논문 2009-46TC-4-12

안테나 간 상관도에 강건한 SINR 최대화 협력적 빔포밍 기법

(SINR Maximizing Collaborative Beamforming with Enhanced Robustness Against Antenna Correlation)

김 재 원*, 성 원 진**

(Jaewon Kim and Wonjin Sung)

요 약

본 논문에서는 기지국 간 협조적 전송을 통해 다중 사용자 MIMO 이동통신 시스템에서 신호 대 간섭 및 잡음비 (Signal-to-Interference plus Noise Ratio; SINR)를 최대화하기 위한 송수신 빔포밍 벡터를 생성하는 방법을 제안한다. 다중 사용자 MIMO 이동통신 시스템의 성능에 영향을 주는 간섭 신호로는 기지국 간 협조적 전송을 통해 신호를 전송하는 사용자들 간 간섭 신호 성분 및 협조적 신호 전송에 참여하지 않는 기지국으로부터의 간섭 신호 성분이 있다. 제안하는 기법은 다중 사용자 간 간섭은 블록 대각화 기법 (Block Diagonalization; BD)을 활용하여 제거하고, 협조적 신호전송에 참여하지 않는 기지국으로부터의 간섭 신호는 간섭 신호의 통계적 정보를 활용한 최적 결합 (Optimal Combining; OC) 기반의 수신 빔포밍 벡터 및 송신 빔포밍 벡터를 생성함으로써 완화 시킨다. 또한 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 협조적 신호 전송에 참여하지 않는 기지국 간섭 신호의 통계적 정보를 송수신단 빔포밍 벡터를 생성하는데 활용하는 제안 방식의 평균 SINR 측면에서의 성능이득을 기존의 통계적 정보를 활용하지 않거나 수신단에서만 활용하는 방식들과 비교하여 검증한다. 성능평가를 위해 안테나 간 독립적인 채널뿐만 아니라 상관도가 존재하는 채널에서도 실험을 수행하여 제안 방식이 실제 채널에서 사용될 때에 발생할 수 있는 성능열화에 대한 정량적인 수치를 제시하며, 또한 제안 방식이 안테나 간 상관도가 존재하는 경우에 강건한 성능을 보임을 검증한다.

Abstract

In this paper, a generation method of transmit and receive beamforming vectors based on base station cooperation is proposed which maximizes the user SINR in mobile cellular multi-user MIMO systems. There are two main sources of interference which deteriorate the performance of the system, i.e. the inter-user interference caused by the usage of the same radio resource for multiple users in the system, and the inter-cluster interference from neighboring base stations which are not participating in cooperative transmission. The proposed scheme cancels out the inter-user interference by using the block diagonalization (BD) method, and mitigate the inter-cluster interference by using optimal transmit and receive beamforming vectors based on optimal combining (OC) with the statistic information of inter-cluster interference. We perform computer simulations to verify the performance of the proposed scheme, and compare the result to the conventional performance obtained from utilizing the receiver side information only or utilizing the information from neither sides. The performance evaluations are conducted not only over the independent MIMO channels, but over correlated MIMO channels to demonstrate the robustness of the proposed scheme over the channels with correlation among antennas.

Keywords : Multi-user MIMO, beamforming, SINR maximization, cooperative transmission, antenna correlation.

I. 서 론

다중 사용자 MIMO 환경에서는 공간 다중화 기법을 통해 클러스터 내부에서 동일한 자원을 사용하는 다수의 사용자와 동시에 교신이 가능하며 이를 통해 전송률 증대 이익을 볼 수 있으나, 공간 다중화 기법을 사용한 사용자들의 채널 간 직교성이 충분히 보장되지 않을 경우 사용자 간 간섭이 발생 할 수 있다. 따라서 다중 사용자들의 채널 간 직교성을 얻기 위한 방법 중 하나로

* 학생회원, ** 평생회원, 서강대학교 전자공학과
(Department of Electronic Engineering, Sogang University)
접수일자: 2008년11월12일, 수정완료일: 2008년4월17일

사용자들의 채널들을 연접한 채널 행렬의 의사 역행렬을 사용하는 방식이 있다[1~2]. 다중 사용자들의 채널 간 직교성을 얻기 위한 또 다른 방법으로는 각각의 사용자들이 프리코더(precoder)을 구성할 때 해당 사용자의 신호가 다른 사용자들 채널의 영공간(null space)에 들어가도록 제한하는 것을 기본 원리로 하는 블록 대각화 기법 (Block Diagonalization; BD)이 연구되었다[3]. 이는 의사 역행렬을 통한 방식과 달리 블록 단위로 대각 성분이 0이 아닌 값을 갖는 블록 MIMO채널로 변형되기 때문에 다중 데이터 전송을 통한 공간부호율 증가 이득 또는 전송 다이버시티를 통한 신호 대 잡음비 (Signal-to-Noise Ratio; SNR) 증대 이득을 얻을 수 있다.

한편 이동 통신 시스템에서 다중 사용자 MIMO 전송 기법을 사용 시에는 협조적 전송에 참여하는 기지국들로 이루어진 클러스터 내부에서 발생하는 사용자 간 간섭뿐만 아니라 클러스터 외부에서 발생되는 간섭 성분에 의하여 시스템 전체의 성능이 열화 될 수 있으며, 특히 사용자가 클러스터 간 경계 지역에 위치하는 경우 클러스터 외부 간섭에 의한 성능 열화가 큰 문제로 작용을 한다[4~5]. 이러한 클러스터 외부 간섭에 의한 영향을 억제하기 위한 방법으로는 단말기의 안테나 배열을 통해 수신된 신호들을 결합하여 신호 대 간섭 및 잡음비 (Signal-to-Interference plus Noise Ratio; SINR)를 최대화 하는 최적 결합 (Optimum Combining; OC) 방식이 연구되어 왔다[6]. 최적 결합 방식은 MMSE (Minimum Mean-Squared-Error)방식으로 변환이 가능하며[7], 또한 간섭 신호 성분을 백색잡음화한 후 최대비 결합 (Maximum Ratio Combining; MRC)을 적용하는 방식으로 해석이 가능함이 알려져 있다[8].

본 논문에서는 이동통신 셀룰라 시스템에서의 다중 사용자 MIMO 전송 기법을 고려하여 클러스터 내부의 사용자 간 간섭을 BD 기법을 사용하여 제거하고 클러스터 외부로부터의 간섭을 송신 및 수신 빔포밍을 통해 억제하는 기법을 제안한다. 기존의 OC는 단말기의 수신 신호 처리만을 고려하는데 비하여, 제안하는 방법은 송수신단 빔포밍을 통해 수신 신호의 SINR을 최대화하는 장점이 있다. 성능평가에서는 안테나 간 독립적인 채널 및 상관도가 존재하는 채널에서 실험을 수행하여 제안 방식이 실제 채널에서 사용될 때에 발생할 수 있는 성능열화에 대한 정량적인 수치를 제시하며, 또한 제안방식이 안테나 간 상관도가 존재하는 경우에도 강건한 성능을 보임을 검증한다.

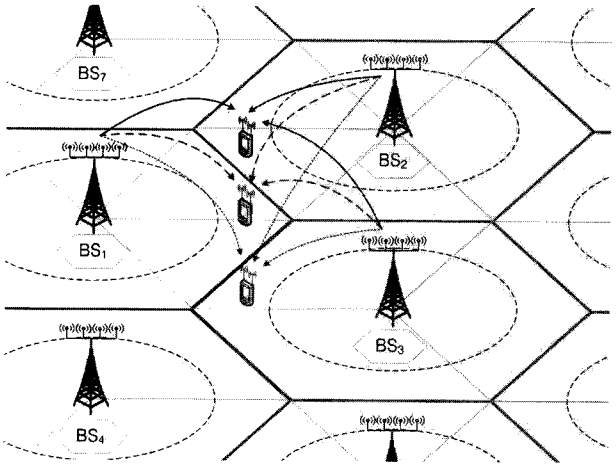

그림 1. 기지국 간 협조적 신호 전송을 고려한 시스템
Fig. 1. A system for cooperative transmission among BS's.

Ⅱ. 신호 및 시스템 모델

N_k개의 안테나를 갖는 단말 MS_k가 M_l개의 안테나를 갖는 L개의 기지국으로부터 받은 수신 신호는

$$\mathbf{r}_k = \sum_{l=1}^{L} \mathbf{H}_{k,l}\mathbf{x}_l + \mathbf{n}_k \tag{1}$$

와 같이 표현되며 이때 $\mathrm{H}_{k,l}$은 l-번째 기지국 BS_l과 MS_k 간의 무선 채널을 의미하는 $N_k \times M_l$ 행렬이며, x_l은 l-번째 기지국에서 송신되는 전송 신호 벡터, n_k는 MS_k의 수신 신호에 포함된

$$E\{\mathbf{n}_k\mathbf{n}_k^H\} = N_0\mathbf{I}_{N_k}{}^{1)} = N_0\mathbf{I}_{N_k}{}^{2)} \tag{2}$$

인 additive white Gaussian noise (AWGN)이다. 그림 1에서와 같이 다수개의 기지국 간 협조를 통해 다수의 단말기를 위한 신호를 동시에 전송하는 경우를 고려하며, 이때 협조적 신호 전송에 참여하는 기지국들의 집합을 클러스터로 명명하고 MSk를 위해 협조적 신호 전송에 참여하는 기지국의 인덱스 집합을 Ck로 정의한다. MSk가 속해있는 클러스터 내의 단말기의 개수를 K라고 하면 식 (1)의 수신신호는

$$\mathbf{r}_k = \sum_{l\in C_k} \mathbf{H}_{k,l}\mathbf{x}_l + \sum_{b\notin C_k} \mathbf{H}_{k,b}\mathbf{x}_b + \mathbf{n}_k \tag{3}$$

1) E{X}는 확률변수 X의 statistical expectation operator를 의미한다.
2) I_n은 $n \times n$ 단위 행렬 (identity matrix)을 나타낸다.

와 같이 분해할 수 있다. 식 (3)의 우측 성분들 중 첫 번째 성분은 MS_k가 속해 있는 클러스터 내부에서 발생한 K개의 단말기를 위해 전송된 성분들의 합을 의미하며, 두 번째 성분은 클러스터 외부에서 발생한 간섭신호 성분들의 합을 의미한다. 따라서 MS_k가 속해 있는 클러스터 내부의 l-번째 기지국에서 송신되는 전송 신호 벡터는

$$\mathbf{x}_b = \sum_{k=1}^{K} \mathbf{x}_{k,b} \tag{4}$$

으로 정의할 수 있다. 이때 $x_{k,b}$는 b-번째 기지국에서 MS_k를 위하여 송신되는 전송 신호 벡터로써

$$\mathbf{x}_{k,b} = \sqrt{p_{k,b}}\,\mathbf{v}_{k,b} d_{k,b} \tag{5}$$

와 같이 생성되며, 이때 $d_{k,b}$, $p_{k,b}$, $v_{k,b}$는 각각 복소 송신 데이터, 송신 전력 및

$$\left\|\mathbf{v}_{k,b}\right\|_{\mathrm{F}} = 1 \text{ 3)} \tag{6}$$

인 $M_l \times 1$ 송신 빔포밍 벡터를 의미한다. 식 (3)은 행렬

$$\tilde{\mathbf{H}}_k = [\mathbf{H}_{k,C_k(1)}\ \mathbf{H}_{k,C_k(2)}\ \cdots\ \mathbf{H}_{k,C_k(|C_k|)}] \text{ 4)}$$

와 벡터

$$\tilde{\mathbf{x}}_k = [\mathbf{x}^T_{k,C_k(1)}\ \mathbf{x}^T_{k,C_k(2)}\ \cdots\ \mathbf{x}^T_{k,C_k(|C_k|)}]^T$$

를 사용하여

$$\mathbf{r}_k = \tilde{\mathbf{H}}_k\tilde{\mathbf{x}}_k + \sum_{i=1,i\neq k}^{K}\tilde{\mathbf{H}}_k\tilde{\mathbf{x}}_i + \sum_{b\notin C_k}\mathbf{H}_{k,b}\mathbf{x}_b + \mathbf{n}_k \tag{7}$$

와 같이 분해 되며, 이때 식 (7)의 우측 성분들 중 첫 번째와 두 번째 성분은 각각 MS_k를 위한 전송 신호 성분 및 클러스터 내 다중 사용자들을 위한 전송 신호에 의한 간섭 성분을 의미한다.

한편 MS_k는 수신 신호 $\mathbf{r}_k$와 수신 빔포밍 벡터 $\mathbf{u}_k^H$를 활용하여

$$\mathbf{u}_k^H\mathbf{r}_k = \hat{d}_{k,b\in C_k} \tag{8}$$

와 같은 수신 신호 처리를 통해 데이터 $d_{k,b\in C_k}$를 추정하며, 이때 수신 신호 처리의 전력 정규화를 위해 수신 빔포밍 벡터는 $\left\|\mathbf{u}_k\right\|_{\mathrm{F}} = 1$와 같은 성질을 갖는 단위 벡터를 사용한다.

III. 간섭 제어 송수신 빔포밍 기법

본 장의 1절에서는 클러스터 내부의 사용자 간 간섭을 제거하는 송신단 블록 대각화 기법을 설명하고, 2절에서는 클러스터 외부 간섭을 완화하는 수신단 최적 결합 기법을 소개한다. 이어지는 3절에서는 기존에 제안된 블록 대각화 기법 및 최적 결합 기법을 동시에 고려하여 SINR을 최대화 할 수 있는 최적의 송신 및 수신 빔포밍 벡터 생성방식을 새로이 제안한다.

1. 사용자 간 간섭 제거 기법

식 (7)을 이용하여 인덱스 C_k 집합의 기지국들과 교신하는 K개 단말기의 수신 신호를 연접하여 표현하면

$$\begin{bmatrix}\mathbf{r}_1\\ \vdots\\ \mathbf{r}_K\end{bmatrix} = \begin{bmatrix}\tilde{\mathbf{H}}_1\\ \vdots\\ \tilde{\mathbf{H}}_K\end{bmatrix}\begin{bmatrix}\mathbf{x}_{C_1(1)}\\ \vdots\\ \mathbf{x}_{C_K(|C_K|)}\end{bmatrix} + \begin{bmatrix}\sum_{b\notin C_1}\mathbf{H}_{1,b}\mathbf{x}_b + \mathbf{n}_1\\ \vdots\\ \sum_{b\notin C_K}\mathbf{H}_{K,b}\mathbf{x}_b + \mathbf{n}_K\end{bmatrix} \tag{8}$$

와 같으며, 이때 협조적 전송에 참여하는 기지국들로 이루어진 클러스터 내부 K개 단말기의 교신 기지국 인덱스 집합들은 $C_1 = C_2 = \ldots = C_K = C$ 로 모두 동일한 상황을 고려한다. 클러스터 내부에서 송신되는 신호는 MS_k를 위한 전력 제어 변수 p_k, 송신 데이터 d_k, 빔포밍 벡터

$$\left[\mathbf{v}^T_{k,C(1)}\ \cdots\ \mathbf{v}^T_{k,C(|C|)}\right]^T$$

를 포함하여

$$\begin{bmatrix}\mathbf{x}_{C(1)}\\ \vdots\\ \mathbf{x}_{C(|C|)}\end{bmatrix} = \sum_{k=1}^{K}\sqrt{p_k}\,d_k\begin{bmatrix}\mathbf{v}_{k,C(1)}\\ \vdots\\ \mathbf{v}_{k,C(|C|)}\end{bmatrix} \tag{9}$$

와 같이 결정된다. 따라서 식 (9)의 송신 신호를 식 (8)에 대입하고 MS_k의 수신 신호 $\mathbf{r}_k$에 대해서 정리하면

3) $\left\|\mathbf{x}\right\|_{\mathrm{F}}$ 는 벡터 x의 Frobenius norm을 의미한다.
4) $|C|$는 집합 C 내 원소의 개수를 의미한다.

$$\mathbf{r}_k = \sqrt{p_k} d_k \tilde{\mathbf{H}}_k \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{k,C(1)} \\ \vdots \\ \mathbf{v}_{k,C(|C|)} \end{bmatrix} + \sum_{\substack{i=1 \\ i\neq k}}^{K} \sqrt{p_i} d_i \tilde{\mathbf{H}}_k \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{i,C(1)} \\ \vdots \\ \mathbf{v}_{i,C(|C|)} \end{bmatrix} + \sum_{b\notin C} \mathbf{H}_{k,b}\mathbf{x}_b + \mathbf{n}_k \quad (10)$$

와 같고, 이때 첫 번째 성분은 클러스터와 MS_k간의 교신 신호 성분이며 두 번째 성분은 클러스터와 $i\neq k$인 MS_i간의 교신신호 성분으로써 MS_k에게 사용자 간 간섭을 일으키는 요인이다. 따라서 사용자 간 간섭을 제거하기 위해서는 $k\in\{1, \cdots, K\}$에 대해

$$\sum_{\substack{i=1 \\ i\neq k}}^{K} \tilde{\mathbf{H}}_k \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{i,C(1)} \\ \vdots \\ \mathbf{v}_{i,C(|C|)} \end{bmatrix} = \mathbf{0}_{N_k\times 1} \quad (11)$$

[5]

을 만족하는 빔포밍 벡터를 생성하여야 한다. 따라서 클러스터의 기지국들과 $i\neq k$인 MS_i간의 채널 행렬들을 연접하여

$$\overline{\mathbf{H}}_k = \left[\tilde{\mathbf{H}}_1^T \ \cdots \ \tilde{\mathbf{H}}_{k-1}^T \ \tilde{\mathbf{H}}_{k+1}^T \ \cdots \ \tilde{\mathbf{H}}_K^T\right]^T \quad (12)$$

와 같은 $\overline{N}_k \times \overline{M}_k$ [6] 행렬을 정의할 때, 만약

$$\overline{\mathbf{H}}_k \begin{bmatrix} \mathbf{v}_{k,C(1)} \\ \vdots \\ \mathbf{v}_{k,C(|C|)} \end{bmatrix} = \mathbf{0}_{\overline{N}_k\times 1} \quad (13)$$

을 만족하는 빔포밍 벡터를 찾을 수 있다면, 이는 식 (11)의 사용자 간 간섭을 제거하기 위한 충분조건을 만족시키는 빔포밍 벡터가 된다.

한편 $\text{rank}\{\overline{\mathbf{H}}_k\}=\overline{L}_k$로 정의하고, $\overline{\mathbf{H}}_k$를 대상으로 특이값 분해(singular value decomposition)을 수행하면

$$\overline{\mathbf{H}}_k = \overline{\mathbf{U}}_k \overline{\mathbf{\Sigma}}_k \left[\overline{\mathbf{V}}_k^{(1)} \ \ \overline{\mathbf{V}}_k^{(0)}\right]^H \quad (14)$$

와 같다. 이때 $\overline{\mathbf{V}}_k^{(1)}$는 0이 아닌 $\overline{L}_k$개의 특이값에 해당하는 특이 벡터들로 이루어진 $\overline{M}_k \times \overline{L}_k$ 행렬이고 $\overline{\mathbf{V}}_k^{(0)}$는 특이값 0에 해당하는 $\overline{M}_k - \overline{L}_k$개의 특이 벡터들로 이루어진 $\overline{M}_k \times (\overline{M}_k - \overline{L}_k)$행렬이다. 따라서

$$\overline{\mathbf{H}}_k \overline{\mathbf{V}}_k^{(0)} = \mathbf{0}_{\overline{N}_k\times(\overline{M}_k-\overline{L}_k)}$$

와 같으므로 임의의 $(\overline{M}_k - \overline{L}_k)\times 1$ 행렬 $\mathbf{v}_k$를 이용하여

$$\overline{\mathbf{H}}_k \overline{\mathbf{V}}_k^{(0)} \mathbf{v}_k = \mathbf{0}_{\overline{N}_k\times 1} \quad (15)$$

와 같이 식 (13)의 사용자 간 간섭을 제거하기 위한 조건을 만족하는 송신 빔포밍 벡터

$$\begin{bmatrix} \mathbf{v}_{k,C(1)} \\ \vdots \\ \mathbf{v}_{k,C(|C|)} \end{bmatrix} = \mu_k^{\text{Tx}} \overline{\mathbf{V}}_k^{(0)} \mathbf{v}_k \quad (16)$$

를 찾을 수 있다. 여기서 μ_k^{Tx}는

$$\left\| \mu_k^{\text{Tx}} \overline{\mathbf{V}}_k^{(0)} \mathbf{v}_k \right\|_{\text{F}} = 1$$

을 만족시키기 위한 임의의 송신 신호 처리 전력 정규화 변수이다. 유도된 송신 빔포밍 벡터를 식 (9)에 대입하여 식 (8)의 우측 성분 중 클러스터 내부에서 발생된 신호 성분을 표현하면

$$\begin{aligned} &\begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{H}}_1 \\ \vdots \\ \tilde{\mathbf{H}}_K \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{x}_{C_1(1)} \\ \vdots \\ \mathbf{x}_{C_K(|C_K|)} \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{H}}_1 \\ \vdots \\ \tilde{\mathbf{H}}_K \end{bmatrix} \left[\overline{\mathbf{V}}_1^{(0)} \ \cdots \ \overline{\mathbf{V}}_K^{(0)}\right] \begin{bmatrix} \sqrt{p_1} d_1 \mathbf{v}_1 \\ \vdots \\ \sqrt{p_K} d_K \mathbf{v}_K \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \tilde{\mathbf{H}}_1 \overline{\mathbf{V}}_1^{(0)} & \cdots & \mathbf{0}_{N_1\times(\overline{M}_K-\overline{L}_K)} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \mathbf{0}_{N_K\times(\overline{M}_1-\overline{L}_1)} & \cdots & \tilde{\mathbf{H}}_K \overline{\mathbf{V}}_K^{(0)} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \sqrt{p_1} d_1 \mathbf{v}_1 \\ \vdots \\ \sqrt{p_K} d_K \mathbf{v}_K \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (17)$$

와 같다. 이때 $N_k \times (\overline{M}_k - \overline{L}_k)$행렬 $\tilde{\mathbf{H}}_k \overline{\mathbf{V}}_k^{(0)}$을 블록 대각 성분으로 하고 비 대각 성분으로 0의 값을 갖는 블록 대각 행렬이 사용자 간 간섭 제거 기법의 유효 채널 행렬이 되며, 이와 같은 전송 기법은 블록 대각화 기법

---

5) $0_{A\times B}$는 모든 원소가 0인 A × B 행렬이다.

6) $\sum_{\substack{i=1 \\ i\neq k}}^{K} N_i = \overline{N}_k \quad \sum_{i=1}^{|C|} M_{C(i)} = \overline{M}_k$,

이라 정의된다[3].

2. 클러스터 간 간섭 완화 기법

식 (16)에 제시된 사용자 간 간섭을 제거하는 송신 빔포밍 벡터를 사용한 경우 식 (10)으로 표현된 수신 신호 r_k는

$$\mathbf{r}_k = \sqrt{p_k} d_k \tilde{\mathbf{H}}_k \overline{\mathbf{V}}_k^{(0)} \mathbf{v}_k + \boldsymbol{\theta}_k \tag{18}$$

와 같으며, 이때 클러스터 외부로부터의 간섭 성분 및 잡음성분의 합을 $\boldsymbol{\theta}_k = \sum_{b \notin C} \mathbf{H}_{k,b} \mathbf{x}_b + \mathbf{n}_k$ 와 같이 정의한다. Θ_k의 공분산 행렬을 구하면

$$\mathbf{R}_{\boldsymbol{\theta}_k} = \sum_{b \notin C} \mathbf{H}_{k,b} \mathbf{R}_{\mathbf{x}_b} \mathbf{H}_{k,b}^H + N_0 \mathbf{I}_{N_k \times N_k} \tag{19}$$

와 같다. 이를 사용하여 수신 신호 내 간섭 및 잡음 성분을 백색화 (whitening)하기 위한 신호 처리를 수행하면

$$\mathbf{R}_{\boldsymbol{\theta}_k}^{-\frac{1}{2}} \mathbf{r}_k = \sqrt{p_k} d_k \mathbf{R}_{\boldsymbol{\theta}_k}^{-\frac{1}{2}} \tilde{\mathbf{H}}_k \overline{\mathbf{V}}_k^{(0)} \mathbf{v}_k + \mathbf{R}_{\boldsymbol{\theta}_k}^{-\frac{1}{2}} \boldsymbol{\theta}_k \tag{20}$$

와 같으며, 이때 $\mathbf{R}_{\boldsymbol{\theta}_k}^{-\frac{1}{2}} \boldsymbol{\theta}_k$의 공분산 행렬은 $\mathbf{I}_{N_k}$이 된다.

백색화 신호 처리를 거친 수신 신호는 잡음 제한 환경과 같은 특성을 갖게 되므로 MRC 수신 신호 처리를 통해 SNR을 최대화 할 수 있다. MRC 수신 신호 처리 빔포밍 벡터는

$$\mathbf{u}_k = \mathbf{R}_{\boldsymbol{\theta}_k}^{-\frac{1}{2}} \tilde{\mathbf{H}}_k \overline{\mathbf{V}}_k^{(0)} \mathbf{v}_k \tag{21}$$

으로 생성된다. 이를 활용한 신호 처리 결과로

$$\begin{aligned} \mu_k^{\mathrm{Rx}} \mathbf{u}_k^H \mathbf{R}_{\boldsymbol{\theta}_k}^{-\frac{1}{2}} \mathbf{r}_k &= \mu_k^{\mathrm{Rx}} \sqrt{p_k} d_k \mathbf{u}_k^H \mathbf{R}_{\boldsymbol{\theta}_k}^{-\frac{1}{2}} \tilde{\mathbf{H}}_k \overline{\mathbf{V}}_k^{(0)} \mathbf{v}_k \\ &\quad + \mu_k^{\mathrm{Rx}} \mathbf{u}_k^H \mathbf{R}_{\boldsymbol{\theta}_k}^{-\frac{1}{2}} \boldsymbol{\theta}_k = \hat{d}_k \end{aligned} \tag{22}$$

와 같은 값을 얻을 수 있고, 이때 μ_k^{Rx} 는

$$\left\| \mu_k^{\mathrm{Rx}} \mathbf{u}_k^H \mathbf{R}_{\boldsymbol{\theta}_k}^{-\frac{1}{2}} \right\|_{\mathrm{F}} = 1$$

을 만족시키기 위한 임의의 수신 신호 처리 전력 정규화 변수이다. 이상에서 설명한 수신 신호 처리 빔포밍 벡터

$$\mu_k^{\mathrm{Rx}} \mathbf{u}_k^H \mathbf{R}_{\boldsymbol{\theta}_k}^{-\frac{1}{2}} \tag{23}$$

는 간섭 신호 성분이 존재하는 환경에서 SINR을 최대화 하는 방식으로 알려진 최적 결합 방식과 동일한 빔포밍 벡터이다[6].

3. SINR 최대화 송수신 신호 처리 기법

식 (16)의 사용자 간 간섭 제거 송신 빔포밍 벡터 및 식 (23)의 클러스터 간 간섭 완화 수신 빔포밍 벡터를 사용하는 경우 SINR은

$$\gamma(\hat{d}_k) = \frac{p_k \mathbf{u}_k^H \mathbf{R}_{\boldsymbol{\theta}_k}^{-\frac{1}{2}} \tilde{\mathbf{H}}_k \overline{\mathbf{V}}_k^{(0)} \mathbf{v}_k \left(\mathbf{u}_k^H \mathbf{R}_{\boldsymbol{\theta}_k}^{-\frac{1}{2}} \tilde{\mathbf{H}}_k \overline{\mathbf{V}}_k^{(0)} \mathbf{v}_k \right)^H}{\mathbf{u}_k^H \mathbf{u}_k} \tag{24}$$

와 같다. 여기에 식 (21)을 대입하면

$$\begin{aligned} \gamma(\hat{d}_k) &= p_k \left(\mathbf{R}_{\boldsymbol{\theta}_k}^{-\frac{1}{2}} \tilde{\mathbf{H}}_k \overline{\mathbf{V}}_k^{(0)} \mathbf{v}_k \right)^H \mathbf{R}_{\boldsymbol{\theta}_k}^{-\frac{1}{2}} \tilde{\mathbf{H}}_k \overline{\mathbf{V}}_k^{(0)} \mathbf{v}_k \\ &= p_k \mathbf{v}_k^H \left(\tilde{\mathbf{H}}_k \overline{\mathbf{V}}_k^{(0)} \right)^H \mathbf{R}_{\boldsymbol{\theta}_k}^{-1} \tilde{\mathbf{H}}_k \overline{\mathbf{V}}_k^{(0)} \mathbf{v}_k \\ &= p_k \mathbf{v}_k^H \overline{\mathbf{A}}_k \mathbf{v}_k \end{aligned} \tag{25}$$

와 같으며, 이때

$$\overline{\mathbf{A}}_k = \left(\tilde{\mathbf{H}}_k \overline{\mathbf{V}}_k^{(0)} \right)^H \mathbf{R}_{\boldsymbol{\theta}_k}^{-1} \tilde{\mathbf{H}}_k \overline{\mathbf{V}}_k^{(0)} \tag{26}$$

으로 정의한다. $\mathbf{R}_{\boldsymbol{\theta}_k}$는 Hermitian이고 invertible한 행렬이기 때문에 $\mathbf{R}_{\boldsymbol{\theta}_k}^{-1}$ 및 $\overline{\mathbf{A}}_k$ 또한 Hermitian 행렬이 된다. 따라서

$$\overline{\mathbf{A}}_k = \mathbf{V}_k' \boldsymbol{\Lambda}_k \mathbf{V}_k'^H \tag{27}$$

와 같은 고유치 분해 (eigen-decomposition)를 수행할 수 있으며, 이때

$$\boldsymbol{\Lambda}_k = \begin{bmatrix} \lambda_{1,k} & 0 & \cdots & 0 \\ 0 & \lambda_{2,k} & \cdots & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ 0 & 0 & \cdots & \lambda_{\mathrm{rank}(\overline{\mathbf{A}}_k),k} \end{bmatrix} \tag{28}$$

는 $\lambda_{1,k} \geq \cdots \geq \lambda_{\mathrm{rank}(\overline{\mathbf{A}}_k),k}$ 와 같이 내림차순으로 정렬된

rank{$\overline{\mathbf{A}}_k$}개의 고유치 값들로 이루어진 고유 행렬이며,

$$\mathbf{V}'_k = \left[\mathbf{v}'_{1,k} \quad \mathbf{v}'_{2,k} \quad \cdots \quad \mathbf{v}'_{\mathrm{rank}(\overline{\mathbf{A}}_k),k}\right] \tag{29}$$

는 rank{$\overline{\mathbf{A}}_k$}개의 고유 벡터로 이루어진 행렬로써 $\mathbf{v}'_{i,k}$는 $\lambda_{i,k}$에 해당하는 고유 벡터를 의미한다. 그러므로 식 (15)에서 사용된 임의의 $(\overline{M}_k - \overline{L}_k)\times 1$ 행렬 $\mathbf{v}_k$는 식 (25)의 SINR을 최대화하기 위하여

$$\mathbf{v}_k = \mathbf{v}'_{1,k} \tag{30}$$

와 같이 결정되며, 이를 활용하여 최대화된 SINR은

$$\gamma(\hat{d}_k) = p_k \lambda_{1,k} \tag{31}$$

와 같다[9]. 따라서 본 논문에서 제안하는 방식은 블록 대각화 기법을 활용하여 사용자 간 간섭을 제거할 뿐만 아니라 수신단 및 송신단에서 식 (21), (26)에서와 같이 클러스터 간 간섭 신호의 공분산 행렬 정보 $\mathbf{R}_{\theta_k}$를 활용하여 클러스터 간 간섭을 완화하기 위한 최적의 송수신 빔포밍 벡터를 생성한다.

Ⅳ. 성능 평가

성능 평가를 위하여 그림 1과 같은 다중 셀 모델을 사용하며, 협조적 전송에 참여하는 기지국 인덱스 집합 C = {1, 2, 3}이고 K = 3개의 단말이 클러스터 내부에 존재하는 상황을 고려한다. 단말의 위치에 따른 정량적인 성능 평가를 위해 $d_{1,1} = d_{2,2} = d_{3,3} = d$로 모두 동일한 상황을 고려하며, 각 단말은 그림 2의 점선으로 표시된 동심원 상에 균일 분포로 위치하도록 한다. 또한 각 단말의 수신 안테나는 $N_{k\in\{1,\,2,\,3\}} = 2$인 경우로만 한정하여 실험을 수행하였다.

이하에서는 제안 방식과 기존방식간의 성능 평가를 위하여 송수신 빔포밍 벡터 생성시 클러스터 간 간섭 정보 $\mathbf{R}_{\theta_k}$를 활용하지 않는 방법을 BD-EB[7]라 표기하고, 수신단에서만 간섭 정보를 활용하는 방식을 BD-OC[8]라 표기한다.

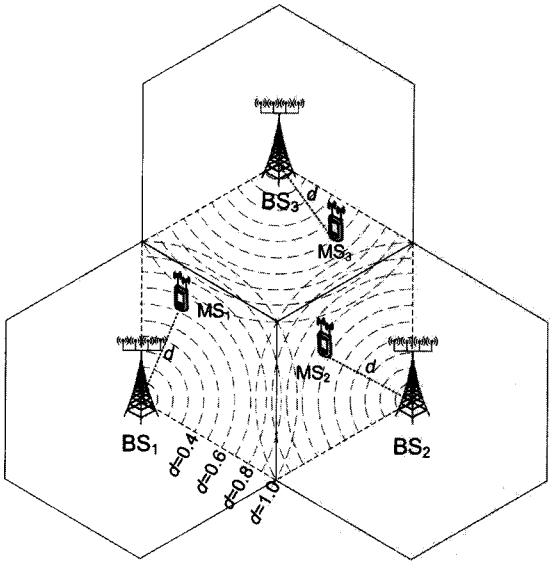

그림 2. 성능평가를 위한 시스템 모델 (C = { 1, 2, 3}, K = 3, $d_{1,1} = d_{2,2} = d_{3,3} = d$)
Fig. 2. A system model for performance evaluation.

1. 안테나 간 독립적인 채널

식 (1)에서 $\mathrm{H}_{k,l}$의 i행 j열 성분 $[\mathrm{H}_{k,l}]_{i,j}$는 MS_k의 i번째 수신 안테나와 BS_l의 j번째 송신 안테나 간의 무선 채널 성분으로써

$$[\mathbf{H}_{k,l}]_{i,j} \sim CN\left(0,\ \frac{P_T}{M_l} d_{k,l}^{-\alpha}\right) \tag{32}$$

와 같은 complex normal 분포를 따른다. 이때 P_T는 BS_l의 송신 전력이고, $d_{k,l}$은 MS_k와 BS_l간의 거리이며, α는 path-loss exponent를 의미하며, 본 논문에서는 P_T=43dBm, α=3.76의 값을 사용하여 Monte-Carlo 시뮬레이션을 수행한다[10]. 그리고 안테나 간 독립적인 채널을 고려하여, $\mathrm{H}_{k,l}$의 각 성분들이 독립적이고 동일한 분포 (independent and identical distribution; i.i.d.)을 갖게끔 생성한다.

그림 3은 L = 19개의 기지국이 존재하는 다중 셀 환경에서 제안 방식 및 BD-OC와 BD-EB의 전송방식을 사용한 경우, K = 3개 단말의 평균 SINR을 나타내었다. 제안 방식 및 BD-OC와 BD-EB방식은 모두 d가 1에 근접할수록 평균 SINR이 감소하는 양상을 보인다. 이는 d가 작을 때에는 각 셀의 중심에 위치하는 기지국으로부터의 신호 전력이 크기 때문에 클러스터 외부 간

7) 식 (21), (26)에서 $\mathbf{R}_{\theta_k} = \mathbf{I}_{N_k}$.

8) 식 (26)에서 $\mathbf{R}_{\theta_k} = \mathbf{I}_{N_k}$.

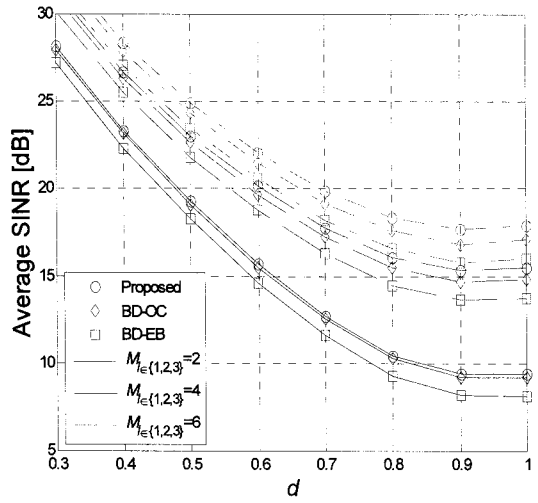

그림 3. 송신 안테나 개수의 변화에 따른 제안방식 및 BD-OC와 BD-EB의 평균 SINR (L=19, K=3, N_k=2)

Fig. 3. Average SINR of the proposed scheme, BD-OC, and BD-EB for varying number of transmit antennas.

섭에 의한 영향이 크지 않지만, d가 1에 근접할수록 클러스터 내부의 교신 신호 전력대비 클러스터 외부 간섭의 전력이 커짐으로 발생하는 현상이다.

따라서 클러스터 간 간섭을 완화하기 위한 최적의 송수신 빔포밍 벡터를 사용하는 제안 방식은 BD-OC 및 BD-EB보다 모든 d영역에서 우수한 성능을 보이며, 클러스터간 간섭의 영향이 큰 d가 1에 가까운 영역에서의 성능 이득 폭이 더욱 커지는 양상을 보인다. 또한 그림 3에서 기지국 안테나 개수 M_l = 2, 4, 6인 경우에 대한 실험 결과를 살펴보면 모든 전송 방식이 기지국 안테나 개수가 증가할수록 더욱 높은 성능을 나타내며, 이는 기지국 안테나의 개수가 클수록 빔포밍에 의한 다이버시티가 증가함에 따라 발생하는 현상이다.

2. 안테나 간 상관도가 존재하는 채널

송신단 또는 수신단 안테나들 간의 상관이 존재하는 경우에는 Hk,l의 각 성분들이 독립적이지 않다. 상관도가 존재하는 MIMO 채널을 구성하는 방법으로는 수신단 안테나 상관도 행렬 $\mathbf{R}_S$와 송신단 상관도 행렬 $\mathbf{R}_T$를 사용하여

$$\mathbf{H}_{k,l} = \mathbf{R}_S^{1/2}\mathbf{H}_W\mathbf{R}_T^{1/2} \tag{33}$$

와 같이 생성할 수 있으며[11~12], 이때 $\mathbf{H}_W$는 식 (32)에서 활용된 i.i.d. 채널 행렬을 의미한다. 본 절에서는 MIMO 채널의 상관도가 제안하는 방식 및 기존의 방식에 미치는 영향을 평가하기 위하여 $k, l \in \{1, 2\}$에 대하여 N_k, M_l = 2이고, R_S 및 R_T가

$$\begin{bmatrix} 1 & \rho \\ \rho & 1 \end{bmatrix} \tag{34}$$

인 경우를 고려하여 실험을 수행한다.

그림 4는 ρ = 0.2로 가정하여 송신 안테나 간의 채널은 독립적이고 수신 안테나 간의 채널에만 상관도가 존재하는 경우 (Rx correlation only)

$$\mathbf{R}_S = \begin{bmatrix} 1 & 0.2 \\ 0.2 & 1 \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R}_T = \mathbf{I}_2,$$

수신 안테나 및 송신 안테나 간의 채널에 모두 상관도가 존재하는 경우 (Rx & Tx corrlation)

$$\mathbf{R}_S = \mathbf{R}_T = \begin{bmatrix} 1 & 0.2 \\ 0.2 & 1 \end{bmatrix},$$

에 대하여 제안 방식과 BD-OC 및 BD-EB방식의 성능을 평가하였다. 그림 3의 결과와 비교하여 볼 때, d = 1에서 Rx corrlation only의 경우 제안 방식, BD-OC, 및 BD-EB의 평균 SINR은 송수신 안테나 간 독립적인 채널에서의 결과 대비 0.5 dB 미만의 성능 열화를 보였다. 그러나 Rx & Tx correlation의 경우는 1.9 dB 이상의 성능열화를 나타낸 것으로 볼 때, 수신 안테나보다는 송신 안테나 간 채널의 상관도가 빔포밍 전송방식의 전체적인 성능에 큰 영향을 주는 것을 확인해 볼 수 있다.

그림 5는 d=1에 위치하는 단말기를 고려할 때, 수신 및 송신 안테나 간 상관도의 변화에 따른 제안방식 및 BD-OC와 BD-EB의 평균 SINR을 도시한 그림이다. Rx correlation only의 경우 제안하는 방식은 상관도의 크기에 관계없이 항상 일정한 값을 나타내었고, BD-OC 및 BD-EB는 ρ = 0.8 일 때 독립적인 채널 대비 각각 0.6 dB 및 2.4 dB의 성능열화가 발생하였다. 또한 Rx & Tx correlation의 경우에는 ρ = 0.8 일 때 독립적인 채널 대비 제안 방식을 비롯한 모든 방식이 모두 15 dB 이상의 성능 열화가 발생하였다. 한편 Rx correlation only의 경우 상관도의 변화에 따른 BD-OC

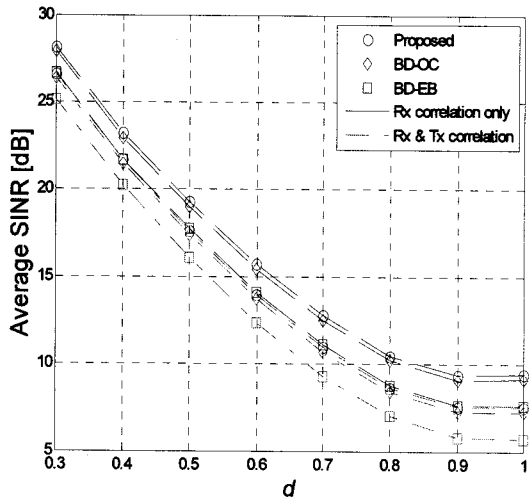

그림 4. 수신 안테나 간 상관도, 수신 및 송신 안테나 간 상관도가 존재하는 MIMO 채널에서의 평균 SINR

Fig. 4. Average SINR for the MIMO channel with receive antenna correlation, and with receive and transmit antenna correlation.

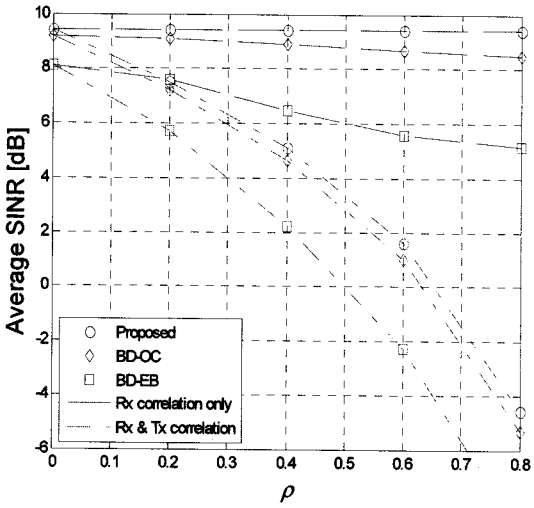

그림 5. 안테나 간 상관도의 변화에 따른 제안방식 및 BD-OC와 BD-EB의 평균 SINR

Fig. 5. Average SINR for the MIMO channel with receive antenna correlation, and with receive and transmit antenna correlation.

및 BD-EB대비 제안방식의 평균 SINR 성능이득은 ρ = 0 일 때 각각 0.19 dB 및 1.31 dB이지만, ρ = 0.8 로 증가하면 성능이득도 각각 0.91 dB 및 4.27 dB로 증가한다. Rx-Tx correlation의 경우도 마찬가지로 제안방식은 BD-OC 및 BD-EB 대비 ρ = 0.8 일 때 각각 0.75dB 및 4.43 dB의 성능 이득을 확인할 수 있다.

Ⅳ. 결 론

본 논문에서는 다중 사용자 MIMO 이동통신 시스템에서 SINR을 최대화하기 위한 송수신 빔포밍 벡터를 생성하는 방법을 제안하였다. 제안하는 빔포밍 방식은 다중 사용자 간 간섭은 BD기법을 활용하여 제거하고, 클러스터 간 간섭신호는 간섭 신호의 통계적 정보를 활용한 OC기반의 수신 빔포밍 벡터 및 송신 빔포밍 벡터를 생성함으로써 완화시킨다. 이어지는 성능평가에서는 클러스터 간 간섭 신호의 통계적 정보의 활용여부에 따라 BD-OC 및 BD-EB로 명명한 기존의 전송방식들과 제안방식의 성능을 비교하였으며, 이를 통하여 제안 방식의 성능이득을 검증하였다. 또한 안테나 간 상관도가 존재하는 채널에서의 실험을 통해 제안 방식이 실제 채널에서 사용될 때에 발생할 수 있는 성능열화에 대한 정량적인 수치를 제시하였고, 안테나 간 상관도가 큰 경우에도 강건한 성능을 나타냄을 검증하였다.

참 고 문 헌

[1] D. Gerlach and A. J. Paulraj, "Adaptive transmitting antenna array with feedback," *IEEE Signal Processing Lett.*, vol. 1, pp. 150-152, Oct. 1994.

[2] T. Haustein, C. Helmolt, E. Jorswieck, V. Jungnickel, and V. Pohl, "Performance of MIMO systems with channel inversion," in *Proc. IEEE VTC'02*, vol. 1, pp. 35-39, Vancouver, Canada, Sep. 2002.

[3] Q. H. Spencer, A. L. Swindlehurst, and M. Haardt, "Zero-forcing methods for downlink spatial multiplexing in multiuser MIMO channels," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 52, no. 2, pp. 461-471, Feb. 2004.

[4] 장재원, 진귀언, 성원진, "셀 간 협조적 공간 다중화 및 빔포밍을 이용한 하향링크 전송 효율 증대 방안," 전자공학회 논문지, 제 45권 TC편, 제7호, 45-52쪽, 2008년 7월.

[5] 이규인, 고현수, 안재영, 조용수, "OFDM 기반 셀룰러 시스템에서 가상 다중안테나를 이용한 셀간 간섭 감쇄 기법," 전자공학회 논문지, 제 43권 TC편, 제3호, 32-38쪽, 2006년 3월.

[6] J. H. Winters, "Optimum combining in digital mobile radio with cochannel interference," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 2, pp. 528-539, July 1984.

[7] A. Zanella, M. Chiani, and M. Z. Win, "MMSE

reception and successive interference cancellation for MIMO systems with high spectral efficiency," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, vol. 4, no. 3, pp. 1244-1253, May 2005.
[8] D. Tse and P. Viswanath, *Fundamentals of Wireless Communication*, Cambridge University Press. May 2005.
[9] K. K. Wong, R. S.-K. Cheng, K. B. Letaief, and R. D. Murch, "Adaptive antennas at the mobile and base stations in an OFDM/TDMA system," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 49, no. 1, pp. 195-206, Jan. 2001.
[10] 3GPP TR 25.996 V6.1.0, "Spatial channel model for multiple input multiple output (MIMO) simulations," 3rd Generation Partnership Project 3GPP, www.3gpp.org, Tech. Rep., 2003.
[11] H. Bolcskei, M. Borgmann, and A. J. Paulraj, "Impact of the propagation environment on the performance of space-frequency coded MIMO-OFDM," *IEEE J. Select. Areas Commun.*, vol. 21, no. 3, pp. 427-439, Apr. 2003.
[12] D. Shiu, G. Foschini, M. Gans, and J. Kahn, "Fading correlation and its effect on the capacity of multi-element antenna systems," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 48, pp. 502-513, Mar. 2000.

저 자 소 개

김 재 원(학생회원)
2007년 서강대학교 전자공학과 학사
2009년 서강대학교 전자공학과 석사
2009년 2월~현재 서강대학교 전자공학과 박사과정
<주관심분야 : 기지국 간 협력통신, MU-MIMO, Codebook design, 통계적 신호처리>

성 원 진(평생회원)
1990년 서울대학교 전자공학과 학사
1992년 University of Michigan, EECS 공학 석사
1995년 University of Michigan, EECS 공학 박사
1996년 1월~2000년 8월 Hughes Network Systems 책임 연구원
2000년 9월~현재 서강대학교 전자공학과 부교수
<주관심분야 : 이동무선통신, 통계적 통신이론, MIMO, 위성모뎀>