

# 하향링크 다중 사용자 MIMO 시스템에서의 Zero-Forcing 빔 형성을 이용한 효과적인 사용자 선택 기법

준회원 고희성\*, 정회원 오태열\*, 종신회원 최승원\*

## An Efficient User Selection Algorithm in Downlink Multiuser MIMO Systems with Zero-Forcing Beamforming

Hyun-sung Go\* Associate Member, Tae-youl Oh\* Regular Member, Seung-won Choi\* Lifelong Member

### 요 약

본 논문에서는 하향링크 다중 사용자 Multiple Input Multiple Output (MIMO) 채널 환경에서 시스템 용량을 최대화시키기 위한 효과적인 사용자 선택 기법에 대해서 논의한다. 본 논문에서 제안하는 방법은 사용자 채널 파워와 채널 간의 각도를 이용하여 최적의 사용자 집단을 선택하는 새로운 방법이다. 이 방법은 SUS 방법에 비해 허용 상관도 값을 별도로 생각하지 않아도 되기 때문에 간단한 방법이며, 시스템 성능을 최대화시키는 사용자들을 찾는 방법이기 때문에 향상된 성능을 보인다.

**Key Words** : Multiuser Diversity; User Selection; MIMO(Multiple Input Multiple Output).

### ABSTRACT

In this paper, we provide an efficient method of user selection for achieving the maximum system throughput in downlink multiuser Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) systems. A proposed method is for selecting a fine user set only with powers of each user channel and angles between them. This algorithm is simpler than SUS because there is no considering about the optimal value of correlation. The proposed method finds the user set toward maximizing system throughput, so it has high performance.

### 1. 서 론

Multiple Input Multiple Output (MIMO) 기법은 시스템 성능을 향상시키기 위해서 사용되는 핵심 기술이다<sup>[1],[2]</sup>. 기지국은 M개 안테나, 단말기는 N개 안테나가 있는 상황에서 단일 사용자 MIMO 채널의 capacity는 Single Input Single Output(SISO) 채널보다 대략  $\min\{M, N\}$  배의 이득을 얻는다. 하지만, 실제 시스템 환경에서  $\min\{M, N\}$ 은 단말기의 크기와 가격 등 여러 제약 조건 때문에 N이다. 따라서 안테나가 증가함에 따라 선형적으로 비례

증가하는 채널 capacity를 얻기 위해서는 다중 사용자 MIMO 기법이 필요하다. 다중 사용자 MIMO 기법 중, 채널 capacity를 획득하기 위한 방법으로 Dirty Paper Coding (DPC)가 있다<sup>[3]</sup>. 이는 송신단에서 사용자간 간섭을 미리 제거하여 송신하는 기법이다. DPC는 한 사용자가 가지고 있는 단말기 수신안테나 수(N)에 상관없이 기지국 송신안테나 수(M)에 선형적으로 시스템 성능을 증가시킬 수 있고 이 성능은 채널 capacity와 같다. 따라서 DPC는 채널 capacity를 획득하기 위한 최적의 방법이다<sup>[4]</sup>. 하지만, 매 데이터 송수신마다 해당 인코딩과 디코

\* 본 연구는 LG전자(LG electronics)의 지원으로 수행되었습니다.

\* 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과 통신신호처리 연구실({rhgustjd, tyoh, choi}@dsplab.hanyang.ac.kr)(<sup>o</sup> : 교신저자)  
 논문번호 : KICS2009-03-132, 접수일자 : 2009년 3월 30일, 최종논문접수일자 : 2009년 4월 22일

당을 연속적으로 해야 하기 때문에 과도한 연산량 복잡도가 문제되어 실질적인 시스템 구현에는 어려움이 있다. DPC보다 실질적인 시스템 구현을 위하여 일반적으로 Zero-Forcing Beamforming (ZFBF)이 있다. 이 기법은 사용자 스트림들 간의 간섭을 없애는 웨이트 벡터들을 찾아내는 방법이다.  $K \geq M$  환경에서, ZFBF는 전체  $K$ 명중  $M$ 명을 선택하는 사용자 선택 기법과 함께 사용되어야 한다. 선택되는

사용자들은 전체 사용자들을 대상으로  $\sum_{i=1}^M \binom{K}{i}$  번의 비교를 통해서 찾을 수 있다. 하지만, 이러한 비교방법은 전체 사용자 수 ( $K$ )가 커지면 비교량이 많아져서 연산량 복잡도가 부담이 된다. [5]에서는 사용자 선택 기법 중 하나인 Semi-orthogonal User Selection (SUS)를 이용한 ZFBF 방법을 소개하고 이 방법이 전체 사용자 수가 무한대로 증가할수록 DPC와 동일한 sum rate 시스템 성능을 보인다고 증명하였다. SUS는 사용자들 간 채널이 준-직교(Semi-orthogonal)하는 사용자 집합을 적은 연산량으로 찾아내는 기법이다. 이 방법은 수신 신호의 Signal to Noise Ratio (SNR)이득을 최대화시키기 때문에 전체 사용자 수가 무한으로 증가할수록 최대 sum rate을 획득하게 된다. 하지만, 이 방법은 사용자 집단을 선택하기 위한 최적 허용 상관도 값이 전체 사용자 수의 변화에 따라 달라진다는 단점이 있다. 본 논문은 허용 상관도 값에 대한 고려가 필요하지 않으면서 기존 SUS보다 성능이 좋은 새로운 사용자 선택 방법을 제안한다. 본 논문의 2절에서는 다중사용자 MIMO을 위한 시스템 구조도를 설명하고, 3절에서는 ZFBF과 기존 SUS에 대한 소개한 후, 4절에서는 제안하는 사용자 선택 방법에 대해서 설명한다. 5절

에서는 4절에서 제안한 방법의 성능을 확인하기 위해서 시뮬레이션 결과를 보여주며, 6절에서는 결론으로 본 논문을 마무리한다. 본 논문의 영문 소문자 볼드체는 벡터를 나타내고, 영문 대문자 볼드체는 매트릭스,  $\|\cdot\|$ 는 벡터의 크기,  $(\cdot)^T$ 는 매트릭스 또는 벡터의 transpose,  $(\cdot)^H$ 은 공액 transpose,  $(\cdot)^+$ 는 pseudo-inverse를 나타내고,  $E[\cdot]$ 는 기대값을 각각 나타낸다.

## II. 다중사용자 MIMO 시스템 모델

그림 1과 같이  $M$ 개의 송신안테나를 가진 기지국과 각각 1개의 수신안테나를 가진 사용자  $K$ 명 사이의 다중 사용자 하향링크 MIMO 시스템을 생각해보자. 본 논문에서는  $K \geq M$ 의 경우에만 생각한다.  $k$ 번째 사용자의 하향링크 수신신호  $y_k$ 는 다음과 같다.

$$y_k = h_k x + n_k \quad k = 1, \dots, K \quad (1)$$

$x \in C^{M \times 1}$ 은 송신 신호 벡터,  $h_k \in C^{1 \times M}$ 는 기지국과 사용자  $k$ 사이의 평균이 0이고 분산이 1인 채널 이득을 갖는 채널 벡터, 그리고  $n_k$ 는 additive white gaussian noise (AWGN)형이다. 송신 신호의 파워 제약은  $E[x^H x] = P$ 라고 가정한다.

## III. 사용자 선택방법을 이용한 ZFBF

### 3.1 Zero-forcing beamforming(ZFBF)

본 절에서는 다중사용자 MIMO 시스템의 프리코

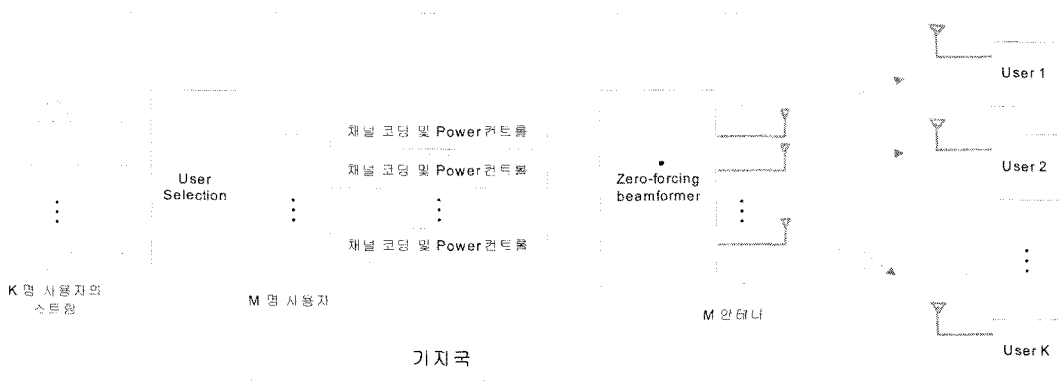


그림 1.  $M$ 개의 송신안테나를 가진 기지국과 각각 1개의 수신안테나를 가진 총  $K$ 명의 사용자간 다중 사용자 하향링크 MIMO 시스템 블록도

딩 기법 중, ZFBF 방법에 대해서 설명한다. ZFBF에 사용되는 빔 벡터들은  $k \neq j$  상태에서 간섭을 제거하는 조건인  $h_k w_j = 0$ 을 만족시킨다<sup>[6]</sup>. 총  $K$ 명의 사용자들 중, 최대 송신 안테나 수  $M$ 만큼 그룹 지어진 사용자 집단의 채널 매트릭스를  $H$ 라고 하면, 식(2)와 같이  $H$ 의 pseudo-inverse를 구하여 간섭을 없애는 조건을 만족시키는  $W$ 를 구할 수 있다.

$$W = H^+ = H^H(HH^H)^{-1} \quad (2)$$

이렇게 구한  $W$ 를 그룹 지어진 사용자들의 데이터 심볼  $s = [s_1 \dots s_M]$ 에 프리코딩하여 송신하게 된다.

$$y = HWs + n = Hx + n \quad (3)$$

$y = [y_1 \dots y_M]$ 은 그룹 지어진 사용자들의 수신 신호,  $x$ 은 송신 신호, 또한  $n = [n_1 \dots n_M]$ 는 복소수 가우시안 노이즈 벡터 항이다. 최대  $M$ 명의 사용자를 선택하기 위해서는 전체  $K$ 명의 사용자를 대상으로  $\sum_{i=1}^M \binom{K}{i}$ 번의 비교를 통하여, 시스템 성능을 최대로 얻는 사용자 집단을 선택하면 된다. 하지만,  $K$ 가 커지면 비교해야 하는 계산량이 많아지기 때문에 적은 연산량을 가지는 새로운 방법의 사용자 선택 방법이 필요하게 된다.

### 3.2 Semi-orthogonal user selection (SUS)<sup>[5]</sup>

최적의 ZFBF을 구현하기 위해서 최대 시스템 성능을 얻을 수 있는 사용자 집단을 선택하여 이 사용자들의 채널을 이용하여 ZFBF을 하는 것이 관건이다. 본 절은 적은 연산량으로 최대 시스템 성능을 얻을 수 있는 사용자 집단을 적은 연산량으로 찾을 수 있는 SUS에 대해서 설명한다. 다음은 SUS를 이용하여 사용자 그룹을 결정하는 과정을 보여준다.

Step 1) 초기 설정

$$T_1 = \{1, \dots, K\} \quad (4)$$

$$i = 1 \quad (5)$$

$$S_0 = \emptyset \quad (6)$$

Step 2)  $T_i$ 에 속한 모든 사용자들을 대상으로  $g_k$ 를 계산

$$g_k = h_k - \sum_{j=1}^{i-1} \frac{h_k g_j^H}{\|g_j\|^2} g_j \quad (7)$$

$$= h_k \left( I - \sum_{j=1}^{i-1} \frac{g_j^H g_j}{\|g_j\|^2} \right)$$

단,  $i = 1$ 일 때  $g_k = h_k$ 이다.

Step 3)  $i$ 번째 사용자를 선택

$$\pi(i) = \arg \max_{k \in T_i} \|g_k\| \quad (8)$$

$$S_0 \leftarrow S_0 \cup \{\pi(i)\} \quad (9)$$

$$h_{(i)} = h_{\pi(i)} \quad (10)$$

$$g_{(i)} = g_{\pi(i)} \quad (11)$$

Step 4)  $|S_0| < M$ 이면,  $T_{i+1}$ 을 계산

$$T_{i+1} = \left\{ k \in T_i, k \neq \pi(i) \mid \frac{|h_k g_{(i)}^H|}{\|h_k\| \|g_{(i)}\|} < \alpha \right\} \quad (12)$$

$$i \leftarrow i + 1 \quad (13)$$

$K$ 가 10일 때, 허용 상관도( $\alpha$ )의 최적 값은 0.5~0.6,  $K$ 가 100이상일 때는 0.2~0.4이다. 만약,  $T_{i+1}$ 가 비어있지 않고, 선택된 사용자 수인  $|S_0|$ 가  $M$ 보다 작다면 Step2)로 가고 아니면 사용자 선택을 종료하면 된다. SUS 방법은 greedy algorithm을 이용한 방법으로 Step1)~Step3)의 경우, greedy algorithm을 이용한 다른 방법들과 동일하다<sup>[7]</sup>. 결국, [5]는 Step4)를 이용해서 적은 연산량으로 사용자들 간의 직교성을 고려하여 최대  $M$ 명의 사용자를 찾는 방법을 제시한 것이다. 하지만, Step4)의 최적 허용 상관도 값( $\alpha$ )이  $K$ 값에 따라 유동적으로 적용되어야 한다는 단점이 있다. 다음 절은 최적 허용 상관도 값을 고려하지 않아도 되는 새로운 사용자 선택 방법에 대해 설명한다.

## IV. 제안하는 사용자 선택 방법

본 절에서는 기존 SUS의 단점을 보완하기 위해서 사용자 채널의 파워와 사용자 채널 간의 각도를 이용하여 최적의 사용자 선택을 할 수 있는 새로운 방법에 대해서 설명한다. 연산량을 적게 하기 위해

서 해당 방법 역시 greedy algorithm을 이용한다. Greedy algorithm에 적용되는 사용자 선택 기준을 설명하기 위해서 기지국의 송신 안테나의 수가 2 ( $M=2$ )이고, 사용자들의 채널 정보를 완벽하게 알고 있고  $P=1$ 로 가정한다. 이 때, 각 사용자들의 수신 신호를 살펴보면,

$$\begin{aligned} \mathbf{y} &= \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} = \mathbf{H}\mathbf{W}\mathbf{s} + \mathbf{n} \\ &= \begin{pmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \frac{w_{11}}{\|w_1\|} & \frac{w_{12}}{\|w_2\|} \\ \frac{w_{21}}{\|w_1\|} & \frac{w_{22}}{\|w_2\|} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (14)$$

$y_1$ 은 첫 번째 사용자의 수신 신호이고,  $y_2$ 는 두 번째 사용자의 수신 신호이다. 이 때, 프리코딩 매트릭스  $\mathbf{W}$ 는  $\mathbf{H}$ 의 pseudo-inverse를 이용하여 구하게 된다.  $\mathbf{W}$ 는 빔  $w_1 = [w_{11} \ w_{21}]^T$ 과 빔  $w_2 = [w_{12} \ w_{22}]^T$ 를 각각 정규화시킴으로써 형성된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{y} &= \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ \|w_1\| & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & \|w_2\| \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_1 \\ s_2 \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} n_1 \\ n_2 \end{pmatrix} \quad (15) \\ &= \begin{bmatrix} \|h_1\| \sin\theta_{12} s_1 + n_1 \\ \|h_2\| \sin\theta_{12} s_2 + n_2 \end{bmatrix} = \begin{pmatrix} y_1 \\ y_2 \end{pmatrix} \end{aligned}$$

단,  $\mathbf{h}_1 = [h_{11} \ h_{12}]$ 는  $\mathbf{h}_1 \in C^{1 \times 2}$ 인 첫 번째 사용자 채널 벡터,  $\mathbf{h}_2 = [h_{21} \ h_{22}]$ 는  $\mathbf{h}_2 \in C^{1 \times 2}$ 인 두 번째 사용자 채널 벡터,

$$\begin{aligned} \|w_1\| &= \sqrt{(w_{11})^2 + (w_{21})^2} \quad (16) \\ &= \sqrt{\frac{\|h_2\|^2}{\det(\mathbf{H}\mathbf{H}^H)}} \\ &= \sqrt{\frac{\|h_2\|^2}{\|h_1\|^2 \|h_2\|^2 \sin^2\theta_{12}}} \\ &= \frac{1}{\|h_1\| \sin\theta_{12}} \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} \|w_2\| &= \sqrt{(w_{12})^2 + (w_{22})^2} \quad (17) \\ &= \sqrt{\frac{\|h_1\|^2}{\det(\mathbf{H}\mathbf{H}^H)}} \\ &= \sqrt{\frac{\|h_1\|^2}{\|h_1\|^2 \|h_2\|^2 \sin^2\theta_{12}}} \\ &= \frac{1}{\|h_2\| \sin\theta_{12}} \end{aligned}$$

$\theta_{12}$  :  $\mathbf{h}_1$ 과  $\mathbf{h}_2$ 간 각도, ( $0 \leq \theta_{12} \leq \pi$ )

첫 번째, 두 번째 사용자의 수신 신호로 2x2 다중 사용자 MIMO 시스템 성능(C)을 구하면,

$$\begin{aligned} C &= \log_2(1 + SNR_1) + \log_2(1 + SNR_2) \\ &= \log_2(1 + \|h_1\|^2 \sin^2\theta_{12}) \\ &\quad + \log_2(1 + \|h_2\|^2 \sin^2\theta_{12}) \\ &= \log_2(1 + (\|h_1\|^2 + \|h_2\|^2) \sin^2\theta_{12} \\ &\quad + \|h_1\|^2 \|h_2\|^2 \sin^4\theta_{12}) \end{aligned} \quad (18)$$

$SNR_1$ 와  $SNR_2$ 는 각각 첫 번째 두 번째 사용자의 신호 대 잡음비를 나타낸다. 시스템 성능을 최대화하기 위해서는 식 (19)를 만족시키는 사용자들을 전체 사용자들 중에서 찾으면 된다.

$$\begin{aligned} \max & [(\|h_1\|^2 + \|h_2\|^2) \sin^2\theta_{12} \\ & + \|h_1\|^2 \|h_2\|^2 \sin^4\theta_{12}] \end{aligned} \quad (19)$$

식(19)를 이용하여 M명의 사용자 선택 방법을 구체적으로 설명하면,

Step 1) 초기 설정

$$T_1 = \{1, \dots, K\} \quad (20)$$

$$i = 1 \quad (21)$$

$$S_0 = \emptyset \quad (22)$$

$$\pi(i) = \arg \max_{k \in T_i} \|\mathbf{h}_k\| \quad (23)$$

$$S_0 \leftarrow S_0 \cup \{\pi(i)\} \quad (24)$$

Step 2) While  $i < M$

$$g_k = h_k - \sum_{j=1}^{i-1} \frac{h_k g_{\pi(j)}^H}{\|g_{\pi(j)}\|^2} g_{\pi(j)}, k \in T_i \quad (25)$$

$$\pi(i+1) = \arg \max_{k \in T_i, k \neq \pi(i)} \left[ (\|g_{\pi(i)}\|^2 + \|g_k\|^2) \sin^2 \theta_{\pi(i)k} + (\|g_{\pi(i)}\|^2 \|g_k\|^2) \sin^4 \theta_{\pi(i)k} \right] \quad (26)$$

$$S_0 \leftarrow S_0 \cup \{\pi(i+1)\} \quad (27)$$

$$T_{i+1} = T_i - \{\pi(i)\} \quad (28)$$

$$i \leftarrow i + 1 \quad (29)$$

### V. 성능 분석

본 논문에서 제안한 방법의 성능과 기존 SUS의 성능을 비교해보기 위해서 시뮬레이션을 진행하였다. 시뮬레이션 파라미터는 표 1과 같다.

기지국 송신 안테나는 2개와 4개, 셀 내 사용자 수는 10, 20, 30, 50, 70, 100명, 각각의 사용자들은 단일 안테나를 가지고 있다고 설정하였다. 또한, 평균 수신 신호의 SNR은 10dB이고 기지국이 모든 사용자들의 채널을 완벽히 알고 있다고 가정한다.

그림 2은 다양한 하향링크 MIMO 방법들의 sum rate 성능을 비교하고 있다. DPC는 MIMO 채널의 capacity를 획득하는 방법이기 때문에 다른 방법들에 비해 월등히 높은 sum rate을 보인다. 사용자 스트림들 간의 간섭을 없애는 화이트 벡터들을 찾아내는 방법인 ZFBF을 이용한 방법들 중, 모든 사용자들의 조합을 비교하여 최고의 sum rate을 획득하는 optimal ZFBF이 DPC보다는 낮은 성능을 보이지만 SUS보다 좋은 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다. SUS는 사용자들 간 채널이 준직교(Semi-orthogonal) 하는 사용자 집합을 적은 연산량으로 찾아내는 장점이 있지만, 한 셀 내 사용자 수 K에 따라 각기

표 1. 시뮬레이션 파라미터.

파라미터	값
기지국 안테나 수 (M)	2, 4
사용자수 (K)	10, 20, 30, 50, 70, 100
각 사용자 안테나 수	1
비교 알고리즘	DPC, Optimal ZFBF, SUS

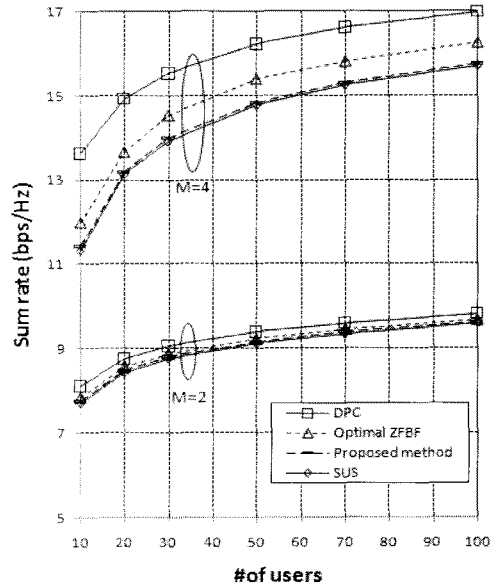


그림 2. 제안한 사용자 선택 알고리즘 성능

다른 최적 허용 상관도 ( $\alpha$ )값을 적용해야 하는 단점이 있다. 제안한 사용자 선택 방법은 허용 상관도 ( $\alpha$ )값에 대한 고려가 없이 송신할 사용자 집단을 찾아낸다. 또한, 시스템의 성능을 최대화시키는 사용자들을 사용자 채널 파워와 사용자 채널간의 각도만으로 이루어진 식을 통해서 찾아내기 때문에 한 셀 내 사용자 수가 10명인 환경에서 기지국 안테나 수가 4개일 때 기존 SUS 보다 평균 0.1bps/Hz 높은 성능을 보이고, 기지국 안테나 수가 2개일 때 평균 0.05bps/Hz 높은 성능을 보이고 있으며, 셀 내 사용자 수가 늘어난 상황에서도 SUS 보다 좋은 성능을 보이고 있다는 것을 그림2. 에서 확인할 수 있다.

### VI. 결론

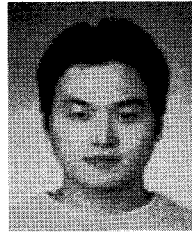
본 논문에서는 하향링크 다중 사용자 MIMO 시스템을 위한 효과적인 방법에 대해서 논의하였다. 또한, 본 논문은 사용자들의 채널 파워 값과 채널간의 상관도 값을 이용해서 효과적으로 시스템의 성능을 최대화시키는 사용자 집단을 찾는 방법을 제안하였다. 제안 방법은 DPC나 옵티멀 ZFBF보다는 성능이 좋지 않지만, 기존 SUS의 최적 허용 상관도, ( $\alpha$ )값을 별도로 생각하지 않아도 되기 때문에 간단한 방법이며, 성능 면에서도 기존 SUS보다 향상된 성능을 보인다는 것을 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있었다.

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.

고 현 성 (Hyun-sung Go)

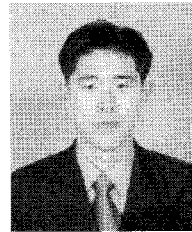
준회원



2008년 2월 한양대학교 전자통신컴퓨터공학과 학사  
 2008년 3월~현재 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과 석사과정  
 <관심분야> LTE, WiBro, 스마트 안테나

오 태 열 (Tae-youl Oh)

정회원



2001년 2월 대구대학교 전자통신공학과 학사  
 2006년 2월 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과 석사  
 2006년 3월~현재 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과 박사과정  
 <관심분야> SDR, LTE, WiBro,

스마트 안테나

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