

논문 2011-48TC-10-1

차등 선부호화 기법을 적용한 MU-MIMO 시스템의 성능분석

(Performance Analysis of MU-MIMO employing differential Precoding)

곡 청*, 박 노 윤*, 이 신*, 김 영 주**

(Qing Gu, Noe Yoon Park, Xun Li, and Young Ju Kim)

요 약

본 논문에서는 제한된 피드백 정보를 사용하는 MU-MIMO 하향링크 시스템에 준-대각선 및 구관 행렬, 그리고 동 이득 전송 기법을 이용한 차등 선부호화 기법을 적용하여 sum-rate 및 bit error rate 성능을 분석한다. 시뮬레이션과 성능분석을 통해 기존의 LTE 코드북보다 sum-rate 성능은 최소 0.6bps/Hz, BER 성능은 최소 4dB 개선됨을 보인다.

Abstract

In this paper, the sum-rate and BER performances of MU-MIMO system employing quantized differential feedback technique are analyzed over temporally correlated channels. Several differential codebooks are assumed in the analysis such as quasi-diagonal codebook, spherical cap codebook, and differential equal gain codebook. The simulation results indicates that the system employing quantized differential feedback technique provides significant performance improvement. The performance improved 0.6bps/Hz at least in terms of sum-rate, and 4dB power gain is provided in terms of average BER.

Keywords : MU-MIMO, Limited Feedback, Differential Codebook, Temporally-Correlation

I. 서 론

다수의 사용자에게 안테나 자원이나 무선 공간 자원을 분배하는 방식으로 통신 용량을 증가시키는 기술인 MU-MIMO (Multi User-Multiple Input Multiple Output)는 3GPP LTE, WiMAX Evolution 등의 차세대 무선 통신 시스템의 주요 기술로서 현재 활발히 연구가 진행되고 있다^[1]. 하향링크 (downlink) MU-MIMO 시스템에서 선부호화 기법을 적용할 경우 전체 sum-rate는 송·수신 안테나의 수 및 전체 사용자수가 증가함에 따라 선형적으로 증가하는데^[2~3], 실제 시스템에서는 각

각의 사용자에게 대한 정확한 채널 상태 정보 (Channel State Information) 가 아닌 임의의 양자화된 채널 정보를 송신단으로 피드백함으로써 발생하는 시스템 오버헤드의 최소화를 고려한다.

임의의 사용자가 자신의 채널 상태 정보를 기지국에 피드백 해주는 일반적인 방법 중의 한가지인 CVQ (Channel Vector Quantization) 는 임의의 양자화된 벡터들의 집합인 코드북에서 각각의 사용자가 자신의 채널 상태 정보와 대응되는 벡터를 선택해 피드백을 수행하는 방법이다^[4]. 그러나 양자화된 채널 벡터는 실제 채널 벡터가 아니므로 양자화 오류가 존재한다. SU-MIMO (Single User) 시스템에서는 무선 통신 채널 시간 상관성을 활용하는 차등 (differential) 선부호화 기법을 통해 양자화 오류의 영향을 최소화 하였는데, 이는 이전 시간의 선부호화 행렬과 기존의 코드북을 결합함으로써 코드북의 해상도 (resolution)를 높이는 기술이다. 이 때, 기준 행렬을 생성하기 위해서는 준-대각선 (quasi-diagonal) 행렬, 구관(spherical cap) 회

* 학생회원, ** 정회원, 충북대학교 정보통신공학과 (School of Information and Communication Engineering, Chungbuk National University)

※ 이 논문은 2010년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었음(This work was supported by the research grant of the Chungbuk National University in 2010)

접수일자: 2011년9월5일, 수정완료일: 2011년10월17일

전 행렬, 그리고 동 이득 전송 기법을 이용할 수 있다 [5~7]. 이에 반해 MU-MIMO 시스템에서 양자화 오류에 따른 이득 저하는 SU-MIMO 시스템보다 그 영향이 더 크기 때문에 보다 정확한 채널 상태 정보를 피드백하는 기법이 요구된다 [8~10].

본 논문에서는 시간 상관성 채널에서 차등 선부호화 기법을 이용한 MU-MIMO 시스템에 기존에 제안된 다수의 차등 선부호화 기법을 적용, 그 성능을 비교한다. 또한 LTE 표준화 문서에서 보인 코드북과 sum-rate 및 비트 오류율 (bit error rate, BER)을 비교·분석한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 간단한 MU-MIMO 시스템 모델을 소개한다. III장에서는 LTE 코드북과 차등 코드북을 사용한 MU-MIMO 시스템을 설명한다. IV장에서는 컴퓨터 시뮬레이션을 통한 차등 선부호화 기법 기반의 MU-MIMO 시스템 성능을 분석한다. 마지막으로 V장에서 본 논문의 결론을 서술한다.

본 논문의 영문 소문자 볼드체는 벡터를 나타내고, 영문 대문자 볼드체는 행렬, $| \cdot |$ 는 스칼라의 절댓값, $\| \cdot \|$ 는 벡터의 2-norm, $(\cdot)^T, (\cdot)^H$ 는 각각 전치 (transpose) 및 공액 복소 전치 (complex conjugate transpose) 연산을 나타낸다. $(\cdot)^\dagger$ 는 pseudo-inverse, $phase(\cdot)$ 는 위상값, $\Omega(m, n)$ 는 m 행, n 열의 unitary 행렬 집합을 나타낸다.

II. 시스템 모델

2.1 MU-MIMO 시스템

MU-MIMO 시스템 모델에 대한 블록 다이어그램을 그림 1에 나타낸다. M_t 개의 송신안테나를 가진 기지국과 1개의 수신안테나를 가진 전체 사용자 K 명 사이의 MU-MIMO 하향링크 시스템에서 선택된 사용자 M ($M \leq M_t$)명의 경우에 대해서만 고려한다. Sum-rate를 최대화할 수 있는 사용자 집단을 선택하기 위해 각각의 사용자는 CQI (Channel Quality Indicator) 및 CDI (Channel Direction Information)를 기지국으로 피드백하는데, 이를 이용해 k ($1 \leq k \leq K$)번째 사용자의 수신 신호 y_k 는 식 (1)과 같이 표현될 수 있다.

$$y_k = \sqrt{\frac{P}{M}} \mathbf{h}_k \mathbf{W} \mathbf{s} + n_k \quad (1)$$

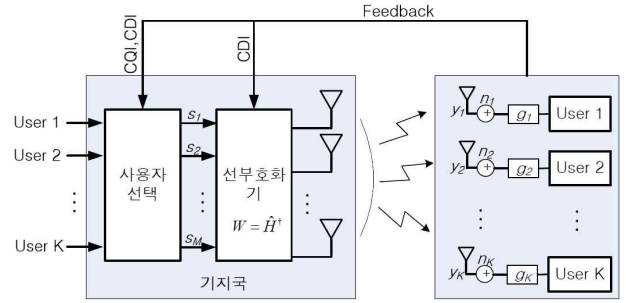


그림 1. MU-MIMO 시스템 블록 다이어그램

Fig. 1. MU-MIMO System Block Diagram.

$\mathbf{s} \in \mathbb{C}^{M \times 1}$ 는 사용자 데이터 신호 벡터로서 선택된 사용자들의 데이터 심벌 (data symbol) 이고 P 는 송신 신호의 전력 (power) 이다. $\mathbf{W} \in \mathbb{C}^{M_t \times M}$ 는 정규화된 선부호화 행렬, $\mathbf{h}_k \in \mathbb{C}^{1 \times M_t}$ 는 기지국과 임의의 k 번째 사용자 사이의 레일리 페이딩 채널 벡터, 그리고 n_k 은 부가적 백색 가우시안 잡음을 나타낸다. k 번째 사용자의 MMSE (Minimum Mean Square Error) 수신기의 가중치 (weight) 값 g_k 는 다음과 같다.

$$g_k = (\mathbf{h}_k \mathbf{w}_{(k)})^H (\mathbf{h}_k \mathbf{W} (\mathbf{h}_k \mathbf{W})^H + \frac{M}{P} \sigma^2)^{-1} \quad (2)$$

$\mathbf{w}_{(k)}$ 는 k 번째 사용자의 선부호화 벡터, σ^2 는 잡음 전력을 의미한다. 한편, 시간 상관성 채널은 1차 가우스-마르코프 프로세스 (first-order Gauss-Markov process)를 통해 다음과 같이 표현될 수 있다 [6].

$$\mathbf{h}_{k,t} = \epsilon \mathbf{h}_{k,t-1} + \sqrt{1 - \epsilon^2} \mathbf{z}_{k,t} \quad (3)$$

$\epsilon \in [0, 1]$ 는 k 번째 사용자에 대해 시간 t 일 때의 채널 벡터 $\mathbf{h}_{k,t}$ 과 시간 $t-1$ 일 때의 채널 벡터 $\mathbf{h}_{k,t-1}$ 의 상관도를 나타내는 시간 상관 계수이며, $\mathbf{z}_{k,\tau} \in \mathbb{C}^{1 \times M_t}$ 는 레일리 분포를 갖는 임의의 복소수 벡터이다. ϵ 는 Jakes 모델을 이용하여 다음과 같이 나타낸다 [11].

$$\epsilon = J_0(2\pi f_d T) \quad (4)$$

$$f_d = \frac{v f_c}{c} \quad (5)$$

f_d 는 도플러 주파수 천이, v 는 사용자 이동 속도, f_c 는 캐리어 (carrier) 주파수, $c = 3 \times 10^8 \text{ m/s}$ 는 광의 속도이다. T 는 채널 예시화 간격 (channel instantiation interval)이다. $J_0(\cdot)$ 는 제1종 베셀 함수를 나타낸다.

MMSE 등화기를 통과한 수신신호는 다음과 같이 표현된다.

$$\hat{s}_k = \sqrt{p_k} g_k \mathbf{h}_k \mathbf{w}_{(k)} s_k + \sum_{i=1, i \neq k}^K \sqrt{p_i} g_k \mathbf{h}_k \mathbf{w}_{(i)} s_i + g_k n_k \quad (6)$$

s_k 는 k 번째 사용자의 데이터 심벌, p_k 는 k 번째 사용자의 전력 P/M 이다. k 번째 사용자의 하향 링크 SINR (Signal to Interference and Noise Ratio) 및 이를 이용한 M 명의 사용자 집합 $\mathbb{M} (\mathbb{M} \subseteq \{1, \dots, K\})$ 의 sum-rate, R_{sum} 은 다음과 같다.

$$SINR_k = \frac{p_k |g_k \mathbf{h}_k \mathbf{w}_{(k)}|^2}{1 + \sum_{\substack{i \in \mathbb{M} \\ i \neq k}} p_i |g_k \mathbf{h}_k \mathbf{w}_{(i)}|^2} \quad (7)$$

$$R_{sum} = \sum_{k \in \mathbb{M}} \log_2(1 + SINR_k) \quad (8)$$

III. 선부호화 행렬 설계

3.1 LTE 코드북을 사용한 MU-MIMO 시스템

k 번째 사용자의 정규화된 채널 벡터 $\tilde{\mathbf{h}}_k$ 는 식 (9)과 같다.

$$\tilde{\mathbf{h}}_k = \frac{\mathbf{h}_k}{\|\mathbf{h}_k\|} \quad (9)$$

k 번째 사용자는 식 (10)을 이용해 정규화된 채널 벡터 $\tilde{\mathbf{h}}_k$ 와 N 개의 벡터로 구성된 LTE 코드북 $C = \{\mathbf{c}_1, \dots, \mathbf{c}_N\}$, $\mathbf{c}_i \in \mathbb{C}^{M_t \times 1}$ 내 코드워드 (codeword) 벡터들 간의 Euclidean 거리를 최소화하는 벡터를 선택한다.

$$\hat{\mathbf{h}}_k^T = \mathbf{c}_{n_{opt}}, \quad n_{opt} = \arg \max_{1 \leq i \leq N} |\tilde{\mathbf{h}}_k \mathbf{c}_i^*| \quad (10)$$

n_{opt} 는 코드북 내 최적의 코드워드 인덱스로서, k 번째 사용자는 기지국에 코드북 내 n_{opt} 번째 인덱스에 대응되는 임의의 양자화된 코드워드 $\hat{\mathbf{h}}_k$ 를 피드백하게 된다.

기지국에서는 최대의 sum-rate를 기준으로 전체 K 명의 사용자 중에서 선택된 M 명의 사용자 피드백 정보를 이용하여 다음과 같이 송신단 가중치 \mathbf{W} 를 결정한다.

$$\mathbf{W} = \hat{\mathbf{H}}^\dagger = \hat{\mathbf{H}}^H (\hat{\mathbf{H}} \hat{\mathbf{H}}^H)^{-1} \quad (11)$$

$$\hat{\mathbf{H}} = [\hat{\mathbf{h}}_1^T, \dots, \hat{\mathbf{h}}_M^T]^T \quad (12)$$

최대의 sum rate를 얻을 수 있는 사용자 집단을 선택하기 위해서 사용자가 CQI를 기지국에 피드백 한다. k 번째 사용자의 CQI는 다음과 같이 표현할 수 있다^[12].

$$CQI_k = \frac{\frac{P}{M} \|\mathbf{h}_k\|^2 \cos^2 \theta_k}{1 + \frac{P}{M} \|\mathbf{h}_k\|^2 \sin^2 \theta_k} \quad (13)$$

$$\theta_k = \arccos |\tilde{\mathbf{h}}_k \hat{\mathbf{h}}_k^H| \quad (14)$$

3.2 차등 코드북을 사용한 MU-MIMO 시스템

차등 선부호화 기법은 기존의 코드북 $F_{diff} = \{\mathbf{F}_1, \dots, \mathbf{F}_N\}$ 에 대해 이전 시간 $t-1$ 에 최적인 코드워드 $\mathbf{c}_{n_{opt}, t-1}$ 을 결합하여 현재 시간 t 에서의 채널 상관성에 따른 새로운 코드북을 결정한다. 먼저 준-대각선 행렬을 이용한 차분 선부호화 기법의 기존 코드북을 생성하기 위해 다수의 후보자 코드북을 생성해야 한다. 후보자 코드북 내 임의의 코드워드 $\bar{\mathbf{F}}$ 은 다음과 같다^[5].

$$\bar{\mathbf{F}}_i = \mathbf{U}(t)^H \mathbf{U}(t + \Delta t), \quad \mathbf{U} \in \Omega(M_t, M_t) \quad (15)$$

$\mathbf{U}(t)$ 과 $\mathbf{U}(t + \Delta t)$ 는 random unitary 행렬 때문에 $\bar{\mathbf{F}}_i$ 도 unitary 행렬이다. Δt 가 작을수록 $\mathbf{U}(t)$ 과 $\mathbf{U}(t + \Delta t)$ 의 상관성이 높아지고 $\bar{\mathbf{F}}_i$ 이 준-대각선 행렬이 된다. 생성된 다수의 후보자 코드북 중에서 채널 용량을 최대화하는 코드북이 F_{diff} 로 결정되며, 시간 t 에 따라 생성된 코드워드는 다음과 같이 나타낸다.

$$\mathbf{c}_{i,t} = \mathbf{F}_i \mathbf{c}_{n_{opt}, t-1} \quad (16)$$

구관 행렬을 이용한 기존 코드북을 생성하기 위해 random unitary 행렬로 구성된 다수의 후보자 코드북을 생성한다. 각 후보자 코드북에 대해 식 (17)을 이용해 Riemannian manifold 거리를 각각 계산한다.

$$d(\mathbf{F}_i, \mathbf{F}_j) = \sqrt{1 - \frac{1}{M_t} |\text{tr}(\mathbf{F}_i^H \mathbf{F}_j)|} \quad (17)$$

식 (18)를 통해 최소의 Riemannian manifold 거리를 최대화 시키는 후보자 코드북을 기준 코드북 F_{diff} 로 선택한다^[6].

$$F_{diff} = \underset{\tilde{F}_{diff}}{\operatorname{argmax}} \min_{1 \leq i \leq j \leq N} d(\mathbf{F}_i, \mathbf{F}_j) \quad (18)$$

시간 t 에 생성된 코드워드는 다음과 같이 나타낸다.

$$\mathbf{c}_{i,t} = \operatorname{proj}(\alpha_t \mathbf{c}_{n_{opt},t-1} + \bar{r}_t \mathbf{F}_i \mathbf{c}_{n_{opt},t-1}) \quad (19)$$

$\alpha_t (0 \leq \alpha_t \leq 1)$ 는 매개변수이고, \bar{r}_t 는 구관 행렬의 반지름이다. $\operatorname{proj}(\cdot)$ 는 $\Omega(M_t, 1)$ 에 투영하는 것을 의미한다.

동 이득 전송 차분 선부호화 기법의 기존 코드북은 LTE 코드북의 위상 행렬에 대해 채널의 상관관계 인자 $\beta (\beta \geq 1)$ 를 나누어줌으로써 결정되며, 생성된 코드워드는 다음과 같다^[7].

$$\mathbf{c}_{i,t} = \left\langle \exp(j \frac{\operatorname{phase}(\mathbf{c}_i^{LTE})}{\beta}) \cdot \mathbf{c}_{n_{opt},t-1} \right\rangle \quad (20)$$

$\langle \cdot \rangle$ 는 Hadamard 곱을 의미한다.

IV. 시뮬레이션 결과

본 절에서 Monte-Carlo 시뮬레이션을 통해 MU-MIMO 시스템에서 여러 가지 차등 코드북 방법과 기존 LTE 코드북의 성능을 비교한다. 기지국의 송신 안테나 수는 4개, 셀 내 전체 사용자 수 K 는 10명, 각각의 사용자 들은 단일 안테나를 가지고 있으며 각 사용자의 CQI값을 기지국에서 알고 있다고 가정한다. 사용자 선택기법은 Greedy 기법을 사용한다^[13]. 반송파 주파수는 2GHz, 채널 예시화 간격 (channel instantiation interval)은 1ms, 이동속도는 10km 인 경우 $\epsilon = 0.997$ 이며^[6], 각 사용자와 기지국 사이의 채널을 완벽히 알고 있다고 가정한다. 또한, 피드백 채널의 데이터 지연과 에러는 발생하지 않는다고 가정한다.

그림 2는 시간 상관성 채널에서 여러 가지 차등 코드북과 기존의 LTE 코드북의 sum-rate 성능을 나타낸다. 구관 회전 행렬을 이용한 기법에서 기준 코드북의 반지름은 현재 채널에 따라 조절 가능하기 때문에 다른 방법들에 비해 높은 sum-rate을 보인다. 준-대각선 행렬과 동 이득 전송 기법(DEGT)에 의한 차등 코드북은 구

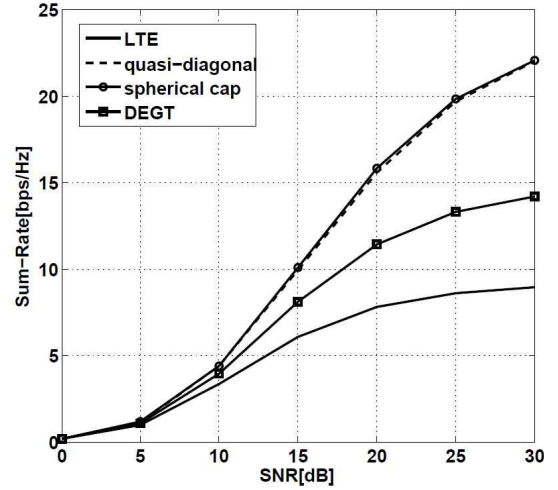


그림 2. 차등 코드북과 LTE 코드북의 sum-rate 성능 비교

Fig. 2. Comparison of the sum-rate performances of differential codebooks and LTE codebook.

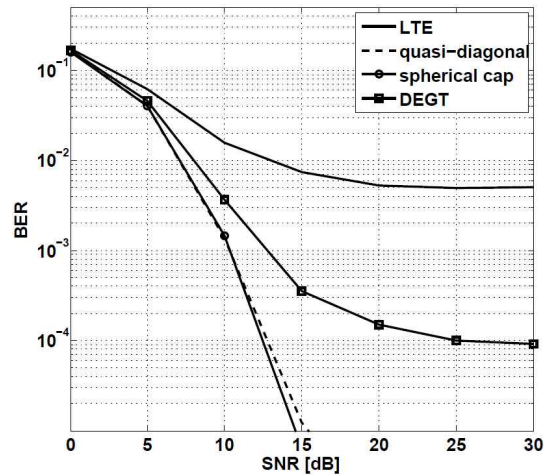


그림 3. 차등 코드북과 LTE 코드북의 BER 성능 비교

Fig. 3. Comparison of the BER performances of differential codebooks and LTE codebook.

관 행렬을 이용한 차등 코드북보다 낮은 성능을 보이지만 LTE 코드북보다 우수함을 보인다. 10dB를 기준으로 LTE 코드북과의 성능을 비교하면 동 이득 전송 기법에 의한 차등 코드북은 약 0.6bps/Hz, 준-대각선 행렬 및 구관 행렬을 이용한 차등 코드북은 약 1.1bps/Hz의 용량 증가를 보인다.

그림 3은 QPSK에 적용한 차등 코드북과 기존의 LTE 코드북의 BER 성능을 비교한다. 구관 행렬을 이용한 차분 코드북의 성능이 가장 우수한 반면, LTE 코드북은 높은 SNR영역에서 사용자 간 간섭이 크기 때문에 성능이 저하된다. 10⁻² BER을 기준으로 LTE 코드북과 성능을 비교하였을 때, 동 이득 전송 기법에 의한

차분 코드북은 약 4dB, 준-대각선 행렬 및 구관 행렬을 이용한 차등 코드북은 약 4.9dB 정도의 성능 개선을 보인다.

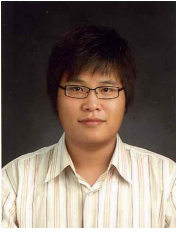
V. 결 론

본 논문에서는 MU-MIMO 하향링크 시스템에서 여러 가지 차등 선부호화 기법과 기존 LTE 기법의 성능을 분석하였다. Monte-Carlo 시뮬레이션을 통해 기존 LTE 코드북을 사용하는 경우 다른 차등 코드북에 비해 sum-rate 성능이 저하되고 특히 높은 SNR 영역에서는 사용자 간 간섭이 크기 때문에 좋은 성능을 얻을 수 없다. 이에 반해 차등 선부호화 기법은 양자화 오류가 적기 때문에 sum-rate 성능이 우수하고 사용자 간 간섭이 작은 것을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] J. Duplacy, B. Badic, R. Balraj, "MU-MIMO in LTE Systems," EURASIP Journal on Wireless Communications and Networking Vol. 2011, pp. 1-13, 2011.
- [2] G. Caire and S. Shamai, "On the achievable throughput of a multi antenna Gaussian broadcast channel," IEEE Trans. Information Theory, Vol. 49, No. 7, pp. 1691-1706, July 2003.
- [3] N. Jindal and A. Goldsmith, "Dirty paper coding vs. TDMA for MIMO broadcast channels," IEEE Trans. Inf. Theory, Vol. 51, No. 5, pp. 1783-1794, May 2005.
- [4] Stefania Sesia, Issam Toufik and Matthew Baker, LTE-The UMTS Long Term Evolution: From Theory to Practice. Wiley, 2009.
- [5] T. Abe, G. Bauch, "Differential codebook MIMO precoding technique," Global Telecommunications Conference 2007. IEEE, pp. 3963-3968, Nov. 2007.
- [6] T. J. Kim, D. J. Love, B. Clerckx, "MIMO systems with limited rate differential feedback in slowly varying channels," Communications IEEE Transactions on, vol. 59, no. 4, pp. 1175-1189, Apr. 2011.
- [7] Xun Li, N. Y. Park, and Y. J. Kim, "Differential precoding scheme of LTE Systems over temporally correlated channels" IEEE VTC Fall 2011, in press, 2011.
- [8] N. Jindal, "MIMO broadcast channels with finite rate feedback," IEEE Trans. Information Theory, Vol. 52, No. 11, pp. 5045-5059, Nov. 2006.
- [9] R. W. Heath, W. Tao, A. C. K. Soong, "Progressive refinement for high resolution limited feedback multiuser MIMO beamforming," Signals Systems and Computers 2008 42nd Asilomar Conference on, pp. 743-747, Oct. 2008.
- [10] T. Yoo, N. Jindal, and A. Goldsmith, "Multi-Antenna Downlink Channels with Limited Feedback and User Selection," IEEE journal sel. areas in commun., vol. 25, no. 7, pp. 1478-1491, Sept. 2007.
- [11] J. G. Proakis, Digital Communications, 4th edition. McGraw Hill, 2000.
- [12] Philips, "Comparison between MU-MIMO codebook-based channel reporting techniques for LTE downlink," 3GPP TSG RAN WG1, R1-062483, Oct. 2006.
- [13] M. Trivellato, F. Boccardi and F. Tosato, "User Selection Schemes for MIMO Broadcast Channels with Limited Feedback," IEEE VTC Spring 2007, pp. 2089-2093, May. 2007.

저 자 소 개



곡 청(학생회원)
 2010년 충북대학교 정보통신 공학과 학사 졸업.
 2010년 3월~현재 충북대학교 정보통신공학과 석사 과정.

<주관심분야 : 이동통신 시스템, MU-MIMO, LTE>



이 신(학생회원)
 2004년 중국 산둥대학교 정보시스템학과 학사 졸업.
 2008년 충북대학교 바이오정보기술학과 석사 졸업.
 2008년~현재 충북대학교 정보통신공학과 박사 과정.

<주관심분야 : 이동통신시스템, MIMO, OFDM>



박 노 운(학생회원)
 2007년 충북대학교 정보통신 공학과 학사 졸업.
 2009년 충북대학교 정보통신 공학과 석사 졸업.
 2009년~현재 충북대학교 정보통신공학과 박사 과정.

<주관심분야 : 이동통신시스템, LTE, MIMO>



김 영 주(정회원)
 1988년 고려대학교 전자전산 공학과 학사 졸업.
 1996년 한국과학기술원 정보통신 공학과 석사 졸업.
 2001년 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 박사 졸업.

1987년11월~1993년12월 (주)금성사 평택연구소
 1996년 2월~1997년 2월 동경공업대학교 연구원
 2000년 4월~2000년12월 ETRI 위촉연구원
 2001년 1월~2003년 8월 (주)엘지전자 UMTS 시스템연구소
 2003년 9월~현재 충북대학교 전자정보대학 교수
 <주관심분야 : LTE, LTE-A, Distributed antenna system>