BTS에서 사용하고, 각 간섭 C-BTS에서 주 간섭 가중치 벡터 집합 $\{\Theta_{k,i}\}_{i=b,c}$ 에 속하는 가중치 벡터들을 사용하였을 때, 수신 SINR $\hat{\rho}_{k,a}$ 을 다음과 같이 계산하여 피드백한다.

$$\hat{\rho}_{k,a} = \frac{|\mathbf{f}_{k,a}^H \mathbf{H}_{k,a} x_a|^2}{\sum_{i=b,c} \alpha_i \hat{I}_{k,i} + |\mathbf{f}_{k,a}^H \mathbf{n}_{k,i}|^2 / \gamma_{k,a}} \quad (5)$$

여기서, $\hat{I}_{k,i}$ 는 k 번째 AT의 i 번째 간섭 BTS에서 주 간섭 가중치 벡터 집합 $\Theta_{k,i}$ 에 속하는 가중치 벡터들을 사용할 경우, 수신하는 간섭량을 평균하여 다음과 같이 계산한다.

$$\hat{I}_{k,i} = \sum_{m \in \Theta_{k,i}} |\mathbf{w}_m^H \mathbf{H}_{k,a}|^2 / |\Theta_{k,i}| \quad (6)$$

이와 같이 구해진 k 번째 AT의 수신 SINR $\hat{\rho}_{k,a}$ 은 클러스터 스케줄링에 의해 C-BTS에서 사용하는 가중치들에 의해 형성되는 빔들간의 충돌이 회피되지 않았을 때의 수신 SINR이 된다. k 번째 AT는 CA-BF CQI에서 빔들간의 충돌이 회피되지 않았을 때의 수신 SINR을 뺀 값, $\Delta\rho_{k,a} = \rho_{k,a} - \hat{\rho}_{k,a}$ 을 계산하고, 이를 CA-BF Δ CQI라는 이름으로 클러스터 스케줄러로 피드백 한다. 즉, 클러스터 스케줄링은 피드백된 CA-BF CQI와 CA-BF Δ CQI 정보를 이용하여, 빔 간의 충돌이 회피되었을 때와 빔 간의 충돌이 회피되지 않았을 때의 각 AT가 수신 가능한 SINR 값을 각각 알 수 있다.

IV. 충돌 회피 스케줄링

충돌 회피 스케줄링은 다음과 같이 수행된다.

먼저, 각 AT는 serving BTS로 다음의 정보를 역방향 링크 피드백 채널을 통해 전송한다.

- ① 주 신호 가중치 벡터 $\mathbf{f}_{k,a}$ 와 주 간섭 가중치 벡

터 $\{d_{k,i}\}_{i=b,c}$ 의 codebook 인덱스 정보.

② CA-BF CQI와 CA-BF ΔCQI 정보

클러스터 스케줄러는 C-BTS들로부터 전송된 클러스터 내의 모든 AT들의 피드백 정보를 바탕으로, 모든 AT 조합에 대해 전송 가능 데이터 용량을 계산하고, 최대 스케줄링 priority를 갖는 AT 조합과 해당 조합이 사용할 빔성형 가중치들을 결정한다.

구체적으로 예를 들면, 각 C-BTS별로 2개의 AT들이 존재하는 2개의 C-BTS를 가정하면, 총 2개의 AT 조합이 존재하게 된다. 각 AT 조합별로, 한 AT의 신호 가중치 집합에 속한 가중치가 다른 AT의 주 간섭 가중치들과 일치하는 가를 판단한다. 만약, 일치하지 않는다면 CA-BF이 가능하기 때문에, CA-BF CQI 정보를 이용하여 시스템 전송 용량을 계산한다.

반면에, 한 AT의 신호 가중치가 다른 AT의 주 간섭 가중치들과 일치하게 되면, CA-BF이 불가능하기 때문에, CA-BF CQI에서 CA-BF ΔCQI를 빼서, 빔간의 충돌이 회피되지 않았을 때의 수신 SINR 값을 구하고, 이를 이용하여 시스템 전송 용량을 계산한다.

위와 같이 계산된 시스템 전송 용량을 이용하여, 총 2개의 AT 조합 중에서 높은 스케줄링 priority를 갖는 AT 조합을 선택한다. 실제로 CA-BF이 가능한 AT 조합이 높은 시스템 전송 용량을 제공하므로, 상술된 CA-BF 스케줄링을 통해 각 BTS에서 사용하는 가중치들에 의해 성형되는 빔들 간의 충돌을 억제함으로써, 타 셀 간섭을 억제하여 전송 데이터 용량을 개선시킬 수 있다.

마지막으로, 클러스터 스케줄러는 각 C-BTS에서 데이터를 전송할 하나의 AT, 해당 AT가 사용할 빔성형 가중치, 그리고 해당 빔성형 가중치를 사용하여 전송할 데이터의 modulation and coding scheme (MCS) 정보를 전송하고, 해당 BTS는 전달된 정보에 따라 데이터를 전송한다.

V. 성능 분석

본 절에서는 제안하는 CA-BF의 성능을 분석하기 위해 세 개의 C-BTS와 K_c 개의 AT들로 구성된 하나의 클러스터에서의 시스템 레벨 시뮬레이션을 통해, 비협력 빔성형(non-coordinated BF, NC-BF) 기술, 즉 BTS별로 데이터를 전송할 AT와 빔성형 가중치를

결정하는 기존의 빔성형 기술과 제안하는 CA-BF 기술의 성능을 클러스터 전송 용량을 기준으로 비교 분석한다. 또한, 참고문헌 [12]에서 제안된 협력 SDMA(C-SDMA) 기술과 제안하는 CA-BF 기술의 성능을 클러스터 전송 용량을 기준으로 비교 분석한다. 비교하는 모든 기술에서 사용하는 피드백 정보는 예러가 없이 전달되고, 클러스터 스케줄러는 된다고 가정하고, 클러스터 스케줄러는 proportional fairness (PF) 스케줄링 기법을 사용한다.

각 C-BTS의 송신 안테나 수 n_T 은 4이고, 안테나 간격이 0.5 λ이며, AT의 수신 안테나 수 n_R 은 4이고, 안테나 간격이 0.5 λ이다. 모든 K_c 개의 AT들은 세 개의 C-BTS들로부터 평균 SNR 10 dB의 신호를 수신하는 isotropic 환경을 가정한다.

클러스터로부터 K_c 개의 AT들까지의 각 링크에서 MIMO 채널 계수를 10,000번 발생시켜서 얻어진 클러스터의 throughput을 평균하여 성능 척도로 사용하였다. 채널 계수 발생시, BTS의 송신단에서의 AOD (Angle of Departure)와 AT의 수신단에서의 AOA (Angle of Arrival)은 (-30°, 30°) 내에서 균일하게 발생시켰다. 각 링크의 채널은 공간 상관도가 있는 MIMO 채널이며, BTS의 송신단에서의 공간 상관 행렬 R_T 와 AT의 수신단에서의 공간 상관 행렬 R_R 는 선형 배열안테나를 사용하며 angular spectrum이 AOD와 AOA를 중심으로 각각 5°와 60°만큼 균일하게 분포하는 모델을 사용하여 구하였다^[9].

사용된 빔성형 가중치 codebook F 를 구성하는 가중치 벡터 $\{w_l\}_{l=1,\dots,G}$ 은 다음 식 (7)과 같다.

$$w_l = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 \\ e^{j2(l-1)\pi/G} \\ e^{j4(l-1)\pi/G} \\ e^{j6(l-1)\pi/G} \end{bmatrix} \quad (7)$$

C-SDMA에서 사용된 각 셀의 SDMA를 위한 precoding 행렬 codebook $S = \{E_1, E_2\}$ 에 속하는 unitary precoding 행렬은 다음 식 (8)과 같다.

$$E_1 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & e^{j\pi/2} & e^{j\pi} & e^{j3\pi/2} \\ 1 & e^{j\pi} & e^{j2\pi} & e^{j3\pi} \\ 1 & e^{j3\pi/2} & e^{j3\pi} & e^{j9\pi/2} \end{bmatrix}$$

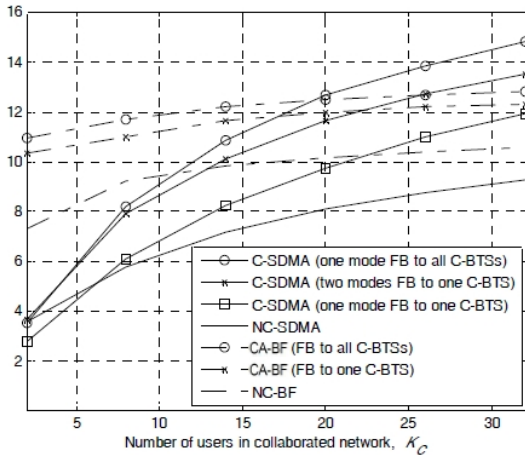


그림 1. CA-BF 기술에 의한 cluster의 전송 용량
Fig. 1. Cluster capacity of CA-BF.

$$E_2 = \frac{1}{2} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 \\ e^{j\pi/4} & e^{j3\pi/4} & e^{j5\pi/4} & e^{j7\pi/4} \\ e^{j\pi/2} & e^{j3\pi/2} & e^{j5\pi/2} & e^{j7\pi/2} \\ e^{j3\pi/4} & e^{j\pi/4} & e^{j15\pi/4} & e^{j21\pi/4} \end{bmatrix} \quad (8)$$

C-SDMA에서 AT는 각 링크 별로 다중 사용자 다이버시티 이득을 최대화 하는 최적의 precoding 행렬을 codebook S 에서 선택하고, 이를 피드백하며, 클러스터 스케줄러는 각 전송 precoding 행렬(mode)별로 동일 precoding 행렬을 선택하는 AT들에 대해 PF 스케줄링을 수행하고, 최대 스케줄링 우선 순위를 제공하는 precoding 행렬을 사용하는 AT들을 선택한다. 또한, 다중 사용자 다이버시티 이득을 증가시키기 위해, 각 AT별로 하나 이상의 선호하는 전송 모드를 다수의 C-BTS로 피드백하는 방식의 성능을 비교하였다.

그림 1에서 CA-BF 기술들이 NC-BF 기술보다 높은 클러스터 전송 용량을 보임을 확인할 수 있다. 따라서, CA-BF 기술이 타 셀 간섭을 효과적으로 억제하여 시스템 용량을 개선시킴을 확인할 수 있다.

CA-BF에서도 AT가 속한 하나의 BTS로 주 신호 및 주 간섭 가중치 정보와 해당 CQI 정보를 피드백하고, serving BTS에서 collision avoidance BF을 수행하는 ("FB to one C-BTS") 보다 모든 C-BTS들로의 가중치와 CQI 정보를 피드백하고, collision avoidance BF을 수행하는("FB to all C-BTSs") 것이 상당히 높은 용량을 제공한다. 이는 각 AT에서 채널 정보를

피드백하는 C-BTS 수가 증가함에 따라, 클러스터 스케줄링의 다중 사용자 다이버시티 차수가 증가하기 때문이다. 따라서, 시스템에서 허용되는 상향 링크 피드백 채널 용량에 따라, 최적의 피드백 방식을 선택하여 클러스터 전송 용량을 증가시킬 수 있다.

C-SDMA와 CA-BF 기술의 성능을 비교하면, AT의 수가 적고, 간섭 BTS로부터의 간섭량이 적을수록 CA-BF 기술이 높은 용량을 제공하고, AT의 수가 많고 간섭 BTS로부터의 간섭량이 많을수록 C-SDMA 기술이 높은 용량을 제공한다. 따라서, AT의 수와 간섭 BTS로부터의 채널 환경에 따라, C-SDMA와 CA-BF 기술 중에서 높은 시스템 용량을 제공하는 기술을 적응적으로 선택하여 사용함으로써, 높은 용량을 이룰 수 있음을 알 수 있다. 또한, AT들이 C-BTS들로부터 수신하는 평균 SNR 증가에 따른 용량 증가량은 C-SDMA 기술이 CA-BF 기술보다 높다. 이는 C-SDMA 기술의 CA-BF보다 많은 수의 데이터 스트림을 동시에 전송하기 때문이다.

VI. 결 론

본 논문은 협력 무선 통신 시스템에서 CA-BF을 위한 피드백 방식과 그에 따른 스케줄링 기술을 제안하였다. 제안한 기술이 제한된 피드백 정보량을 이용하여 시스템 전송 용량을 향상시킬 수 있음을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 제안한 기술은 상향 링크 피드백의 허용된 용량에 따라 최적의 피드백 방식을 선택함으로써 시스템 전송 용량을 상당히 향상시킬 수 있음을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] P. Marsch, S. Khattak, and G. Fettweis, "A framework for determining realistic capacity bounds for distributed antenna systems", *Proc. IEEE Info. Theory Wksp. '06*, Chengdu, China, Oct. 2006.
- [2] 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, Aug. 2006.
- [3] J. G. Andrews, W. Choi, and R. W. Heath Jr., "Overcoming interference in spatial multiplexing MIMO

- cellular networks", *IEEE Wireless Commun.*, vol. 14, no. 6, pp. 95-104, Dec. 2007.
- [4] R. Irmer, H. Droste, P. Marsch, M. Grieger, G. Fettweis, S. Brueck, H-P. Mayer, L. Thiele, and V. Jungnickel, "Coordinated multipoint: concepts, performance, and field trial results", *IEEE Communications Mag.*, vol. 49, no. 2, pp. 102-111, Feb. 2011.
- [5] 3GPP TR 36.814, "Further advancements for E-UTRA physical layer aspects", *Release 9, v. 9.0.0*, Mar. 2010.
- [6] Kyong-Hoe Kim, Jong-Ho Lee, Chang-Hoon Lee, Nam-Ryul Jeon, and Seong-Cheol Kim, "Coordinated beamforming with limited BS cooperation for multicell multiuser MIMO broadcast channel", in *Proc. IEEE Veh. Technol. Conf.*, Apr. 2009.
- [7] H. Dahrouj, Wei Yu, "Coordinated beamforming for the multicell multi-antenna wireless system", *IEEE Trans. on Wireless Comm.*, pp. 1748-1759, vol. 9, no. 5, May 2010.
- [8] C. B. Chae, D. Mazzaresse, T. Inoue, and R. W. Heath, Jr., "Coordinated beamforming for the multiuser MIMO broadcast channel with limited feedforward", *IEEE Trans. on Signal Processing*, vol. 56, no. 12, pp. 6044-6056, Dec. 2008.
- [9] 정희진, 김도운, 문철, 육종관, "다중 입출력 안테나 시스템을 사용하는 무선 통신 네트워크에서 기지국들간 공동 빔성형 기술", 한국인터넷정보학회 2009년 추계학술발표대회 논문집, 2009년 10월.
- [10] J. Giese, M. A. Awais, "Performance upper bounds for coordinated beam selection in LTE-advanced", *Proc. ITG/IEEE Wksp. Smart Antennas '10*, Bremen, Germany, Feb. 23-24, 2010.
- [11] 문철, 정창규, "협력 공간분할 다중 접속 기술을 위한 제한된 피드백과 스케줄링", 한국전자과학회논문지, 22(6), pp. 648-653, 2011년 6월.
- [12] C. Mun, "Quantized principal component selection precoding for spatial multiplexing with limited feedback", *IEEE Trans. on Comm.*, May 2008.
- [13] J. Salz, J. H. Winters, "Effect of fading correlation on adaptive arrays in digital wireless communications", *IEEE Trans. Veh. Technol.*, vol. 43, pp. 1049-1057, Nov. 1994.

문 철



1995년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 1997년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
 2001년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학박사)
 2001년 3월~2002년 2월: 삼성전자 네트워크 사업부 선임연구원

2003년 8월~현재: 국립한국교통대학교 정보통신공학과 교수

[주 관심분야] MIMO 시스템, 채널 모델링 등

정 창 규



1988년 2월: 연세대학교 전자공학과 (공학사)
 1990년 8월: 연세대학교 전자공학과 (공학석사)
 1995년 8월: 연세대학교 전자공학과 (공학박사)
 1995년 9월~현재: 국립한국교통대학교 정보통신공학과 교수

[주 관심분야] MIMO 시스템, 채널 모델링 등