

다중 안테나 빔형성 매트릭스 변환 기법 및 사용자 선택 기법

정회원 박 종 록*, 종신회원 이 상 훈*

Beamforming Matrix Transformation and User Scheduling for MIMO Systems

Jongrok Park* *Regular Member*, Sanghoon Lee* *Lifelong Member*

요 약

랜덤 빔형성 기법은 사용자에게 심호 대 간섭 잡음비를 되먹임 받아 사용자를 선택하는 다중 안테나 전송 기법이다. 해당 기법은 사용자 수가 많은 환경일 경우 다중 사용자 이득에 따라 좋은 성능을 보이지만 사용자 환경이 적을 경우 다중 사용자 이득이 감소하여 좋은 성능을 얻기 어렵다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 본 논문에서는 빔형성 매트릭스 변환 기법 및 이에 따른 사용자 선택 기법을 제안한다. 빔형성 매트릭스 변환 기법은 사용자로부터 되먹임 받은 정보를 기반으로 빔형성 매트릭스를 변환 시키며, 사용자 수가 적은 환경에서 기존 기법보다 더 좋은 성능을 가진다. 또한, 제안하는 빔형성 매트릭스 변환 기법에 적합한 사용자 선택 기법을 이용하면 사용자 수의 증가에 따른 성능 향상을 기대 할 수 있다.

Key Words : Multiple-input multiple-output (MIMO), random beamforming (RBF), beamforming matrix transformation, user scheduling

ABSTRACT

Random beamforming (RBF) uses the signal to interference plus noise ratio (SINR) feedback to select users in multiple-input multiple-output (MIMO) systems. A large number of users are required to obtain the gain of multi-user diversity for a downlink transmission. However, if the number is not large enough, it may be difficult to obtain multi-user diversity, leading to a rapid degradation in performance. To resolve this problem, we propose the beamforming matrix transformation and the user scheduling method. The beamforming matrix transformation scheme uses the SINRs of each users and have a better performance than conventional schemes over a small number of users. In addition, we propose the user scheduling scheme corresponding to the beamforming matrix transformation. In simulation results, we demonstrate that the sum-rate can be improved according to the number of users.

I. 서 론

통신 용량 증대는 3GPP-LTE (third generation

partnership project long term evolution)에서 중요한 이슈 중 하나로 제안 되고 있다^{[1][2][3]}. 빔 형성 기법은 다중 안테나 기술의 대표적인 기술 중 하나로서, 통신

※ 이 논문은 2011년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(2010-0011995)

※ 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 육성지원 사업의 연구결과로 수행되었음 (NIPA-2011-C1090-1101-0006)

* 연세대학교 전기전자공학과 무선네트워크 연구실(bulo22@yonsei.ac.kr, slee@yonsei.ac.kr)

논문번호 : KICS2011-06-266, 접수일자 : 2011년 6월 11일, 최종논문접수일자 : 2012년 1월 12일

용량 증대를 위해 제시되는 중요한 해결법 중 하나이다⁴⁾. 최근에 대부분의 다중 안테나 기법들은 다중 사용자 이득을 통한 성능 향상 기술을 제시한다^{5)~6)7)}. 사용자 수가 증가하면, 빔 형성 기법은 더 좋은 성능을 가진다. 반면에 사용자 수가 적으면, 빔형성 기법은 다중 사용자 이득이 감소하여 좋은 성능을 가지기 어렵다. 일반적으로 실제 통신 상황에서는 많은 수의 사용자가 동시에 통신을 하는 경우가 적으므로, 다중 사용자 이득을 이용하는 기존의 빔형성 기법을 가지고는 좋은 성능을 기대하기 어렵다.

랜덤 빔형성 기법은 사용자에게 채널 정보를 완벽히 알고 있다는 가정하에 제안되는 기존의 빔 형성 기법 보다는 안 좋은 성능을 가지지만, 되먹임 방식이 간단하며 overhead가 적어 널리 사용되고 있는 빔형성 기법이다^{6)~8)9)10)}. 랜덤 빔형성 기법에서 기지국은 사용자 서비스를 위하여 랜덤 빔형성 매트릭스를 사용해서 신호를 전송한다. 각 사용자는 채널의 SINR (signal-to-interference plus noise ratio)를 측정하여 기지국에 되먹임 한다. 그 후에 기지국은 되먹임 받은 SINR 정보를 기반으로 사용자를 선택한다. 선택된 사용자의 채널 매트릭스는 전송될 때 사용된 랜덤 빔형성 매트릭스와 높은 Correlation을 가진다. 이렇듯 랜덤 빔형성 기법은 SINR 되먹임 많은 사용하므로 완벽한 채널 정보를 이용하는 방식 보다 Overhead가 적다. 하지만 랜덤 빔형성 기법은 사용자 수가 적을 경우, 채널 매트릭스가 랜덤 빔형성 매트릭스와 거의 일치하는 사용자를 찾기 어려우므로 좋은 성능을 가지기 어렵다.

ZFBF (zero-forcing beamforming) 기법은 완벽한 채널 정보를 기반으로 간섭을 제거하게 빔을 구성한다⁵⁾¹¹⁾. ZFBF은 선택된 사용자의 채널 벡터가 직교를 이루면 좋은 성능을 가진다. 따라서 각 사용자는 자신의 채널 벡터 방향에 대한 정보를 기지국에 되먹임 할 필요가 있다. ZFBF 방식은 랜덤 빔형성 기법과 마찬가지로 사용자 수가 적을 경우, 그 성능이 감소한다.

Unitary beamforming 방식은 빔형성 가중 벡터에 가장 가까운 채널 벡터를 가지는 사용자를 선택하여 사용자 그룹을 구성 한 후 서비스 한다. 각 사용자는 이를 위해 빔 인덱스를 기지국에 되먹임 하며, 이러한 방식으로 사용자 그룹을 구성하면, 서비스 사용자 그룹의 평균 sum-rate을 증가 시킬 수 있다⁷⁾¹²⁾. 하지만 적합한 채널 벡터 인덱스를 찾기 위해서는 계산상의 overhead가 크며 랜덤 빔형성 기법과 ZFBF 방식과 같이 사용자 수가 적으면 그 성능이 감소한다. 따라서

micro-cell에 적합한 새로운 빔 형성 기법이 필요하다.

해당 논문은 사용자 채널 매트릭스에 가까운 빔형성 매트릭스를 구성하기위해 빔형성 매트릭스 변환 기법을 제시한다. 제안하는 빔형성 매트릭스 변환 기법은 사용자로부터 되먹임 받은 SINR 정보를 기반으로 빔형성 매트릭스를 변환하여 사용자를 서비스 한다. 거기에 더하여 제안하는 빔형성 변환 기법에 알맞은 사용자 선택 기법을 제안한다. 해당 빔형성 변환 기법 및 사용자 선택 기법은 기존의 랜덤 빔형성 기법과 똑같은 SINR 되먹임 양을 가지므로 되먹임으로 인한 추가적인 overhead가 존재하지 않는다.

제안하는 시스템을 요약하면, 먼저 기지국은 랜덤한 빔형성 매트릭스를 구성하여 SINR 되먹임을 위한 신호를 각 사용자에게 전송한다. 각 사용자는 해당 수신 신호에 대한 SINR 값을 계산하여 되먹임 하고, 기지국은 되먹임 받은 SINR 정보를 바탕으로 사용자를 선택한다. 기지국이 선택한 사용자의 SINR을 기반으로 빔형성 매트릭스를 변환 하면, 기지국은 변환된 해당 빔형성 매트릭스를 이용하여 사용자를 서비스 한다.

II. 시스템 모델

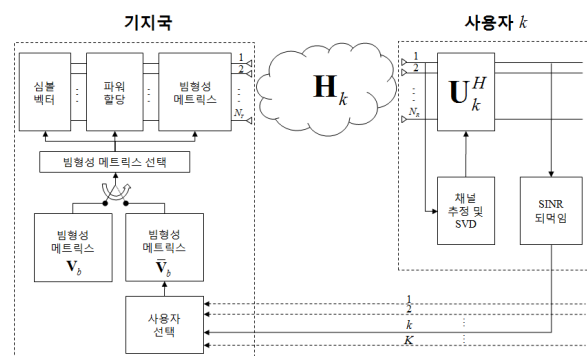


그림 1. 전체 시스템 구성도
Fig. 1. System Model

해당 논문에서는 단일 셀 환경에서 기지국과 단말에서 다중안테나를 가지는 환경을 고려한다. 그림 1.은 전체 시스템 구성도이며, K 명의 사용자가 단일 셀에 존재한다고 가정한다. 먼저, 기지국은 각 사용자로부터 SINR을 되먹임 받기 위하여 빔형성 매트릭스 V_b 를 이용하여 사용자에게 신호를 전송한다. 기지국이 각 사용자에게 신호를 전송하면 각 사용자는 수신 신호에 대한 SINR을 계산하고, 계산한 SINR 정보를 기지국에 되먹임 한다. 기지국은 사용자가 되먹임한 SINR 정보를 기반으로 사용자를 선

택하고, 선택한 사용자의 SINR 정보를 기반으로 원래의 빔형성 매트릭스 \mathbf{V}_b 에서 새로운 빔형성 매트릭스인 $\bar{\mathbf{V}}_b$ 로 변환하여 선택한 사용자를 서비스 한다. 제안하는 빔형성 기법에서 사용자는 채널에 대한 정보를 정확히 알고 있다고 가정하며, 기지국은 각 사용자의 SINR 정보만을 알고 있다고 가정한다.

본 논문에서 기지국은 N_T 개의 안테나를 가지고, 각 사용자는 N_R 개의 안테나를 가진다고 가정한다. 사용자 k 에 대해서 수신신호는 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{x}_b + \mathbf{n}_k \quad (1)$$

여기서 \mathbf{x}_b 는 N_T 차원의 전송 신호 벡터이고, \mathbf{H}_k 는 사용자 k 에 대한 $N_R \times N_T$ 차원의 채널 매트릭스이며, \mathbf{n}_k 는 N_R 차원의 잡음 벡터이다. 채널 매트릭스와 각 원소는 평균이 0이고 분산이 1인 복소 가우시안 랜덤 변수를 가정하며, 잡음벡터의 각 원소는 평균이 0이고 표준편차가 σ 인 복소 가우시안 랜덤 변수를 가정한다.

III. 기존 랜덤 빔형성 기법

기존 랜덤 빔형성 기법에서 기지국은 SINR 되먹임을 위해 빔형성 매트릭스 \mathbf{V}_b 를 이용하여 사용자에게 신호를 전송 한다^[6]. 따라서 위의 식 (1)은 다음과 같이 다시 표현할 수 있다.

$$\mathbf{y}_k = \mathbf{H}_k \mathbf{V}_b \mathbf{P}_b \mathbf{s}_b + \mathbf{n}_k \quad (2)$$

여기서 $\mathbf{V}_b = [\mathbf{v}_{b,1} \cdots \mathbf{v}_{b,N_T}]$ 는 $N_T \times N_T$ 차원의 빔형성 매트릭스 이고 ($\mathbf{V}_b \mathbf{V}_b^H = \mathbf{I}$), $\mathbf{P}_b = \text{diag}(\sqrt{p_1}, \dots, \sqrt{p_{\min(N_T, N_R)}}, \dots, 0)$ 는 $N_T \times N_T$ 차원의 파워 할당 매트릭스 이며, $\mathbf{s}_b = [s_1 \cdots s_{\min(N_T, N_R)} \cdots 0]^T$ 는 N_T 차원의 전송 신호 벡터로서 각 신호를 각 사용자가 알고 있다고 가정한다. 채널 매트릭스 \mathbf{H}_k 의 rank는 $\min(N_T, N_R)$ 이므로, 기지국은 $\min(N_T, N_R)$ 개의 신호를 전송 할 수 있다. 각 사용자가 채널 매트릭스에 대한 정보를 정확히 알고 있다고 가정하면, 각 사용자는 각 채널 매트릭스를 SVD (singular value decomposition)를 통해 $\mathbf{H}_k = \mathbf{U}_k \mathbf{D}_k \mathbf{V}_k^H$ 로 구성 할 수

있다.

여기서 $\mathbf{U}_k = [\mathbf{u}_{k,1} \cdots \mathbf{u}_{k,N_R}]$ 와 $\mathbf{V}_k = [\mathbf{v}_{k,1} \cdots \mathbf{v}_{k,N_T}]$ 는 unitary 매트릭스 이고, \mathbf{D}_k 는 \mathbf{H}_k 의 singular value를 diagonal 값들로 가지는 diagonal 매트릭스이다. 여기서 $\sum_{j=1}^{\min(N_T, N_R)} p_j = \min(N_T, N_R)$ 이라고 가정하고, SINR 되먹임을 위해 기지국에서 전송되는 각 심볼들의 파워는 1이라고 가정한다 ($p_j = 1$). 따라서 심볼 s_q 에 대한 복원된 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{s}_q &= \mathbf{u}_{k,q}^H \mathbf{y}_k \\ &= \lambda_{k,q} \mathbf{v}_{k,q}^H \mathbf{v}_{b,q} s_q \\ &\quad + \sum_{j=1, j \neq q}^{\min(N_T, N_R)} \lambda_{k,q} \mathbf{v}_{k,q}^H \mathbf{v}_{b,j} s_j + \mathbf{n}_k \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 $\lambda_{k,q}$ 는 채널 매트릭스 \mathbf{H}_k 에 대한 q 번째 singular value이다. $|s_j|^2 = 1$ 이라면, 복원 신호 \hat{s}_q 에 대한 SINR은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Gamma_k^q = \frac{\lambda_{k,q}^2 |\mathbf{v}_{k,q}^H \mathbf{v}_{b,q}|^2}{\lambda_{k,q}^2 \sum_{j=1, j \neq q}^{\min(N_T, N_R)} |\mathbf{v}_{k,q}^H \mathbf{v}_{b,j}|^2 + \sigma_N} \quad (4)$$

여기서 σ_N 은 noise의 분산이다.

랜덤 빔형성 기법은 최대의 SINR을 가지는 사용자를 선택한다. 그러므로 사용자 수가 많을 경우, 선택된 사용자는 \mathbf{V}_b 와 비슷한 \mathbf{V}_k 를 가진다 ($\mathbf{V}_b \mathbf{V}_b^H \approx \mathbf{I}$)^[6]. 그러나 사용자 수가 작으면, \mathbf{V}_b 와 비슷한 \mathbf{V}_k 를 가진 사용자를 찾기 어렵다. 사용자 수가 적을 경우, 다중 사용자 이득이 감소하고 그에 따라서 랜덤 빔형성 기법의 throughput이 감소하는 것이다. 두 개의 안테나에 대해서 두 개의 직교인 right singular vector ($\mathbf{v}_{k,1}, \mathbf{v}_{k,2}$)는 두 개의 직교 벡터 $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2$ 를 통해 다음과 같이 표시 할 수 있다.

$$\mathbf{v}_{k,1} = \sqrt{a} e^{i\theta_1} \mathbf{v}_1 + \sqrt{1-a} e^{i\theta_2} \mathbf{v}_2 \quad (5)$$

$$\mathbf{v}_{k,2} = (\sqrt{1-a} e^{i(\theta_1 - \theta_2)} \mathbf{v}_1 - \sqrt{a} \mathbf{v}_2) e^{i\theta_3} \quad (6)$$

여기서 $\mathbf{v}_{k,1}^H \mathbf{v}_{k,2} = 0, |\mathbf{v}_{k,j}|^2 = 1$ 이고, a 와 ($0 \leq a \leq 1$) θ_k 는 ($0 \leq \theta_k \leq 2\pi$) \mathbf{v}_q 성분의 절대

값과 phase 값을 나타낸다.

일반적으로 노이즈 파워는 간섭의 크기에 비해 상대적으로 작은 값을 가진다. 이 경우, 송신 빔형성 매트릭스가 $\mathbf{V}_b = [\mathbf{v}_1 \ \mathbf{v}_2]$ 라면, 두 개의 안테나를 가정할 경우 수신 신호 k 에 대한 SINR은 다음과 같이 표시 할 수 있다.

$$\hat{I}_k^q = \frac{\lambda_{k,q}^2 |\mathbf{v}_{k,q}^H \mathbf{v}_q|^2}{\lambda_{k,q}^2 |\mathbf{v}_{k,q}^H \mathbf{v}_j|^2 + \sigma_N} \quad (j \neq q) \quad (7)$$

$$= \frac{\lambda_{k,q}^2 a}{\lambda_{k,q}^2 (1-a) + \sigma_N} \approx \frac{a}{1-a} \quad (8)$$

그러므로 기존 랜덤 빔형성 기법의 SINR 되먹임은 송신 빔형성 벡터의 절대값인 a 를 반영한다.

사용자 수가 굉장히 많을 경우, $a \approx 1$ 인 사용자를 쉽게 찾을 수 있다. 하지만 사용자 수가 작을 경우 이와 같은 사용자를 찾기 어려워진다. 따라서 아무리 많은 사용자가 셀 안에 존재한다 하더라도 절대값 a 를 조정하여 $\mathbf{v}_{k,q}$ 에 근접한 \mathbf{v}_q 를 찾을 필요가 있다. \mathbf{v}_q 가 $\mathbf{v}_{k,q}$ 에 근접하면 근접 할수록 $a \approx 1$ 에 가까워진다. 하지만 기존의 랜덤 빔형성 기법은 \mathbf{v}_q 를 변환 하지 않으므로 $a \approx 1$ 이 되도록 할 수 없다.

IV. 빔형성 매트릭스 변환 기법

$N_T = 2$ 일 때, SINR 되먹임을 위하여 $\mathbf{V}_b = [\mathbf{v}_1 \ \mathbf{v}_2]$ 를 이용하며, 여기서 $\mathbf{v}_1^H \mathbf{v}_2 = 0$, $\|\mathbf{v}_j\|^2 = 1$ 이다. \mathbf{V}_b 를 이용하면, \hat{s}_q 에 대한 SINR은 식 (8)에서처럼 $\hat{I}_k^q = a/(1-a)$ 로 나타낼 수 있다. SINR 되먹임을 기반으로 기지국은 기존의 랜덤 빔형성 기법과 같이 SINR이 가장 큰 사용자를 선택한다. 하지만 기존의 랜덤 빔형성 기법과는 다르게 다음과 같이 구해진 a 값을 이용하여 빔형성 매트릭스를 변환 할 수 있다.

$$a \approx \frac{\hat{I}_k^q}{1 + \hat{I}_k^q} \quad (9)$$

위의 식 (11)은 $\hat{I}_k^q = a/(1-a)$ 를 이용하여 구한다. 노이즈 파워가 간섭에 비해 크기가 작은 경우, 위와 같은 수식 유도가 가능하다. 그리고 위에서 보

는 바와 같이 기지국에서는 각 사용자마다 하나의 SINR 값만으로도 a 값을 추정 할 수 있다. 따라서 기존의 랜덤 빔형성 기법은 다중 안테나 환경에서 rank 수 만큼 SINR을 되먹임 하나, 제안하는 빔형성 매트릭스 기법은 하나의 SINR만을 되먹임한다. 따라서 2×2 다중 안테나 시스템의 경우, 제안하는 빔형성 매트릭스 변환기법의 SINR 되먹임 량이 기존의 랜덤 빔형성 기법 보다 반으로 줄어든다.

빔형성 매트릭스 변환 기법은 a 를 이용하여 다음과 같이 선택된 사용자를 위해 빔형성 매트릭스 $\bar{\mathbf{V}}_b = [\bar{\mathbf{v}}_{b,1} \ \bar{\mathbf{v}}_{b,2}]$ 를 구성한다.

$$\bar{\mathbf{v}}_{b,1} = \sqrt{a} \mathbf{v}_1 + \sqrt{1-a} \mathbf{v}_2 \quad (10)$$

$$\bar{\mathbf{v}}_{b,2} = \sqrt{1-a} \mathbf{v}_1 - \sqrt{a} \mathbf{v}_2 \quad (11)$$

그러므로 $\bar{\mathbf{V}}_b$ 를 이용하여 선택된 사용자를 서비스 할 경우, 그에 대한 각 신호의 SINR은 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\bar{I}_k^1 = \frac{|a e^{-i\theta_1} + (1-a) e^{-i\theta_2}|^2}{a(1-a) |e^{i(\theta_2 - \theta_1)} - 1|^2} \quad (12)$$

$$\bar{I}_k^2 = \frac{|(1-a) e^{i(\theta_2 - \theta_1)} + a|^2}{a(1-a) |e^{-i\theta_1} - e^{-i\theta_2}|^2} \quad (13)$$

하지만 식 (5)와 (6)에서의 phase 값 때문에 $\bar{\mathbf{V}}_b$ 는 \mathbf{V}_k 과 차이를 가진다. 그러나 제안하는 빔형성 매트릭스 변환 기법은 기존의 랜덤 빔형성 기법에 비해 좋은 성능을 가진다. 이를 증명하기 위해 $|\mathbf{v}_{k,q}^H \mathbf{v}_{b,q}|^2$ 와 $|\mathbf{v}_{k,q}^H \bar{\mathbf{v}}_{b,q}|^2$ 의 평균값을 구한다. 평균값은 다음과 같이 나타난다.

$$E[|\mathbf{v}_{k,q}^H \mathbf{v}_{b,q}|^2] = E[a] \quad (14)$$

$$E[|\mathbf{v}_{k,q}^H \bar{\mathbf{v}}_{b,q}|^2] = E[a^2] + E[(1-a)^2] \quad (15)$$

여기서 a 가 (0,1)의 uniform random variable이므로 $E[a] = 0.5$ 이고 $E[a^2] + E[(1-a)^2] \approx 0.6667$ 이다. 그 결과 제안하는 빔형성 매트릭스 변환 기법은 기존의 랜덤 빔형성 기법보다 더 좋은 성능을 가진다.

4.1. 사용자 선택 기법

제안한 빔형성 매트릭스 변환 기법에 맞는 SINR 되먹임 기반 사용자 선택 기법을 제안한다. 사용자 선택 기법에 대한 알고리즘은 다음과 같다.

단계 1: 기지국은 SINR 되먹임을 위해 빔형성 매트릭스 \mathbf{V}_b 를 이용하여 신호를 전송.

단계 2: 각 사용자 k 는 식 (7)에서의 \hat{I}_k^1 를 구하여 $\bar{\mathbf{V}}_b$ 를 구성.

단계 3: 사용자 k 는 $\bar{\mathbf{V}}_b$ 를 이용하여 식 (13)과 (14)에서의 SINR 값 \bar{I}_k^q 을 구한 후, 선택되었을 경우의 예상 통신 용량을 계산. 상수 값 α 와 전체 사용자수 K 값을 이용하여 기준 값을 설정하고 SINR \hat{I}_k^1 값을 되먹임 여부를 결정.

$$\sum_{q=1}^{N_T} \log_2(1 + \bar{I}_k^q) <$$

$N_T \log_2(1 + \alpha(\sigma_N^2)^{-1} \log KN_R)$ 라면^{[5][13]},

- $\hat{I}_k^1 = 0$ 으로 설정하고 되먹임 하지 않음.

그 외에는,

- \hat{I}_k^1 을 되먹임

단계 4: \hat{I}_k^1 을 기반으로 기지국은 최적의 통신 용량이 예상되는 사용자 k^* 를 선택

$$k^* = \arg \max_{k \in U} \log_2(1 + \hat{I}_k^1)$$

여기서 $U = \{1, \dots, K\}$ 는 기지국에 의해 선택 가능한 사용자 집합

단계 5: 기지국은 선택된 사용자 k^* 를 서비스하기 위한 $\bar{\mathbf{V}}_b$ 를 식 (11)과 (12)를 이용하여 구성

단계 6: 기지국은 빔형성 매트릭스 $\bar{\mathbf{V}}_b$ 를 이용하여 선택된 사용자 k^* 에게 서비스 신호를 전송

단계 1에서 기지국은 SINR 되먹임을 위하여 빔형성 매트릭스 \mathbf{V}_b 를 이용하여 각 사용자에게 신호를 전송 한다. 그 후, 단계 2에서는 각 사용자가 \mathbf{V}_b 에 의해 전송된 신호에 대한 SINR을 계산하고, 이로 인해 자신이 선택되었을 경우의 $\bar{\mathbf{V}}_b$ 를 구한다. 여기서 각 사용자가 $\bar{\mathbf{V}}_b$ 를 구하는 이유는 자신이 선택 되었을 경우의 통신 용량을 예상하기 위해서이다. 왜냐하면 기존의 랜덤 빔형성 기법과는 다르게

α 를 이용하여 기지국에서 $\bar{\mathbf{V}}_b$ 의 새로운 빔형성 매트릭스를 이용해 사용자를 서비스 하기 때문이다.

단계 3에서는 기존의 랜덤 빔형성 기법과는 달리 $\bar{\mathbf{V}}_b$ 에 대한 SINR \bar{I}_k^q 을 되먹임하지 않고, \mathbf{V}_b 에 대한 SINR 값인 \hat{I}_k^1 을 되먹임한다. 상수 값 α 와 전체 사용자 수 K 값을 이용하여 기준 값을 설정하여 각 사용자는 해당 기준값을 기반으로 되먹임 여부를 결정한다. 따라서 각 사용자는 기지국에서 자신을 선택하였을 경우, 자신이 되먹임한 \hat{I}_k^1 을 기반으로 변환한 빔형성 매트릭스인 $\bar{\mathbf{V}}_b$ 에 의해 도출되는 최종 sum-rate이 기준 값인

$N_T \log_2(1 + \alpha(\sigma_N^2)^{-1} \log KN_R)$ 보다 작으면 SINR 값을 되먹임 하지 않는다. 즉, 자신이 서비스 받을 경우, 높은 통신 용량을 얻기 어려운 것을 예상하고 동시에 되먹임한 SINR \hat{I}_k^1 값은 최종적으로 얻어지는 SINR 값인 \bar{I}_k^q 과 다른 값을 가지므로 이를 위해 이와 같은 단계를 수행 한다.

사용자 수가 많을 경우, 선택되는 사용자의 평균 sum-rate값이 증가하므로, 이를 반영하기 위해 전체 사용자 K 가 증가 할수록 sum-rate이 증가 할 수 있게 모델링한 $\log K$ 변수를 기준 값에 삽입한다. 즉, 사용자 수가 증가하면 그에 따라 가장 높은 채널 이득을 가지는 사용자의 채널 이득 값이 점점 증가 하므로 이를 반영하는 기준 값을 이용한다. 또한 송신 안테나수와 N_T 와 수신 안테나 수 N_R 가 증가 할수록 평균 통신 용량이 증가하며, SNR값에 의해서도 평균 통신용량은 증가한다. 기준 값인 $N_T \log_2(1 + \alpha(\sigma_N^2)^{-1} \log KN_R)$ 값은 DPC (dirty paper coding)에서의 전체 사용자 K 값에 따른 예상 통신 용량을 인용하여 구성 한다. DPC 값은 송신 단인 기지국에서 채널 정보를 완벽히 알고 있고, 간섭 영향을 완벽히 제거 하여 신호를 전송하는 방식이므로 제안하는 빔형성 기법보다 더 좋은 성능을 가진다. 따라서 상수 값인 α 값은 제안하는 빔형성 기법이 DPC 보다 좋은 성능을 보일 수 없으므로 이에 대한 성능 감소를 반영하는 값이다 ($0 < \alpha < 1$)^{[5][13]}. 최적의 α 값은 실험을 통해 구해진다.

단계 4에서 기지국은 \hat{I}_k^1 를 기반으로 최적의 예상 통신용량을 가지는 사용자 k^* 를 선택한다. 위에서 언급 하였듯이 \hat{I}_k^1 값은 최종적으로 얻어지는 실

제 $\bar{\Gamma}_k^q$ 값과 차이가 나므로 이와 같은 예상 통신 용량을 통해 사용자를 선택한다. 이어서 단계 5에서 기지국은 선택된 사용자 k^* 를 서비스하기 위한 $\bar{\mathbf{V}}_b$ 를 식 (11)과 (12)를 이용하여 구성한다. 마지막으로 단계 6에서는 빔형성 매트릭스 $\bar{\mathbf{V}}_b$ 를 이용하여 기지국이 선택된 사용자 k^* 에게 서비스 신호를 전송한다.

제안하는 빔형성 변환 기법에 대해 정리해보면, 해당 기법이 되먹임하는 SINR 정보에는 채널 벡터에 송신 가중치 벡터 성분의 절대 값이 어느 정도 포함 되어 있는지가 나타나 있다. 따라서 이를 이용해 선택된 사용자의 채널 매트릭스 \mathbf{V}_k 에 가까운 빔형성 매트릭스를 구성할 필요가 있다. 제안하는 사용자 선택기법에서 단계 2,3,5,6에서와 같이 $\bar{\mathbf{V}}_b$ 를 이용하면 사용자를 서비스 함으로서 이득을 얻는다. 따라서 제안하는 빔형성 변환 기법은 기존의 랜덤 빔형성기법에 비해 통신 용량에서 더 좋은 성능을 가진다. 이어지는 실험 결과에서 본 논문은 기존의 랜덤 빔형성 기법의 성능과 제안하는 빔형성 매트릭스 변환 기법의 성능을 비교한다.

본 논문에서 다중 사용자를 선택하지 않고 단일 사용자를 선택하는 이유는 다중 사용자를 선택하면 각 선택된 사용자들의 채널 매트릭스 \mathbf{V}_k 에 적합한 $\bar{\mathbf{V}}_b$ 를 효율적으로 구성 할 수 없기 때문이다. 따라서 단일 사용자를 선택한 후 해당 선택 단일 사용자의 채널 매트릭스 \mathbf{V}_k 에 적합한 $\bar{\mathbf{V}}_b$ 를 구성한다.

4.2. $N_T > 2$ 인 경우의 안테나 선택 기법

$N_T > 2$ 인 경우는, 사용자는 추정된 채널 정보를 기반으로 N_T 개의 송신 안테나 중 2개의 안테나를 선택한다. 2개의 선택한 안테나가 각각 i 와 j 번째 송신 안테나라면 이에 따른 채널 매트릭스는 다음과 같이 표시 할 수 있다.

$$\mathbf{H}_k^{i,j} = [\mathbf{h}_{k,i} \ \mathbf{h}_{k,j}] \quad (17)$$

여기서 $\mathbf{h}_{k,i}$ 와 $\mathbf{h}_{k,j}$ 는 \mathbf{H}_k 의 i 와 j 번째 열벡터이다. i 와 j 번째 송신 안테나의 선택에 따른 통신 용량은 다음과 같다.

$$C_{i,j} = \log_2 \left(1 + \frac{|\mathbf{u}_{k,1}^{i,j} \mathbf{H}_k^{i,j} \bar{\mathbf{v}}_{b,1}|^2}{|\mathbf{u}_{k,1}^{i,j} \mathbf{H}_k^{i,j} \bar{\mathbf{v}}_{b,2}|^2 + \sigma_N} \right) + \log_2 \left(1 + \frac{|\mathbf{u}_{k,2}^{i,j} \mathbf{H}_k^{i,j} \bar{\mathbf{v}}_{b,2}|^2}{|\mathbf{u}_{k,2}^{i,j} \mathbf{H}_k^{i,j} \bar{\mathbf{v}}_{b,1}|^2 + \sigma_N} \right) \quad (18)$$

따라서 최대의 통신 용량을 가지는 i 와 j 번째 송신 안테나를 선택하여 기지국에 되먹임 하며, 이를 통해 사용자를 서비스 한다.

V. 실험

성능 측정을 위한 실험을 위해 각 사용자는 완벽한 채널 정보를 알고 있다고 가정하고, 기지국은 각 사용자로부터 SINR 정보를 되먹임 받는다.

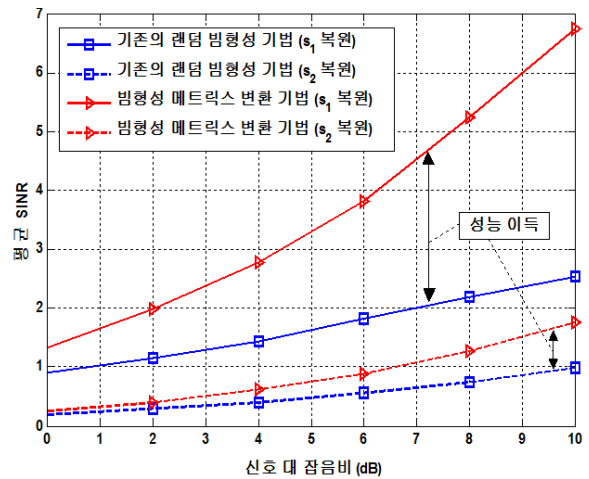


그림 2. 신호 대 잡음비에 따른 평균 SINR 값
Fig. 2. SINR according to SNR

그림 2는 2×2 다중 안테나 시스템에서 신호 대 잡음비에 따른 평균 SINR 값을 나타낸다. 기지국은 각 심볼에 대한 송신 빔형성 가중치 벡터에 동일한 파워를 할당한다. 복원 신호 \hat{s}_1 과 \hat{s}_2 에 대한 SINR은 식 (13)과 식 (14)에 나타나 있다. 제안하는 빔형성 매트릭스 변환 기법의 각 복원 신호에 대한 평균 SINR은 기존 랜덤 빔형성 기법보다 더 높은 값을 가진다. 신호 대 잡음비 값이 증가하면, 두 복원 신호에 대한 평균 SINR 값도 증가한다.

그림 3은 $N_T = 2, \|\bar{\mathbf{v}}_{b,1}\|^2 = 1, \|\bar{\mathbf{v}}_{b,2}\|^2 = 1$ 일 때, 신호 대 간섭 잡음비에 따른 평균 통신 용량을 나타낸다. 제안하는 빔형성 매트릭스 변환 기법은 송신 빔형성 가중치 벡터에 대한 절대 값 성분을 추출해 낸다. 따라서 기지국은 SINR 되먹임을 위해 사용하

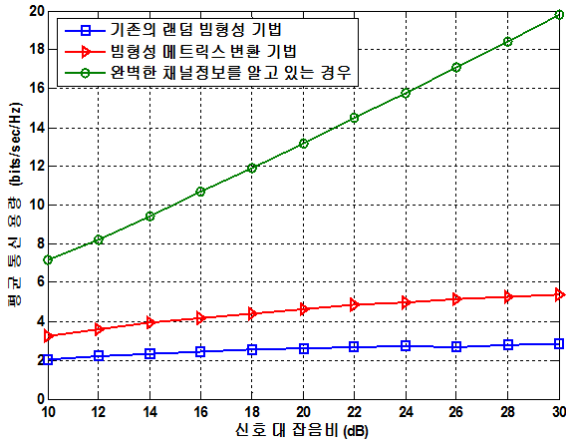


그림 3. 신호 대 잡음비에 따른 평균 통신 용량
Fig. 3. Average capacity with SNR

있던 V_b 보다 선택된 사용자의 채널 매트릭스 V_k^* 에 가까운 새로운 빔형성 매트릭스 \bar{V}_b 를 구성 할 수 있다. 그 결과, 제안하는 빔형성 매트릭스 변환 기법은 기존은 랜덤 빔형성 기법보다 더 좋은 성능을 가진다.

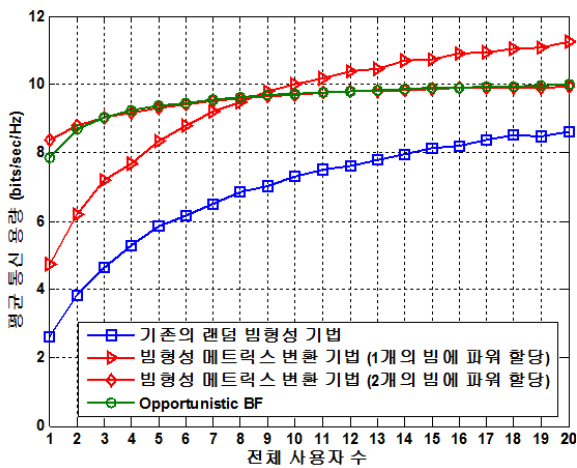


그림 4. 전체 사용자 수에 따른 평균 통신 용량
Fig. 4. Average capacity with number of users

그림 4는 $N_T=2$ 일 때, 전체 사용자 수에 따른 평균 통신 용량을 나타낸 것이다. 본 논문에서 기존의 랜덤 빔형성 기법과 제안하는 빔형성 매트릭스 변환 기법은 각 심볼에 동일한 파워를 할당한다고 가정한다. 그리고 제안하는 빔형성 매트릭스 변환 기법은 1개의 빔에 파워를 할당하는 경우와 ($\|\bar{v}_{b,1}\|^2 = N_T, \|\bar{v}_{b,2}\|^2 = 0$) 2개의 빔에 균등하게 파워를 할당하는 경우의 ($\|\bar{v}_{b,1}\|^2 = N_T, \|\bar{v}_{b,2}\|^2 = 0$) 성능을 보여 준다. 또한, 비교 대상인 Opportunistic

BF의 경우도 $\|\bar{v}_{b,1}\|^2 = N_T, \|\bar{v}_{b,2}\|^2 = 0$ 인 경우의 성능이다^[14]. 그림 4에서 보여지는 것과 같이 기존의 랜덤 빔형성 기법과 제안하는 빔형성 매트릭스 변환 기법 모두 전체 사용자 수가 증가 할수록 평균 통신 용량이 증가한다. 전체 사용자 수가 증가하면 채널 매트릭스와 송신 빔형성 매트릭스가 유사한 사용자를 선택할 수 있고, 높은 신호 대 잡음비를 가지는 사용자를 선택할 수 있으므로 그에 따른 다중 사용자 이득을 얻을 수 있다. 제안하는 빔형성 매트릭스 변환 기법이 전체 사용자 수에 관계없이 기존의 랜덤 빔형성 기법보다 더 좋은 성능을 가진다. Opportunistic BF의 경우, 1개의 빔에만 파워를 할당하기 때문에 전체 사용자 수가 적은 환경에서는 빔 벡터 사이의 간섭이 기존의 랜덤 빔형성 기법이나 2개의 빔에 파워를 할당하는 빔형성 매트릭스 변환 기법보다 간섭의 영향이 작아 더 좋은 평균 통신 용량을 가진다. 반면에 전체 사용자 수가 많은 환경에서는 채널 매트릭스와 송신 빔형성 매트릭스가 유사한 사용자를 선택할 수 있으므로 2개의 빔에 파워를 할당하는 빔형성 매트릭스 변환 기법이 Opportunistic BF보다 더 좋은 성능을 가진다.

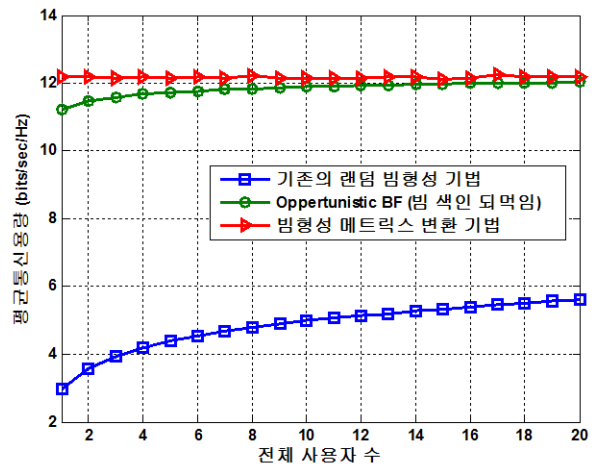


그림 5. 전체 사용자 수에 따른 평균 통신 용량
Fig. 5. Average capacity with number of users

그림 5는 $N_T=4, \|\bar{v}_{b,j}\|^2 = 1$ 일 때의 전체 사용자 수에 따른 평균 통신 용량을 나타낸다. 소단원 IV.2에서 제시한 안테나 선택 기법을 사용한 빔형성 매트릭스 변환 기법은 Opportunistic BF과 기존의 빔형성 기법보다 더 좋은 성능을 가진다. 또한 기존의 빔형성 기법은 동일한 파워를 빔에 할당할 경우에는 $N_T=4$ 인 경우가 $N_T=2$ 인 경우보다 빔간 간섭의 영향으로 더 낮은 성능을 가진다.

그림 6은 $N_T=2, \|\bar{\mathbf{v}}_{b,1}\|^2=1, \|\bar{\mathbf{v}}_{b,2}\|^2=1$ 일 때, α 값에 따른 평균 통신 용량을 나타낸다. 여기서는 앞의 실험 결과와 마찬가지로 2개의 송수신 안테나를 설치하고, 각 심볼에 동일한 파워를 할당한 경우를 가정한다. 정체 사용자 수 $K=10$ 인 경우 최적의 α 값은 약 0.06이다. 전체 사용자수가 증가 할수록, 선택되는 사용자에게 기대되는 평균 통신 용량도 증가하므로 전체 사용자 수가 증가함에 따라 최적의 α 값도 함께 증가한다.

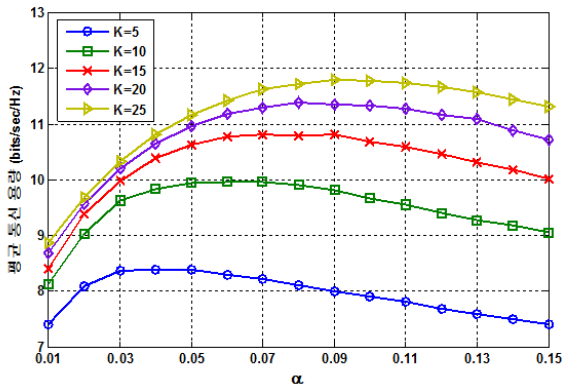


그림 6. α 값에 따른 평균 통신 용량
Fig. 6. Average capacity with α

VI. 결 론

기존의 랜덤 빔형성 기법은 사용자 수가 많을 경우, 다중 사용자 이득을 통해 높은 통신 성능을 얻는다. 하지만 사용자 수가 적은 마이크로 셀에서의 환경에서는 기존의 랜덤 빔형성 기법이 다중 사용자 이득을 얻기 어려우므로 좋은 성능을 가질 수 없다. 사용자 수가 적은 환경에서 높은 성능을 얻기 위해서 본 논문에서는 SINR 되먹임 정보를 기반으로 한 빔형성 매트릭스 변환 기법을 제안 하였다. 제안하는 기법은 송신 벡터의 절대값을 추정 하여 빔형성 매트릭스를 변환함으로써 기존의 랜덤 빔형성 기법 보다 이득을 얻는다. 따라서 기존의 랜덤 빔형성 기법보다 채널을 더 정확히 추정할 확률을 가진다. 기존의 랜덤 빔형성 기법에서와 같이 제안하는 기법 또한 SINR을 기반으로 사용자를 선택한다. 하지만 기존의 랜덤 빔형성 기법이 채널 매트릭스의 rank 수만큼의 SINR을 되먹임 하였다면, 제안하는 빔형성 매트릭스 변환 기법은 오직 하나의 SINR 값만을 되먹임한다. 따라서 2개의 안테나를 가정하였을 경우, 기존의 랜덤 빔형성 기법에 대비하여 절반의 SINR 되먹임 양을 가진다. 따라서 복

잡성 측면에서 제안하는 빔형성 매트릭스 변환 기법을 적용하기가 수월하다. 실험 결과를 통해 제안하는 빔형성 매트릭스 변환 기법이 기존의 랜덤 빔형성 기법보다 더 좋은 성능을 보이는 것을 보였다.

참 고 문 헌

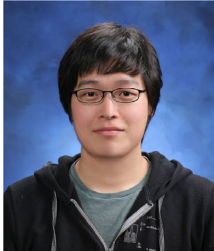
- [1] E. Dahlman, S. Parkvall, J. Skold, and P. Beming, 3G Evolution: HSPA and LTE for Mobile Broadband. Academic Press, 2007.
- [2] S. Sesia, I. Toufik, and M. Baker, LTE-The UMTS Long Term Evolution. Wiley, 2009.
- [3] F. Khan, LTE for 4G Mobile Broadband. Cambridge University Press, 2009.
- [4] S. Venkatesan and H. Huang, "System capacity evaluation of multiple antenna systems using beamforming and dirty paper coding," Bell Labs.
- [5] T. Yoo and A. Goldsmith, "On the optimality of multiantenna broadcast scheduling using zero-forcing beamforming," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 24, no. 3, pp. 528?541, Mar. 2006.
- [6] J. Chung, C.-S. Hwang, K. Kim, and Y. K. Kim, "A random beamforming technique in mimo systems exploiting multiuser diversity," IEEE J. Sel. Areas Commun., vol. 21, no. 5, pp. 848?855, Jun. 2003.
- [7] M. Sharif and B. Hassibi, "On the capacity of mimo broadcast channels with partial side information," IEEE Trans. Inform. Theory, vol. 51, no. 2, pp. 506?522, Feb. 2005.
- [8] C. Au-Yeung and D. J. Love, "On the performance of random vector quantization limited feedback beamforming in a miso system," IEEE Trans. Wireless Commun, vol. 6, no. 2, pp. 458?462, Feb. 2007.
- [9] J. Vicario, R. Bosisio, C. Anton-Haro, and U. Spagnolini, "Beam selection strategies for orthogonal random beamforming in sparse networks," IEEE Trans. Wireless Commun, vol. 7, no. 9, pp. 3385?3396, Seb. 2008.
- [10] D. Bartolome and A. Perez-Neira, "Mean vs. variance trade-off analysis in multi-antenna multi-user channels," IEEE Trans. Wireless

Commun, vol. 5, no. 3, pp. 519-524, Mar. 2006.

- [11] Q. Spencer, A. L. Swindlehurst, and M. Haardt, "Zero-forcing methods for downlink spatial multiplexing in multiuser MIMO channels," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 52, no. 2, pp. 461-471, Feb. 2004.
- [12] K. Huang, "Performance of orthogonal beamforming for SDMA with limited feedback," *IEEE Trans. Vehicular Technology*, vol. 51, no. 2, pp. 506-522, Jan. 2009.
- [13] M. Sharif and B. Hassibi, "A comparison of time-sharing, DPC, and beamforming for MIMO broadcast channels with many users," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 55, no. 1, pp. 11-15, Jan. 2007.
- [14] P. Viswananth, D. Tse, and R. Laroia, "Opportunistic beamforming using dumb antennas," *IEEE Trans. Inform. Theory*, vol. 48, pp. 1277-1294, June 2002.

Jongrok Park

Regular Member



He was born in Korea in 1983. He received his B.S. degree in Electrical and Electronic Engineering from Yonsei University, Seoul, Korea in 2007 and he is currently pursuing the Ph. D. degree in Wireless Network

Laboratory from Yonsei University, Seoul, Korea. His research interests include multiuser MIMO systems, cooperative communications and ad-hoc networks.

Sanghoon Lee

Lifelong Member



He was born in Korea in 1966. 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.