

Block Diagonalization을 사용하는 하향링크 시스템에서의 MU-MIMO 사용자 스케줄링 기법

김 경 훈*

Novel User Selection Algorithm for MU-MIMO Downlink System with Block Diagonalization

Kim Kyunghoon

〈Abstract〉

Multi-User Multiple-Input Multiple-Output (MU-MIMO) is the core technology for improving the channel capacity compared to Single-User MIMO (SU-MIMO) by using multiuser gain and spatial diversity. Key problem for the MU-MIMO is the user selection which is the grouping the users optimally. To solve this problem, we adopt Extreme Value Theory (EVT) at the beginning of the proposed algorithm, which defines a primary user set instead of a single user that has maximum channel power according to a predetermined threshold. Each user in the primary set is then paired with all of the users in the system to define user groups. By comparing these user groups, the group that produces a maximum sum rate can be determined. Through computer simulations, we have found that the proposed method outperforms the conventional technique yielding a sum rate that is 0.81 bps/Hz higher when the transmit signal to noise ratio (SNR) is 30 dB and the total number of users is 100.

Key Words : MU-MIMO, User Selection, Sum Rate, EVT, Block Diagonalization Precoding

I. 서론

Multi-User Multiple-Input Multiple-Output (MU-MIMO) 기술은 Single-User Multiple-Input Multiple-Output (SU-MIMO) 기술과 비교하여 MU-MIMO가 가지고 있는 많은 장점들로 지난 수 십

년간 활발하게 연구되어 왔다[1,13-14]. MU-MIMO 기술이 적용된 기지국은 같은 시간, 같은 주파수 자원을 이용하여 다수 사용자에게 동시에 데이터를 전송할 수 있다[2]. 기지국이 다수의 사용자에게 동시에 데이터를 전송하기 위해서는 사용자간 간섭 신호를 제거 할 수 있는 프리코딩 기법이 적용되어야 한다. 최적의 프리코딩 기법으로 잘 알려진 Dirty

* SK텔레콤 New Mobility TF, Manager

Paper Coding (DPC) 프리코딩 기법을 사용하면 전송률 합은 기지국의 안테나 수에 비례하여 증대된다 [3]. 하지만, 비현실적인 복잡성으로 실시간 시스템으로 구현하기 불가능하다. MU-MIMO 하향링크 시스템에서 DPC 프리코딩을 대체할 수 있는 대표적인 프리코딩 기법으로 Block Diagonalization (BD) 기법이 있다[4]. BD 프리코딩 기법은 각각의 사용자 프리코딩 행렬을 해당 사용자 외에 다른 모든 사용자의 영공간에 놓이게 함으로써, 다중 사용자 간섭을 완벽히 제거 할 수 있다. 기지국의 총 안테나 수는 데이터를 전송 받는 사용자들의 총 안테나 수보다 클 수 없기 때문에, 기지국에서 동시에 데이터를 전송할 수 있는 사용자의 수는 제한적이다. 여기서, MU-MIMO 시스템의 핵심 이슈인, 많은 사용자들 가운데 동시에 데이터를 전송 받는 사용자 그룹을 어떻게 선택해야 하는가에 대한 사용자 선택 문제가 발생된다.

최적의 사용자 선택 방법 즉, 최대의 전송률 합 성능을 갖는 사용자 선택 방법은 전체 사용자 수와 선택될 수 있는 사용자 수로 만들어질 수 있는 모든 경우의 수를 고려하는 Full Search (FS) 방법이다. 하지만, FS 방법은 선택될 수 있는 사용자의 수가 증가함에 따라 최적의 사용자 그룹을 계산하는 복잡도가 지수적으로 증가하는 문제가 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해, 전송률 합과 복잡도 간의 trade-off를 고려한 다양한 사용자 선택 알고리즘들이 개발되었다[5-9]. [5]의 저자들은 모든 사용자들의 안테나가 1개인 상황에서, Semi-orthogonal User Selection (SUS) 알고리즘을 제안하였다. [5]에서 제안한 SUS는 선택 가능한 사용자들의 채널 frobenius norm 값들 가운데 가장 큰 값을 갖는 사용자를 최초 사용자로 선택한다. 그 후, 최초 사용자와 임의의 threshold 이상의 직교성을 갖는 사용자들 중, 채널의 frobenius norm 값이 가장 큰 사용자

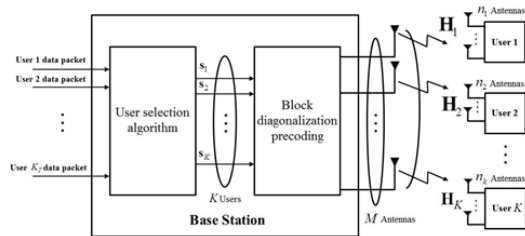
를 next user로 선택하여 동시에 데이터를 전송 받을 수 있는 사용자 그룹을 순차적으로 선택한다. 하지만, 채널 크기가 가장 크기 때문에 선택된 최초 사용자가 최적의 사용자 그룹에 포함된다는 보장은 할 수 없다. [6]은 이와 같은 SUS 알고리즘의 단점을 보완하기 위해, 최초 사용자를 하나의 사용자가 아닌 최초 사용자로 선택될 수 있는 여러 후보 사용자들을 포함한 최초 사용자 그룹을 고려하였다[7]. 이는 SUS 알고리즘을 모든 사용자의 안테나 수가 복수 개인 상황을 고려하였다. [8]에서는 사용자들의 안테나 수가 복수 개인 상황에서, Capacity-Based Suboptimal User Selection (CBSUS) 알고리즘을 제안하였다. CBSUS는 사용자를 선택할 때 전송률 합을 기준으로 사용하는 방법이다. CBSUS의 전송률 합은 FS 방법으로 얻을 수 있는 전송률 합에 약 95%에 해당하는 전송률 합 성능을 갖는다. [9]에서는 Gram-Schmidt orthogonalization을 이용하여 CBSUS에 비해 낮은 전송률 합을 갖지만, CBSUS의 계산량 보다 낮은 계산량을 갖는 알고리즘을 제안하였다.

본 논문의 핵심은 모든 사용자가 복수 개의 안테나를 갖춘 상황에서, [7-9]에서 제안하는 방법의 전송률 합 보다 우수한 성능을 갖는 사용자 선택 알고리즘을 제안한다. 본 논문에서 제안하는 사용자 선택 알고리즘은 순차적으로 사용자를 선택할 때 이전 사용자를 잘못 선택하면 즉, 최적의 사용자 그룹에 포함되지 않은 사용자를 선택한다면, 다음 사용자의 선택 역시 최적의 사용자 그룹에 포함될 수 없다는 기존 사용자 선택 방법들의 약점을 공략하였다. 순차적으로 사용자를 선택하기 위해 첫 번째 사용자를 선택할 때 단일 사용자만 선택하는 것이 아니라, 특정 기준에 의거한 최초 사용자 그룹을 선택함으로써 기존 사용자 선택 방법의 문제점을 최소화하였다. 최초 사용자 그룹에 포함된 사용자들이 모두 첫 번

제 사용자의 역할을 할 수 있도록 반복하여, 최초 사용자 그룹에 포함된 사용자 수 만큼의 선택된 그룹을 얻고, 그 중 가장 높은 전송률 합 성능을 갖는 사용자 그룹을 최종 사용자 그룹으로 선택한다. 결국, 제안하는 사용자 선택 알고리즘의 전송률 합은 최적의 FS 방법의 전송률 합과 거의 유사하고, 기존의 사용자 선택 방법들의 전송률 합 보다 우수한 전송률 합을 갖는다.

II. System model

본 절에서는 본 논문에서 고려하는 MU-MIMO 하향링크 시스템의 구성을 소개한다. 또, 사용자의 수신 신호를 디코딩하는 과정을 통해 시스템 전송률 합 계산식을 도출한다.



〈그림 1〉 고려하는 시스템 모델

그림 1은 복수개의 안테나를 갖춘 사용자를 고려한 MU-MIMO 하향링크 시스템의 구조도를 나타낸다. 앞서 설명했듯이, 기지국에서 동시에 전송할 수 있는 데이터는 한계가 있기 때문에 명의 사용자 가운데 적절한 사용자 선택 알고리즘에 의해 k 명의 사용자가 선택된다. 선택된 k 명의 사용자에 대한 데이터는 BD 프리코딩을 거쳐 M 개의 기지국 안테나를 통해 전송된다. n_j ($n_j \geq 2$)는 k 명의 선택된 사용자들 가운데 j -th사용자의 안테나 수를 뜻하고,

\mathbf{H}_j 는 기지국과 j -th사용자 사이의 채널을 뜻한다. 이때, $\mathbf{H}_j \in \mathbb{C}^{n_j \times M}$ 이고, $\mathbb{C}^{n_j \times M}$ 는 $n_j \times M$ 의 차원을 갖는 행렬로, 각각의 값은 평균이 0이고 분산이 1을 따르는 가우시안 분포의 복소수 확률 변수이다. \mathbf{s}_j 는 기지국에서 j -th사용자를 위해 생성한 데이터로, $\mathbf{s}_j \in \mathbb{C}^{n_j \times 1}$ 를 만족한다.

선택된 k 명의 사용자 중 임의의 사용자의 수신 신호를 살펴보고, 수신 신호를 복호화 하는 과정을 통해 시스템 전송률 합 식을 유도해보겠다. 그림 1의 시스템 모델에서, j -th사용자의 수신신호 \mathbf{y}_j 는 식 (1)과 같다.

$$\mathbf{y}_j = \mathbf{H}_j \mathbf{P}_j \mathbf{s}_j + \sum_{k=1, k \neq j}^K \mathbf{H}_k \mathbf{P}_k \mathbf{s}_k + \mathbf{w}_j \quad (1)$$

식 (1) 우변의 첫 번째 항은 j -th사용자에게 전송될 희망신호로, 기지국에서 j -th사용자에게 보내려고 하는 데이터가 프리코더에 적용되어 채널 \mathbf{H}_j 를 통해 j -th사용자에게 수신된다. 식 (1) 우변의 두 번째 항은 term은 j -th사용자에게 수신되는 간섭신호로, k 명의 선택된 사용자 중 j -th사용자 이외의 사용자에 전송하고자 하는 데이터로 야기되는 간섭신호이다. \mathbf{w}_j 는 부가 백색 가우스 잡음으로, $E[\mathbf{w}_j \mathbf{w}_j^H] = \sigma_w^2 \mathbf{I}$ 를 만족한다. 프리코더 \mathbf{P}_j 는 BD를 사용하는데, BD는 사용자들이 공통의 자원을 공유하면서 발생하는 간섭신호를 완벽히 제거할 수 있다. 즉, 식(2)를 만족한다.

$$\mathbf{H}_i \mathbf{P}_j = 0 \text{ for all } i \neq j \text{ and } 1 \leq i, j \leq k \quad (2)$$

기지국에서 프리코더로 BD를 사용하였을 때, k 명의 선택된 사용자에 대한 전송률 합 식을 도출해보겠다. 먼저, $\tilde{\mathbf{H}}_j$ 를 식 (3)과 같이 정의하겠다.

$$\tilde{\mathbf{H}}_j = [\mathbf{H}_1^T \mathbf{H}_2^T \cdots \mathbf{H}_{j-1}^T \mathbf{H}_{j+1}^T \cdots \mathbf{H}_K^T]^T \quad (3)$$

식 (2)를 살펴봤을 때, \mathbf{P}_j 는 $\tilde{\mathbf{H}}_j$ 의 영공간(null

space)에 포함되어야 한다. $\tilde{\mathbf{H}}_j$ 의 영공간을 구하기 위해서, $\tilde{\mathbf{H}}_j$ 에 대해 특이값 분해(Singular Value Decomposition, SVD)를 수행한다.

$$\tilde{\mathbf{H}}_j = \tilde{\mathbf{U}}_j \tilde{\mathbf{\Lambda}}_j \tilde{\mathbf{V}}_j^H = \tilde{\mathbf{U}}_j \tilde{\mathbf{\Lambda}}_j [\tilde{\mathbf{V}}_j^{(1)} \tilde{\mathbf{V}}_j^{(2)}]^H \quad (4)$$

식 (4)에서, 유니테리 행렬 $\tilde{\mathbf{U}}_j$ 의 각 열은 $\tilde{\mathbf{H}}_j$ 의 left-hand side singular vector이고, 대각행렬 $\tilde{\mathbf{\Lambda}}_j$ 는 $\tilde{\mathbf{H}}_j$ 의 특이값을 포함한다. 그리고, 유니테리 행렬 $\tilde{\mathbf{V}}_j^H$ 의 각 행은 $\tilde{\mathbf{H}}_j$ 의 right-hand side singular vector이다. 식 (4)에서 $\tilde{\mathbf{V}}_j^H$ 는 $\tilde{\mathbf{V}}_j^{(1)}$ 과 $\tilde{\mathbf{V}}_j^{(2)}$ 의 연결(concatenation)로 표현되는데, $\tilde{\mathbf{L}}_j$ 를 $\tilde{\mathbf{H}}_j$ 의 랭크라고 할 때, $\tilde{\mathbf{V}}_j^{(1)}$ 는 $\tilde{\mathbf{V}}_j^H$ 의 첫 번째 열부터 $\tilde{\mathbf{L}}_j$ 번째 열로 구성된 행렬을 뜻하고, $\tilde{\mathbf{V}}_j^{(2)}$ 는 $\tilde{\mathbf{V}}_j^H$ 의 $\tilde{\mathbf{L}}_j + 1$ 번째 열부터 M 번째 열로 구성된 행렬을 뜻한다. 이때, $\tilde{\mathbf{V}}_j^{(2)}$ 는 $\tilde{\mathbf{H}}_j$ 의 영공간의 직교기저(orthogonal basis)로 구성된다. $\mathbf{H}_j \tilde{\mathbf{V}}_j^{(2)}$ 를 SVD 하면 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{H}_j \tilde{\mathbf{V}}_j^{(2)} = \mathbf{U}_j^{(s)} \mathbf{\Lambda}_j^{(s)} \mathbf{V}_j^{(s)H} \quad (5)$$

식 (4)와 (5)를 통해, BD precoder \mathbf{P}_j 는 $\tilde{\mathbf{V}}_j^{(2)} \mathbf{V}_j^{(s)}$ 로 정의할 수 있고, 각 사용자의 receive filter \mathbf{M}_j 는 $\mathbf{U}_j^{(s)H}$ 로 정의할 수 있다. 각 사용자의 복호화된 신호 \mathbf{x}_j 는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \mathbf{x}_j &= \mathbf{M}_j \mathbf{H}_j \mathbf{P}_j \mathbf{s}_j + \mathbf{M}_j \mathbf{w}_j \\ &= \mathbf{U}_j^{(s)H} \mathbf{H}_j \tilde{\mathbf{V}}_j^{(2)} \mathbf{V}_j^{(s)} \mathbf{s}_j + \mathbf{U}_j^{(s)H} \mathbf{w}_j \\ &= \mathbf{U}_j^{(s)H} \mathbf{U}_j^{(s)} \mathbf{\Lambda}_j^{(s)} \mathbf{V}_j^{(s)H} \mathbf{V}_j^{(s)} \mathbf{s}_j + \mathbf{U}_j^{(s)H} \mathbf{w}_j \\ &= \mathbf{\Lambda}_j^{(s)} \mathbf{s}_j + \mathbf{U}_j^{(s)H} \mathbf{w} \end{aligned} \quad (6)$$

결국, k 명의 선택된 사용자의 전송률 합 R 은 식 (6)을 통해 식 (7)과 같이 표현할 수 있다.

$$R = \sum_{j=1}^k \log_2 \det \left(\mathbf{I} + \frac{(\mathbf{\Lambda}_j^{(s)})^2}{\sigma_w^2} \right) \quad (7)$$

다음 절에서는 그림 1의 시스템 모델에서, 식 (7)에서 도출한 전송률 합을 최대화 할 수 있는 사용자 선택 알고리즘을 제안한다.

III. 제안하는 알고리즘

본 절에서는 기지국이 BD 프리코딩을 사용하는 MU-MIMO 하향링크 시스템에서 전송률 합을 최대화 할 수 있는 사용자 선택 알고리즘을 소개한다. 기존 사용자 선택 방법들[7-9]은 순차적으로 사용자를 선택함에 있어서 최초 사용자를 잘못 선택하면 다음 사용자의 선택이 잘못될 수 있다는 문제가 있다. 다시 말해서, 첫 번째 사용자를 가장 큰 전송용량[8-9] 혹은 가장 큰 행렬값[7]으로 정하여 다음 사용자를 선택할 때, 첫 번째 사용자가 항상 최대의 전송률 합 값을 갖는 최적의 사용자 그룹에 포함된다고 보장할 수 없다. 본 논문에서 제안하는 사용자 선택 알고리즘은 첫 번째 사용자를 선택할 때 단일 사용자만 선택하는 것이 아니라, 특정 기준에 의거한 최초 사용자 그룹을 선택함으로써 기존 사용자 선택 방법의 약점을 최소화하였다. 자세한 사용자 선택 과정은 아래와 같다.

Step 1: 기지국은 각 사용자들로부터 채널정보 ($\mathbf{H}_k, k=1, 2, \dots, K_T$) 및 $\mathbf{H}_k \mathbf{H}_k^H$ 의 eigen values ($\lambda_k^n, n=1, 2, \dots, n_k, k=1, 2, \dots, K_T$)을 수신한다.

Step 2: 초기 사용자 그룹 z 를 다음과 같은 3개의 sub-steps에 따라 결정한다.

1) 첫 번째 사용자를 선택하는 기준을 $\det(\mathbf{H}_k \mathbf{H}_k^H)$ [7]로 한다. 이때, $\det(\mathbf{H}_k \mathbf{H}_k^H)$ 는 [10]에 의해 식(8)을 만족한다.

$$\det(\mathbf{H}_k \mathbf{H}_k^H) \leq \left(\frac{\text{tr}(\mathbf{H}_k \mathbf{H}_k^H)}{n_k} \right)^{n_k} \quad (8)$$

$$\text{식 (8) 우변 } \text{tr}(\mathbf{H}_k \mathbf{H}_k^H) \text{ 은 } \text{tr}(\mathbf{H}_k \mathbf{H}_k^H) = \sum_{n=1}^{n_k} \lambda_k^n$$

[11]이고, $\sum_{n=1}^{n_k} \lambda_k^n$ 의 최대값에 대한 경계값은 식 (9)

를 만족한다[10].

$$a \leq \max \sum_{n=1}^{n_k} \lambda_k^n \leq b$$

where $1 \leq k \leq K_T$

$$a = \log K_T + (n_k^2 - 2) \log \log K_T + \log \log \log K_T$$

$$b = \log K_T + n_k^2 \log \log K_T + \log \log \log K_T \quad (9)$$

2) K_T 명의 사용자 중 어떤 사용자가 최초 사용자 그룹에 포함될 수 있는지 결정하기 위해, 각 사용자의 $\det(\mathbf{H}_k \mathbf{H}_k^H)$ 이 특정 문턱값 보다 큰지 작은지 판단해야 한다. 본 논문에서는 그 문턱값 μ 을 식 (9)의 a 값으로 정한다. 다시 말해, 최초 사용자 그룹에 포함된 사용자들의 $\det(\mathbf{H}_k \mathbf{H}_k^H)$ 은 $\det(\mathbf{H}_k \mathbf{H}_k^H)$ 의 최대값에 대한 최소값 보다 큰 사용자들의 집합이다.

3) μ 를 이용하여, 최초 사용자 그룹 (z)을 식 (10)과 같이 선택한다.

$$\begin{aligned} z &= \{k | \det(\mathbf{H}_k \mathbf{H}_k^H) > \mu\}, k = 1, 2, \dots, K_T \\ &= \{z_1, z_2 \dots z_r\}, 1 \leq z_1, z_2 \dots z_r \leq K_T \end{aligned} \quad (10)$$

Step 3: 최초 사용자 그룹에서 첫 번째 사용자를 선택하고, 전송률 합 값이 최대가 될 수 있는 다음 사용자를 선택한다. 최초 사용자 그룹내에 있는 모

든 사용자가 첫 번째 사용자가 될 수 있도록 반복한다. 자세한 과정은 다음의 9개의 sub-step을 통해 설명한다.

1) 초기화:

$$T_1 = \{1, 2, \dots, K_T\} \quad (11)$$

$$Z = \{z_1, z_2, \dots, z_r\} \quad (12)$$

$$i = j = 1 \quad (13)$$

2) 최초 사용자 그룹으로써, $\pi(j)$ 를 선택하고, S_i 를 업데이트한다.

$$\pi(j) = z_i \quad (14)$$

$$S_i = \Phi \quad (15)$$

$$S_i = S_i \cup \{\pi(j)\} \quad (16)$$

3) 각각의 사용자에 대해 $\{\mathbf{G}_{(1)}, \dots, \mathbf{G}_{(j)}\}$ 과 직교성을 갖는 행렬 \mathbf{G}_k 를 계산한다.

$$\begin{aligned} \mathbf{G}_k &= \mathbf{H}_k - \sum_{l=1}^j \mathbf{H}_k \tilde{\mathbf{B}}_{(l)} \tilde{\mathbf{B}}_{(l)}^H, \\ &(k \in T_j, k \notin \pi(j)) \end{aligned} \quad (17)$$

식 (17)은 $\{\mathbf{G}_{(j)}, 1 \leq j \leq n(S_i)\}$ 와 직교한 성분을 구하는 식이다[7]. $\tilde{\mathbf{B}}_{(l)}$ 는 $\mathbf{G}_{(j)}$ 를 SVD한 식 $\mathbf{G}_{(j)} = \mathbf{U}_{(j)} \Lambda_{(j)} \mathbf{B}_{(j)}^H$ 에서 $\mathbf{B}_{(j)}$ 의 처음 n_k 개의 열로 이루어진 행렬이다.

4) T_j 를 식 (18)과 같이 업데이트 해준다.

$$T_{j+1} = \{k \in T_j, k \notin \pi(j)\}$$

$$\frac{\|\mathbf{H}_k \mathbf{G}_{(j)}^H\|_F^2}{\det(\mathbf{H}_k \mathbf{H}_k^H) \cdot \det(\mathbf{G}_{(j)} \mathbf{G}_{(j)}^H)} < \alpha \} \quad (18)$$

다음 사용자를 선택할 때 선택할 수 있는 사용자를 식 (18)과 같이 업데이트 된 집합 T_{j+1} 에서 고려하는데, 그 이유는 이전에 선택된 사용자들의 채널 정보와 직교한 채널을 갖는 사용자들 중에 다음 사용자를 선택하기 위함이다.

5) $j+1$ 번째 사용자를 선택하고, S_i 와 $\mathbf{G}_{(j)}$ 를 업데이트한다.

$$\pi(j+1) = \operatorname{argmax}_{k \in T_{j+1}} \det(\mathbf{G}_k \mathbf{G}_k^H) \quad (19)$$

$$S_i = S_i \cup \{\pi(j+1)\} \quad (20)$$

$$\mathbf{G}_{(j)} = \mathbf{G}_{\pi(j)} \quad (21)$$

6) $n(S_i) < K$ 라면, $j = j+1$ 을 하고 Step 3의 3)으로 이동한다.

7) S_i 의 전송률 합 (R_i)를 식 (7)을 이용해서 계산한다.

8) $i < n(Z)$ 라면, $i = i+1$, $j = 1$ 로 셋팅하고 Step 3의 2)로 이동한다.

9) 가장 큰 전송률 합 (R_i)을 갖는 i_{opt} 를 찾아, i_{opt} 에 해당하는 사용자 그룹을 최종 최적 사용자 그룹으로 선택한다.

$$i_{opt} = \operatorname{argmax}_{1 \leq i \leq n(Z)} \{R_i\} \quad (22)$$

$$U_{opt} = S_{i_{opt}} \quad (23)$$

결국, Step 1~3에 따라 U_{opt} 를 최적의 사용자 그룹으로 찾게 된다.

IV. 실험결과

본 절에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 제안하는 사용자 선택 방법의 전송률 합을 살펴본다. 먼저, 제안하는 알고리즘의 전송률 합을 앞서 설명한 기존 알고리즘들의 전송률 합과 비교하였다. 비교하고자 하는 기존 알고리즘은 아래와 같다.

Full search (FS)

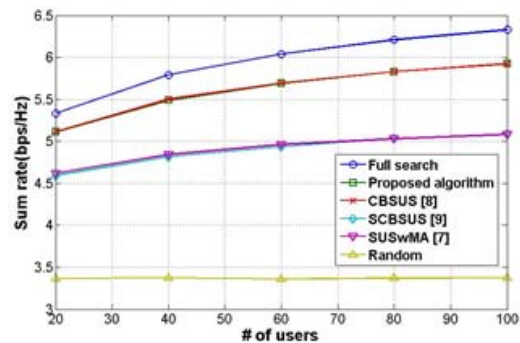
Capacity-Based Suboptimal User Selection (CBSUS) [8]

Simplified Capacity-Based Suboptimal User Selection (SCBSUS) [9]

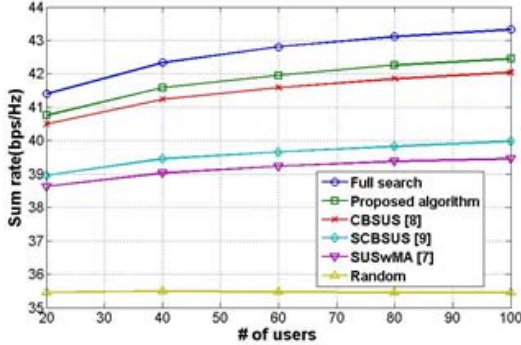
Semi-orthogonal User Selection with Multiple Antenna mobile user (SUSwMA) [7]

Random User Selection

본 절에서 소개하는 컴퓨터 시뮬레이션은 몇 가지 가정이 있다. 첫째, 사용자의 채널 추측이 완벽하고, 기지국에서는 모든 사용자의 채널 정보를 완벽히 알고 있다. 둘째, 기지국에서 사용자들에게 동등한 파워 분배를 수행하였다. 셋째, 사용자간 채널 그리고 임의의 사용자의 안테나 간 채널은 서로 독립적이다. 마지막으로, 모든 사용자의 안테나 수는 동일하다. 즉, $n_k = N$, $k = 1, 2, \dots, K_T$ 이다.



<그림 2> 낮은 SNR일 때 사용자 수에 따른 전송률 합



〈그림 3〉 높은 SNR일 때 사용자 수에 따른 전송률 합

그림 2, 3은 각각 기지국의 안테나 수가 4이고 모든 사용자의 안테나 수가 2일 때, 사용자 수 증가에 따른 전송률 합을 나타낸다. 그림 2는 모든 사용자의 SNR이 0dB인 낮은 SNR의 경우이고, 그림 3은 모든 사용자의 SNR이 30dB인 높은 SNR의 경우이다. Figure 2와 3에서 볼 수 있듯이, 제안하는 방법이 SCBSUS [9]와 SUSwMA [7] 알고리즘보다 우수한 성능을 보임을 알 수 있다. 제안하는 방법과 CBSUS [8] 알고리즘을 비교해보면, 낮은 SNR인 경우 제안하는 알고리즘과 CBSUS 알고리즘의 성능은 거의 유사하지만 높은 SNR인 제안하는 방법이 CBSUS 방법보다 성능이 우월함을 알 수 있다. 그 이유는 CBSUS 알고리즘의 사용자를 선택하는 기준에 있다.

$$\max_{1 \leq i \leq K_r} \log \det \left(\mathbf{I} + \frac{1}{\sigma_w} \mathbf{H}_i \mathbf{Q}_i \mathbf{H}_i^H \right)$$

CBSUS의 사용자 선택 기준은 [8]인데 SNR이 증가함에 따라 \mathbf{Q}_i 의 대각 성분이 커지게 되고, 사용자를 선택하는데 있어서 \mathbf{H}_i 의 효율성이 상대적으로 감소되는 것을 알 수 있다. 다시 말해서, CBSUS의 기준에서 \mathbf{H}_i 자체뿐만 아니라 사용자간 채널의 관계 등과 같은 CBSUS의 기준에서 반영하지 못한 요소의 영향이 커진다. 그 결과 SNR이 30dB인 경

우 선택될 수 있는 사용자 수가 100명인 경우, 제안하는 알고리즘의 전송률 합이 CBSUS의 전송률 합 보다 약 0.40bps/Hz 높은 것을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문은 사용자들이 복수개의 안테나를 갖추고 있고, 기지국이 BD 프리코딩을 사용하는 MU-MIMO 하향링크 시스템에서 전송률 합을 향상시킬 수 있는 사용자 선택 알고리즘을 제안하였다. 기존의 사용자 선택 알고리즘들은 순차적으로 사용자를 선택 할 때, 최초 사용자를 오직 한 명만 선택한다. 최초 사용자가 최적의 사용자 그룹에 포함되지 않는다면, 최초 사용자를 기반으로 순차적으로 선택되는 사용자들의 전송률 합은 항상 최적의 값을 갖지 못하는 문제가 있다. 제안하는 사용자 선택 알고리즘은 첫 번째 사용자를 선택할 때 단일 사용자만 선택하는 것이 아니라, 특정기준에 의거한 최초 사용자 그룹을 선택함으로써 기존 사용자 선택 방법의 문제점을 최소화하였다. 컴퓨터 시뮬레이션을 통해, SNR이 30dB이고, 전체 사용자의 수가 100명 그리고 동시에 데이터를 전송할 수 있는 사용자의 수가 2명인 경우 제안하는 방법의 전송률 합이 기존 CBSUS의 전송률 합 보다 약 0.81bps/Hz 높은 것을 알 수 있었다.

Acknowledgement

“본 연구는 국토교통부 교통물류연구개발사업의 연구비지원(18TLRP-B101406-04)에 의해 수행되었습니다.”

참고문헌

- [1] D. Gesbert, M. Kountouris, R.W. Heath, Chan-Byoung Chae, T. Salzer, "Shifting the MIMO paradigm," *IEEE Signal Processing Magazine*, vol. 24, Sept. 2007, pp.36-46.
- [2] D. Tse and P. Viswanath, *Fundamentals of Wireless Communication*. Cambridge University Press, 2004.
- [3] M. H. M. Costa, "Writing on dirty paper," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 29, May 1983, pp. 439-441.
- [4] Q. H. Spencer, A. L. Swindlehurst, and M. Haardt, "Zero-forcing methods for downlink spatial multiplexing in multiuser MIMO channels," *IEEE Trans. Signal Process.*, vol. 52, Feb. 2004, pp. 461-471.
- [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, Mar. 2006, pp.528-541.
- [6] T. Oh, S. Hyeon, H. Go, S. Choi, "A user selection algorithm providing maximum sum-rate for multiuser mimo system," *IEICE Trans. on Commun.*, vol.E93-B, No.5, May 2010, pp.1302-1305.
- [7] S. Kaviani and W. A. Krzymie'n, "User selection for multiple-antenna broadcast channel with zero-forcing beamforming," in *Proc. IEEE GLOBECOM*, New Orleans, LA, USA, Dec. 2008.
- [8] Z. Shen, J. G. Andrews, R. W. Heath Jr. and B.L. Evans, "Low complexity user selection algorithms for multiuser MIMO systems with block diagonalization," *IEEE Trans. Signal Processing*, Vol. 54, No. 9, 2006, pp.3658-3663.
- [9] Y. Chang and K. Araki, "Simplified capacity-based user scheduling algorithm for multiuser MIMO systems with block diagonalization," *IEICE Trans. on Commun.*, vol. E94-B, no. 10, Oct. 2011, pp.2837-2847.
- [10] M. Sharif and B. Hassibi, "On the capacity of mimo broadcast channel with partial side information," *IEEE Trans. Inf. Theory*, Vol. 51, No. 2, 2005, pp.506-522.
- [11] G. Strang, "Linear Algebra and Its Applications," Brooks/Cole, 2006, pp.237-240.
- [12] G. H. Golub and C. F. Van Loan, *Matrix Computations*, 3rd ed. Baltimore, MD: The John Hopkins Univ. Press, 1996. Wolfgang Pree, "Object-oriented Design Patterns," *Lecture Notes In Computer Science*, Vol.133, No.24, Springer-Verlag, 1997, pp.266-274.
- [13] 한연규, 양현욱, 김경훈, 최승원, "LTE 기반 MU-MIMO 시스템에 구현한 빔포밍 알고리즘," *디지털산업정보학회 논문지*, 제8권, 제4호, 2012, pp.121-127.
- [14] 이승학, 김경훈, 안치영, 최승원, "GPU를 이용한 SDR 시스템 용 LTE MIMO 기지국 기능 구현," *디지털산업정보학회 논문지*, 제8권, 제4호, 2012, pp.91-98.

■ 저자소개 ■



김 경 훈
(Kim Kyunghoon)

2011년 2월 한양대학교
전자통신컴퓨터공학부(공학학사)
2013년 2월 한양대학교
전자컴퓨터통신공학과(공학석사)
2017년 6월 한양대학교
전자컴퓨터통신공학과(공학박사)
2017년 8월~현재 SK텔레콤 네트워크 기술원
관심분야 : 5G, V2X, 자율주행
E-mail : kyunghoon.b.kim@sk.com

논문접수일 : 2018년 08월 23일
수 정 일 : 2018년 09월 04일
게재확정일 : 2018년 09월 05일