

다중 사용자 MIMO 채널 환경에서 셀 용량을 증가시키는 사용자 선택 기법

정회원 정재호*, 종신회원 최승원*

An User Selection Scheme Enhancing Cell Capacity for Multi-user MIMO Channel Environment

Jaeho Chung* *Regular Member*, Seung-won Choi* *Lifelong Member*

요약

본 논문에서는 하향링크 다중 사용자 Multiple Input Multiple Output (MIMO) 채널 환경에서 셀 용량을 증가시키기 위한 Zero Forcing 기반의 효율적 사용자 선택 기법을 제안한다. 이 기법에서는 채널 전력이 미리 결정된 한계점을 초과하는 사용자들을 주요 그룹으로 구성한다. 100명의 사용자와 4개의 기지국 안테나를 가정한 컴퓨터 모의실험을 통해서 제안된 기법이 기존 기법보다 0.33 bps/Hz만큼 셀 용량을 추가로 제공할 수 있음이 밝혀졌다.

Key Words : Multi-user MIMO, Multi-user diversity, User Selection

ABSTRACT

This paper proposes an efficient user selection algorithm that provides a maximum cell capacity based Multi-user MIMO system based on zero-forcing criterion. The proposed scheme forms a primary group of users whose channel power exceeds a predetermined threshold. Through computer simulations, we have found that the proposed method outperforms the conventional scheme yielding a sum rate that is 0.33 bps/Hz higher when the total numbers of users and transmit antennas in the cell are 100 and 4, respectively.

I. 서론

송신기와 수신기에서 복수개의 안테나를 사용하는 무선 통신 시스템의 용량 증대를 위한 방법으로서의 다중 사용자 Multiple Input Multiple Output (Multi-user MIMO) 기법은 최근 많은 주목을 받고 있는 연구 주제이다^[1,3-5]. MU-MIMO 시스템에서의 사용자 선택 기술은 다중 사용자 다이버시티 이득^[2]을 모두 얻음으로써 시스템 용량을 극대화 시키는 기법이며 이를 위해 사용자 선택을 필요로 하게 된다. 전체 탐색의 경우 최대 셀 용량을 제공하는 일련의 사용자들은 셀 내 모든 사용자들의 조합들을 비교함으로써 선택된다. 비록 전체 탐색 방법은 최대의 용량을

제공하지만 계산량이 너무 큰 단점이 있으며 특히 송신 안테나 개수와 단일 셀 내의 사용자 수가 증가할수록 계산량은 급속히 증가하게 된다. SUS^[3]로 알려진 또 다른 사용자 선택 기법은 전체 탐색 방법의 복잡도를 줄이기 위해 우선 가장 큰 채널 전력을 제공하는 주요 사용자를 선택한다. 하지만, 가장 큰 채널 전력을 가진 사용자를 포함하는 사용자 그룹이 항상 최대 셀 용량을 제공하는 것은 아니기 때문에 복잡도 측면에서 많은 장점을 갖추고 있지만 SUS는 거의 항상 전체 탐색 방법보다 열화된 성능을 보이게 된다. 본 논문에서는 전체 탐색 기법과 유사한 성능을 발휘하면서도 계산량은 SUS보다 훨씬 감소된 새로운 사용자 선택 기법을 제안한다. 본 논문에서 기술하는 기법

* 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과 통신신호처리 연구실([jaehochung, choi}@dsplab.hanyang.ac.kr)
논문번호: KICS2010-11-527, 접수일자: 2010년 11월 4일, 최종논문접수일자: 2010년 12월 28일

은 채널 전력이 미리 결정된 한계점을 초과하는 주요 사용자 후보군을 고려한다. 이후 후보 사용자들 각각은 최대 셀 용량을 보이는 짝을 발견하기 위하여 셀 내의 각 사용자들과 짝 맞추기가 수행된다. 본 논문은 다음과 같이 구성된다. II장에서는 본 논문에서 정의된 수신 신호의 모델이 소개된다. III장은 제안하는 기법에 설명이 기술한다. IV장에서는 제안 기법과 기존 SUS 기법과의 성능비교 결과가 제공된다. V장을 통해 본 논문의 마무리가 이루어진다.

II. 수신 신호 모델

그림 1은 사용자 선택 기법이 적용된 Zero-Forcing 기반의 MU-MIMO 시스템의 블록 다이어그램을 나타내고 있다. M 개의 송신안테나를 가진 기지국과 1개의 수신안테나를 가진 사용자 K 명 사이의 다중 사용자 하향링크 MIMO 시스템을 고려하며 $K \geq M$ 의 경우에 대해서만 생각하기로 한다. k 번째 사용자의 수신 신호, y_k , 는 식 (1)과 같이 표현될 수 있다.

$$y_k = \underline{h}_k \underline{W} \underline{s} + n_k = \underline{h}_k \underline{x} + n_k, k = 1, \dots, K \quad (1)$$

여기서 $\underline{h}_k \in C^{1 \times M}$ 는 k 번째 사용자에게 대한 MIMO 채널 행렬이고 i 번째 항목은 i 번째 송신 안테나와 k 번째 수신 안테나 (그러므로 k 번째 사용자) 사이의 채널 응답을 나타낸다. $\underline{s} \in C^{M \times 1}$ 는 사용자들의 데이터 벡터를 표기하는 것이며 사용자 선택의 결과에 의해 결정된다. 제안하는 기법은 Zero-Forcing에 기반 하므로 얻어진 프리코딩 행렬 $\underline{W} \in C^{M \times M}$ 는 선택된 사용자들에 대한 채널의 역행렬이 된다. 즉, $\underline{H}^{-1} = \begin{bmatrix} \underline{h}_1^T & \dots & \underline{h}_M^T \end{bmatrix}^{-1}$. $\underline{x} \in C^{M \times 1}$ 는 송신 신호 벡터를 나타내며 프리코딩 행렬과 사용자 데이터 벡터의 곱으로 계산된다. n_k 는 백색 잡음을 가리킨다.

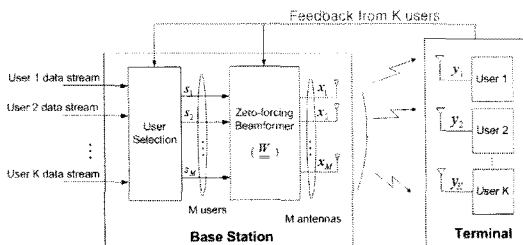


그림 1. 사용자 선택 기법이 적용된 다중 사용자 MIMO 시스템

III. 제안 기법

본 절에서는 제안하는 새로운 사용자 선택 기법이 기술된다. 먼저, ZF를 사용하는 MU-MIMO 시스템에 대하여 셀 용량 계산을 위해 사용되는 방정식을 유도하기로 한다. 단순하게 일반화하기 위하여 셀 내 기지국의 송신 안테나를 2라고 가정 한다. 기지국과 두 사용자 (단말) 사이의 채널 행렬, \underline{H} , 은 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\underline{H} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \underline{h}_1^T & \underline{h}_2^T \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 $\underline{h}_1 = [h_{11} \ h_{21}]$ 와 $\underline{h}_2 = [h_{12} \ h_{22}]$ 는 사용자 1과 사용자 2에 대한 채널 벡터를 나타낸다. 그리고 채널 벡터의 첫 번째와 두 번째 항목은 기지국의 첫 번째 및 두 번째 안테나와 연관되어 있다. 주의해야 할 것은 이미 가정하였듯이 각 단말이 한 개의 안테나만을 가지고 있다는 점이다. 프리코딩 행렬 \underline{W} 는 역채널행렬, \underline{H}^{-1} ,로부터 얻어지고 \underline{H}^{-1} 의 각각의 열벡터들은 다음과 같이 정규화된다.

$$\underline{W} = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} \\ w_{21} & w_{22} \end{bmatrix} = \frac{1}{\det(\underline{H})} \begin{bmatrix} \frac{h_{22}}{a} & -\frac{h_{12}}{b} \\ -\frac{h_{21}}{a} & \frac{h_{11}}{b} \end{bmatrix} \quad (3)$$

where $a = \sqrt{\frac{1}{\det(\underline{H})^2} (h_{21}^2 + h_{22}^2)}$,
 $b = \sqrt{\frac{1}{\det(\underline{H})^2} (h_{11}^2 + h_{12}^2)}$

식(3)에서 a 와 b 는 다음과 같이 다시 표현될 수 있다.

$$a = \sqrt{\frac{1}{\det(\underline{H})^2} (h_{21}^2 + h_{22}^2)} = \sqrt{\frac{\|\underline{h}_2\|^2}{\det(\underline{H})^2}} \quad (4)$$

$$= \frac{\|\underline{h}_2\|^2}{\|\underline{h}_1\|^2 \|\underline{h}_2\|^2 \sin^2 \theta_{1,2}} = \frac{1}{\|\underline{h}_1\| \sin \theta_{1,2}}$$

$$b = \sqrt{\frac{1}{\det(\underline{H})^2} (h_{11}^2 + h_{12}^2)} = \sqrt{\frac{\|\underline{h}_1\|^2}{\det(\underline{H})^2}} \quad (5)$$

$$= \frac{\|\underline{h}_1\|^2}{\|\underline{h}_1\|^2 \|\underline{h}_2\|^2 \sin^2 \theta_{1,2}} = \frac{1}{\|\underline{h}_2\| \sin \theta_{1,2}}$$

where $\sin \theta_{1,2} = \sqrt{1 - \cos^2 \theta_{1,2}}$, $\cos \theta_{1,2} = \frac{\underline{h}_1 \underline{h}_2^H}{\|\underline{h}_1\| \|\underline{h}_2\|}$.

식 (3)-(5)를 식(1)에 대입하면, 어떤 사용자가 수신한 신호 벡터, $\underline{y} = [y_1 \ y_2]^T$, 는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \underline{y} &= \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} \\ w_{21} & w_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} \frac{s_1}{a} \\ \frac{s_2}{b} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \|h_1\| \sin \theta_{1,2} s_1 \\ \|h_2\| \sin \theta_{1,2} s_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (6)$$

식(6)으로부터, 사용자 1과 2에 대한 셀 용량은 다음과 같이 얻어질 수 있다.

$$R = \sum_{i=1}^2 \log_2 \left(1 + (\|h_i\| \sin \theta_{1,2})^2 \right) \quad (7)$$

$$= \log_2 \left(1 + (\|h_1\|^2 + \|h_2\|^2) \sin^2 \theta_{1,2} + \|h_1\|^2 \|h_2\|^2 \sin^4 \theta_{1,2} \right) \quad (8)$$

식(8)에서 보여진 셀 용량을 이용하여 채널 전력에 기 반한 사용자 선택 기법을 유도하기로 한다. 제안된 기법 의 경우, 먼저 주요 사용자 그룹을 구성하기 위하여 후보 사용자들 그룹이 결정된다. 그리고 나서, 후보 사용자들 각각에 대하여, 최대 셀 용량을 생산하는 사용자 짝을 발 견하기 위해 사용자들 각각에 대한 셀 용량이 계산된다. 제안 기법은 다음과 같이 요약될 수 있다.

Step 1: 채널 전력($\|h_i\|^2, i=1,2,\dots,K$)을 결정하기 위 하여 셀 내의 각 사용자들로부터 채널 정보 ($h_i, i=1,2,\dots,K$)를 수신한다.

Step 2: 주요 사용자들 그룹(Z)을 결정하기 위하여 다 음의 세 가지 세부 단계를 사용한다.

1) K 개의 채널 전력값들이 chi-squared 로 분포된 확 률변수로 가정하면, 최대값들의 경계가 계산될 수 있다^[6]. 여기서 K 개의 채널 전력값들은 $2M$ 개의 자유도를 갖으며 아래와 같이 제한된다^[7].

$$\begin{aligned} a &\leq \max_{1 \leq i \leq K} \|h_i\|^2 \leq b \\ \text{where } a &= \ln K + (M-2) \ln \ln K + \ln \ln \ln K \\ b &= \ln K + M \ln \ln K + \ln \ln \ln K \end{aligned} \quad (9)$$

2) 한계점 α 는 최대값의 lower bound로 결정될 수 있 는데 이는 곧 주요 사용자 그룹이 최대값의 lower bound보다 큰 채널 전력을 가진 사용자들로 구성

될 것을 의미한다. 따라서, 한계점 α 는 다음과 같이 표현 가능하다.

$$\alpha = \ln K + (M-2) \ln \ln K + \ln \ln \ln K \quad (10)$$

3) 식 (10)에 나타난 α 를 이용하면, 주요 사용자 그룹 (Z)은 아래와 같이 결정될 수 있다.

$$\begin{aligned} Z &= \{i \mid \|h_i\|^2 > \alpha\} \quad i=1,2,\dots,K \\ &= \{z_1, z_2, \dots, z_r\}, \quad 1 \leq z_1, \dots, z_r \leq K \end{aligned} \quad (11)$$

Step 3: 주요 사용자 그룹내의 각 사용자부터 시작하 여 현재 주요 사용자와 가장 큰 셀 용량을 발생시키는 다 음 사용자를 찾는다. 이 절차는 아래와 같이 요약되어질 수 있다. .

1) 초기화:

$$T_1 = \{1, 2, \dots, K\} \quad (12)$$

$$Z = \{z_1, z_2, \dots, z_r\} \quad (13)$$

$$i=1, j=1 \quad (14)$$

2) 주요 사용자로서 $\pi(j)$ 를 선택

$$S_i = \phi(\text{empty set}) \quad (15)$$

$$\pi(j) = z_i \quad (16)$$

$$S_i = S_i \cup \{\pi(j)\} \quad (17)$$

3) 각 사용자 $k(k \in T_i, k \neq \pi(j))$ 에 대한 g_k 를 계산

$$g_k = h_k - \sum_{m=1}^{j-1} \frac{h_k g_{\pi(m)}^H}{\|g_{\pi(m)}\|^2} g_{\pi(m)} \quad (18)$$

4) 현재 주요 사용자, $\pi(j)$,와 최대 셀 용량을 생산해 내는 다음 사용자, $\pi(j+1)$,를 탐색. 여기서 셀 용량 은 식 (8)을 이용하여 계산. 다음 사용자를 찾는 절 차는 다음과 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} \pi(j+1) &= \arg \max_{k \in T_i, k \neq \pi(j)} \left\{ (\|g_{\pi(j)}\|^2 + \|g_k\|^2) \sin^2 \theta_{k, \pi(j)} \right. \\ &\quad \left. + \|g_{\pi(j)}\|^2 \|g_k\|^2 \sin^4 \theta_{k, \pi(j)} \right\} \end{aligned} \quad (19)$$

5) 후보 사용자 set, (S_i) ,를 최산화 한다.

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

$$T_{j+1} = T_j - \{\pi(j)\} \quad (21)$$

6) 만약 $n(S_i) < M$ 일 경우, $j = j+1$ 를 계산하고 단계 3)을 반복 수행한다.

7) S_i 의 셀 용량 R_i 를 아래와 같이 계산한다.

$$R_i = \sum_{i=1}^M \log_2(1 + \text{SNR}_i) \quad (22)$$

8) 만약 $i < n(Z)$ 인 경우, $i = i+1, j = j-1$ 를 계산하고 단계 2)를 반복 수행한다.

9) 셀 용량을 최대로 만드는 \tilde{i} 를 아래와 같이 찾는다.

$$\tilde{i} = \arg \max_{1 \leq i \leq n(Z)} \{R_i\} \quad (23)$$

IV. 모의실험 결과

본 절에서는 제안하는 사용자 선택 기법을 사용하여 얻어진 모의실험 결과를 기술한다. 컴퓨터 모의실험을 위하여 각 사용자로부터의 채널 정보가 완벽하게 역회환되었다고 가정하였다. 제안한 기법의 성능은 전체 사용자 set을 사용하여 복잡도가 가장 높은 전체 탐색 기법 및 가장 큰 채널 전력에 해당하는 주요 사용자를 미리 선택하는 SUS기법의 성능과 함께 비교되었다. 그림 2는 세 가지 다른 기법들을 사용하여 얻어진 셀 용량과 셀 내의 전체 사용자 수의 관계를 보

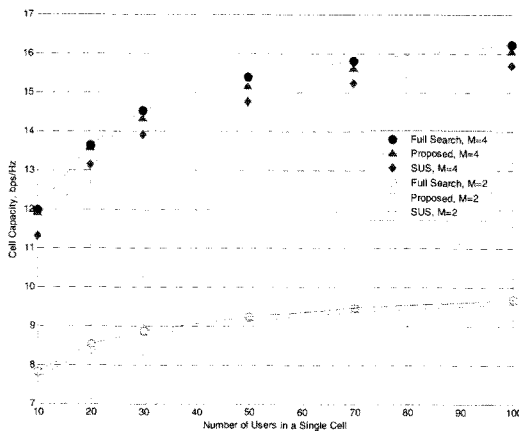


그림 2. 셀 용량 비교: 전체 탐색 기법, SUS, 제안 기법 (M=2 or 4 and transmit SNR=10dB)

여준다. 기지국 송신 안테나의 개수는 각각 2개와 4개로 가정한다.

그림 2에서 나타난 바와 같이, 기지국 안테나 개수가 2인 경우 (선택된 사용자 수도 2), 제안 기법은 전체 탐색 방식과 유사하며 SUS 방식보다는 약 0.1bps/Hz 정도의 성능 우위를 제공함이 밝혀졌다. 기지국 안테나가 4개로 증가할 경우, 제안 기법은 SUS 방식보다 약 0.33bps/Hz 정도의 용량 증가를 보여주고 있다. 기지국 안테나 개수가 증가할수록 성능이 좋아지는 현상은 매우 흥미로운 결과임에 틀림없다.

그림 3은 셀 내의 사용자 수가 1,000명이고 선택된 사용자 수가 4인 경우의 셀 용량 비교를 보여준다. 이 경우 제안 기법은 SUS 방식보다 약 0.25bps/Hz 정도의 셀 용량 제공이 가능함이 밝혀졌다. 복잡도의 급격한 증가 때문에 사용자 100명 이상의 경우에 대한 모의실험에서 전체 탐색 기법은 제외되었다. 표 1에서는 제안된 기법과 전체 탐색 방식, 기존의 SUS 방식에 대한 복잡도 비교가 보여지고 있다. 제안 기법에 대한 복잡도는 아래와 같이 계산되었다. 우선, 아래와 같이 채널 전력이 α 보다 큰 확률^[6]을 계산한다.

$$P(\|h_i\|^2 > \alpha) = 1 - F(\alpha) = \alpha^{M-1} e^{-\alpha} \quad (24)$$

주요 사용자들의 수는 $\alpha^{M-1} e^{-\alpha} \cdot K$ 임을 알 수 있다. 그리고 셀 내의 K 사용자 가운데 M 사용자를 선택할 때 주요 사용자 당 $\{(K-1) + (K-2) + \dots + (K-M+1)\}$ 명의 주요 사용자 당 가능한 사용자 set를 찾을 필요가 있다. 그러므로, 제안 기법을 수행하기 위해 필요로 하는 복잡도는 아래와 같음을 알 수 있다.

$$\{(K-1) + (K-2) + \dots + (K-M+1)\} \cdot \alpha^{M-1} e^{-\alpha} \cdot K < MK \alpha^{M-1} e^{-\alpha} \cdot K \quad (25)$$

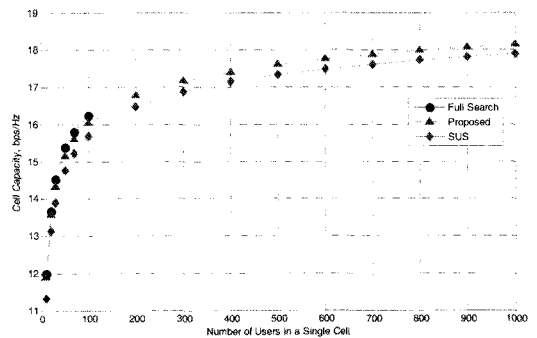


그림 3. User 수 Scale을 확장했을 경우 셀 용량 비교 (M=4 and transmit SNR=10dB)

전체 탐색 기법은 모든 가능한 사용자 set 즉, $K C_M$,를 모두 고려하여야 하고 SUS 기법의 복잡도는 [3]에서 계산되어진 바 있다 표 1은 각 기법에 대한 복잡도를 비교하여 보여주고 있으며 특히 $K=100$, $M=2$ 또는 4인 경우를 가정하였다. 제안하는 기법은 전체 탐색 방법보다 매우 적은 복잡도로 구현이 가능하며 SUS와 비교할 경우 미미한 정도의 복잡도 증가가 필요함이 밝혀졌다. 표 1에서 보여진 바와 같이, 제안 기법과 SUS 기법사이의 복잡도 차이는 기지국의 송신 안테나 수가 증가할 경우 커졌으나 제안 기법을 수행하기 위해 필요한 프로세서의 처리 시간은 최신 프로세서의 등장으로 말미암아 SUS 기법보다 크게 느리지 않을 것으로 판단된다.

표 1. 복잡도 비교 (제안 기법, 전체 탐색, SUS)

| 구분 | 복잡도 | M=2, K=100 | M=4, K=100 |
|-------|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------|---------------|---------------|
| 제안 기법 | $M\alpha^{M-1}e^{-\alpha}K^2$ | 674 | 6,870 |
| 전체 탐색 | $\frac{K!}{M!(K-M)!}$ | 4,950 | 3,912,225 |
| SUS | $\sum_{p=1}^M \sum_{k=p-1}^{M-1} a\beta^{2k} (1-\beta^2)^{(M-k-1)}$ where $a = \frac{(M-1)!}{k!(M-k-1)!}$ | 114 | 148 |

V. 결 론

본 논문에서는 다중 사용자 MIMO 시스템에 대하여 셀 용량을 개선시키기 위한 새로운 사용자 선택 기법이 제안되었다. 일반적으로, 기존의 SUS 방법은 전체 탐색의 성능에 훨씬 못미치는 성능을 보여주었는데 이는 주로 최대 셀 용량을 공급하는 데 반드시 필요하지는 않은 사용자가 항상 주요 사용자로 선택되어졌기 때문이었다. 제안 기법은 채널 전력이 사전에 결정된 한계점을 초과하는 주요 사용자를 정의한다. 그리고, 최대 셀 용량을 공급하는 사용자 짝을 찾기 위하여 셀 내의 모든 다른 사용자들과 주요 사용자 set를 고려한다. 컴퓨터 모의실험을 통하여, 제안 기법을 사용할 경우의 셀 용량은 전체 탐색 기법을 사용했을 때와 유사한 성능을 제공하였지만 복잡도는 매우 감소시킬 수 있음을 밝혀냈다. 또한, 셀 내의 사용자 수가 100명이기 기지국 안테나 수가 3일 경우 SUS 기법 대비 약 0.33bps/Hz의 셀 용량 개선이 얻어짐을 확인하였다.

참 고 문 헌

- [1] E. Telatar, "Capacity of multi-antenna Gaussian channels," *Eur. Trans. Telecommun.*, vol. 10, pp. 585-598, Nov. 1999.
- [2] G. J. Foschini and M. J. Gans, "On limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas," *Wireless Pers. Commun.*, vol. 6, pp. 311-335, Mar. 1998.
- [3] M. Costa, "Writing on dirty paper," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol.IT-29, no.3, PP.439-441, May 1983.
- [4] H. Weingarten, Y. Steinberg, and S. Shamai, "The capacity region of the Gaussian MIMO broadcast channel," in *proc. IEEE Int. Symp. Inf. Theory (ISIT)*, Chicago, IL, 2004.
- [5] T. Yoo and A. Goldsmith, "On the optimality of multi-antenna broadcast scheduling using zero-forcing beamforming," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 24, pp. 528-542, Mar. 2006.
- [6] G. Caire and S. Shamai(Shitz), "On the achievable throughput of a multiantenna Gaussian broadcast channel," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 49, no.7, pp. 1691-1706, Jul. 2003.
- [7] Jianqi Wang, David J. Love, "User Selection With Zero-Forcing Beamforming Achieves the Asymptotically Optimal Sum Rate," *IEEE Trans. Signal process*, vol. 56, no. 8, Aug. 2008.

정 재 호 (Jaeho Chung)

정회원



1994년 2월 중앙대학교 전자공학과 학사

2001년 7월 미국 University of Minnesota at Twin Cities 전기 및 컴퓨터공학과 석사

1994년~2001년 DACOM Corp.

2001년~2005년 삼성전자 디지털미디어 연구소 Connectivity Lab.

2007년~현재 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과 박사과정

<관심분야> 정보이론, 다중 안테나 기술, 통신 신호처리, 이동통신 시스템 등

최 승 원 (Seung-won Choi)

종신회원



1980년 2월 한양대학교 전자공학과 학사

1982년 2월 서울대학교 전자통신공학과 석사

1985년 12월 미국 Syracuse Univ. 공학대학 석사

1989년 12월 미국 Syracuse Univ. 공학대학 박사

1992년 9월~현재 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과 교수

2002년 7월~현재 HY-SDR 연구센터 센터장

<관심분야> SDR, 스마트 안테나, 신호처리