QR 분해 및 순차적 간섭제거 기반의 MIMO 신호검출 기법을 위한 향상된 순서화 방법

준회원 박 상 현*, 종신회원 김 재 권*, 양 원 영**

An Improved Ordering Method for MIMO Signal Detection Using QR Decomposition and Successive Interference Cancellation

Sanghyun Bak* *Associate Member*, Jae-kwon Kim*, Won Young Yang** *Lifelong Members*

요 약

본 논문에서는 QR분해 및 순차적 간섭제거 기반의 MIMO 신호검출기법을 위한 새로운 검출 순서화 방법을 제안한다. 최근 공간다중화 MIMO 시스템을 위한 신호검출기법으로서 한 개의 공간 레이어에는 모든 가능한 성상점을 추정 신호로 시도하고 나머지 레이어의 추정치는 순차적 간섭제거를 수행하여 후보 벡터들을 생성한 후 각 후보 벡터의 ML 메트릭을 계산하여 송신 벡터를 추정하는 기법들이 제안되었다. 이러한 신호검출기법에는 기존 V-BLAST의 순서화와는 다른 순서화를 적용해야 된다는 점이 지적되었다. 본 논문은 이러한 신호검출기법을 위한 새로운 순서화방법을 제안하고, 이에 따라 성능의 이득을 달성할 수 있음을 모의실험을 통해 보인다.

Key Words : 신호검출, 공간다중화 MIMO, 순차적 간섭제거

ABSTRACT

In this paper, we propose a novel detection ordering technique for MIMO signal detection methods based on QR decomposition and successive interference cancellation (SIC). Recently, new signal detection methods for spatially multiplexed (SM) MIMO systems were proposed, where all the constellation points are tried as the first layer symbol, and the remaining layer symbols are estimated via SIC, producing candidate vectors. Finally, the ML metric values are calculated for the candidate vectors, that are again used to select the best symbol vector. It was also shown that the ordering method in the conventional V-BLAST is not suitable to these signal detection methods. In this paper, we propose a novel ordering method, and we show via computer simulations that the proposed ordering method improves the error performance.

I. 서 론

차세대 이동 통신 시스템은 멀티미디어 데이터 위주의 고속 데이터 서비스를 위해 보행자 속도로 이동하는 환경에서 1Gbps, 고속으로 움직이는 상황에서 100Mbps의 데이터 전송 속도가 요구한다. 이와 같은 요구를 만족시키기 위해서 제한된 주파수를 사용한 고속 데이터 전송방법으로 multiple imput multiple output (MIMO) 기술이 널리 연구되고 있다[1]. MIMO 시스템을 사용하는 기술 중 특히 spatial multiplexing (SM) 기술을 이용하여 추가적인 주파수 대역폭이나 송신 전력이 없이도 통신 용량을 크게 향상 시킬 수 있다[2][3]. 그러나 일반적으로 SM MIMO 시스템에서는 송신 안테나의 수가

※ 본 연구는 지식경제부 지역선도기술사업의 지원에 의하여 이루어진 것임(70004268).
* 연세대학교 원주캠퍼스 디지털통신연구실 (jaekwon@yonsei.ac.kr), ** 중앙대학교 전자전기공학부
논문번호 : KICS2009-08-350, 접수일자 : 2009년 8월 13일, 최종논문접수일자 : 2009년 9월 28일

증가 할수록 수신단의 신호검출복잡도가 현격히 증가한다는 단점이 있고, 이에 따라 수신부의 하드웨어 구현 복잡도를 줄이는 방법에 대한 연구가 활발하게 진행되고 있다.

공간다중화 MIMO 시스템을 위한 대표적인 신호검출기법에는 QRM-MLD[4], sphere decoding (SD)[5]가 있으며, [6]에서는 공간 스트림의 개수가 2개인 경우에는 ML 신호검출이 비교적 낮은 계산을 통해서 가능함을 보였다. 그러나 송신안테나의 개수가 3개 이상인 경우에는 [6]의 기법도 여전히 높은 연산 복잡도를 요구한다. 또한, 순서화된 간섭제거를 기반으로 하는 비교적 낮은 복잡도의 V-BLAST 신호검출기법이 있으나, 오류전파에 의한 성능열화가 큰 것으로 알려져 있다[7]. [8],[9]에서는 V-BLAST의 오류전파의 영향을 감소시키기 위한 기법들이 제안되었다.

최근 공간다중화 MIMO 시스템을 위한 또 다른 부류의 신호검출기법으로서 한 개의 공간 레이어에는 모든 가능한 성상점을 추정 신호로 시도하고 나머지 레이어의 추정치는 순차적 간섭제거를 수행하여 후보 벡터를 생성한 후 마지막으로 각 후보 벡터의 ML 메트릭을 계산하여 송신 벡터를 추정하는 기법들이 제안되었다[10],[11]. 이러한 신호검출기법들에는 기존 V-BLAST의 순서화와는 다른 순서화를 적용해야 된다는 점이 지적되었다. 본 논문은 이러한 신호검출기법을 위한 새로운 순서화방법을 제안하고, 이에 따라 [10],[11]의 순서화 방법을 적용했을 때에 비해 성능이득을 달성할 수 있음을 모의실험을 통해 보인다.

Ⅱ. 공간다중화 MIMO 시스템 모델

그림 1은 본 논문에서 고려하는 공간다중화방식 MIMO 시스템을 나타낸다. 송신 안테나 개수는 n_T이고 수신 안테나의 개수는 n_R이다. 공간다중화 시스템에서는 송신 안테나 개수 n_T가 미지수의 개수를 나타내고, 수신 안테나의 개수 n_R이 방정식의 개수를 나타내기 때문에 $n_R \geq n_T$의 조건을 만족해야 신호검출이 가능하게 된다. 송신 및 수신신호의 관계는 다음 수식으로 표현 할 수 있다.

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{z} \qquad (1)$$

$$\mathbf{y} = \left[y_1\, y_2 \cdots y_{\mathrm{n}_R} \right]^T$$

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} & \cdots & h_{1,n_T} \\ h_{2,1} & h_{2,2} & \cdots & h_{2,n_T} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{\mathrm{n_R},1} & h_{\mathrm{n_R},2} & \cdots & h_{\mathrm{n_R},\mathrm{n_T}} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{x} = \left[x_1\, x_2 \cdots x_{\mathrm{n_T}} \right]^T$$

$$\mathbf{z} = \left[z_1 z_2 \cdots z_{\mathrm{n_R}} \right]^T$$

여기서 $x_j, j = 1,2,\cdots,n_T$은 j번째 송신 안테나로부터 송신된 신호를 나타내고, $y_i, i = 1,2,,\cdots,\mathrm{n_R}$은 i번째 수신 안테나에서 수신된 신호를 나타내며, $h_{i,j}, i = 1,2,\cdots,n_R,\ j = 1,2,\cdots,n_T$는 j번째 송신 안테나와 i번째 수신 안테나 사이의 채널 이득을 나타낸다. 크기가 $\mathrm{n_R} \times \mathrm{n_T}$인 채널 행렬 H의 각 원소들은 서로 independent and identically distributed (i.i.d.) Rayleigh fading 채널이득이라고 가정한다. 잡음 $z_i \sim CN(0, \sigma_z^2),\ i = 1,2,\cdots,n_R$은 환형 대칭 가우시안 잡음으로 가정하고, 본 논문에서는 송신신호 $x_j, j = 1,2,\cdots,\mathrm{n_T}$는 16-QAM 변조된 심볼이라고 가정한다. OFDM과 다중안테나 기법의 결합시, 각 부채널에서의 신호검출은 동일한 절차로 수행된다. 따라서, 다음 장에 기술되는 식 (1)기반의 신호검출기법들의 설명에 있어서 부채널 인덱스는 없으나, 모든 기법들이 MIMO OFDM 시스템에 적용이 가능하다.

일반적으로, 수신부에서는 수신신호 y벡터가 주어졌을 때, 훈련신호를 통해 채널행렬 H를 먼저 추정한 다음 송신신호 벡터 x를 찾아야 한다. 그러나 본 논문에서는 신호검출기법을 집중적으로 다루며 채널추정은 고려하지 않고, 채널 추정이 이미 완벽하게 수행되어 가용하다고 가정한다. 따라서 일반적으로 추정치를 나타내는 $\hat{\mathbf{H}}$대신 H를 사용한다.

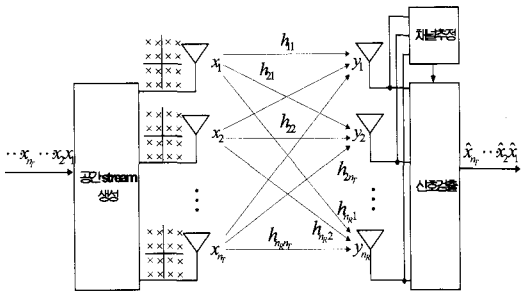


그림 1. 공간다중화 MIMO 시스템 모델

Ⅲ. 기존 신호검출 기법

본 절에서는 기존의 두 가지 신호검출기법들인 QR-most reliable layer (MRL)과 QR-least reliable layer (LRL)을 기술한다.

3.1 QR-MRL[10]

본 절에서는 첫 번째 레이어 추정 시 모든 성상점들을 추정신호로 추정하고, 나머지 레이어는 순차적 간섭제거 방식으로 추정하여, 후보벡터들을 생성한 후 ML메트릭을 계산 하여 송신신호벡터를 추정하는 방식 중 하나인 QR-MRL수신기법을 기술한다[15]. QR-MRL방식에서는 가장 높은 신뢰도를 갖는 레이어에 대하여 모든 성상점들을 추정신호로 시도한다.

$\mathbf{H}=[\mathbf{h}_1\,\mathbf{h}_2\cdots\mathbf{h}_{n_T}]$는 채널행렬이며, $\mathbf{h}_i, i=1,2,\cdots, n_T$는 채널행렬의 i번째 열벡터이다. H행렬의 pseudo inverse를 구하고 행벡터로 구분하여 표현하면 다음과 같다.

$$(\mathbf{H}^H\mathbf{H})^{-1}\mathbf{H}^H=\begin{bmatrix}\mathbf{g}_1\\ \mathbf{g}_2\\ \vdots\\ \mathbf{g}_n\end{bmatrix} \tag{2}$$

$$\begin{aligned} l_{MRL} &= \arg\max_i SNR_i \\ &= \arg\min_i \|\boldsymbol{g}_i\|^2 \end{aligned} \tag{3}$$

여기서 SNR_i는 i번째 레이어의 검출 후 signal-to-noise ratio (SNR)을 나타낸다. 식 (2)에서 행벡터 $\mathbf{g}_i$의 norm 값의 제곱의 크기가 잡음상승의 정도이므로, 이 값이 가장 작은 레이어가 가장 신뢰도가 높은 레이어이다. 따라서 이 해당 레이어를 most reliable layer (MRL)로 명명하며 l_{MRL}로 표현한다. 신호검출기법으로 minimum mean squared error (MMSE)기법이 사용될 경우에는 식 (3)의 SNR 대신 검출 후 SINR을 기준으로 하여 유사하게 선택하면 된다. 이와 같이 한 개의 레이어에 모든 성상점을 대입하여 기존 V-BLAST 기법에 비해 큰 성능이득을 얻을 수 있다[10].

3.2 QR-LRL[11]

본 절에서는 QR-Least Reliable Layer (LRL) 수신기법을 기술한다. QR-LRL수신방식에서는 모든 성상점들을 추정신호로 시도하는 첫 번째 레이어로 가장 신뢰도가 낮은 레이어 least reliable layer (LRL)을 선택한다. 또한 두 번째 레이어의 성공적인 추정 여부가 전체적인 성능에 영향을 크게 미치므로 두 번째 레이어에 가장 신뢰도가 높은 레이어를 사용한다.

$$\begin{aligned} l_{LRL} &= \arg\min_i SNR_i \\ &= \arg\max_i \|\boldsymbol{g}_i\|^2 \end{aligned} \tag{4}$$

식 (4)에서 l_{LRL}은 잡음상승이 가장 커서 신뢰도가 가장 낮은 레이어를 나타낸다. QR-MRL에 비해 QR-LRL 에서 l_{LRL}을 제외 했을 때 나머지 레이어들의 최소 신뢰도가 크게 상승하게 되어 결국 성능이득을 달성한다[11].

3.3 제안된 QR-MML기법

QR-LRL이 QR-MRL에 비해 우월한 성능을 달성하는 이유는 l_{MRL}대신 l_{LRL}을 제외한 나머지 레이어들의 최저 신뢰도 값이 향상되기 때문이다. 이 관찰에 근거해서, 본 논문에서는 첫 번째 레이어를 제외한 나머지 레이어들의 추정 시 잡음상승을 가장 작도록 한다. 따라서 제외되었을 때 나머지 레이어들의 최고 잡음상승이 가장 작게 하는 레이어를 첫 번째 레이어로 정한다. 임의의 j번째 레이어를 제외한 채널이득행렬을 $\mathbf{H}_{(j)}=[\boldsymbol{h}_1\,\boldsymbol{h}_2\cdots\boldsymbol{h}_{j-1}\boldsymbol{h}_{j+1}\cdots\mathbf{h}_{n_T}]$와 같이 표현하면 다음과 같이 pseudo inverse 식을 표현할 수 있다.

$$\mathbf{G}^{(j)}=(\mathbf{H}_{(j)}^H\mathbf{H}_{(j)})^{-1}\mathbf{H}_{(j)}^H \tag{5}$$

위 식(5)를 기준으로 최고의 잡음상승을 가장 작게 하는 레이어를 minimum maximum layer (MML)라 하면 다음의 수식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} l_{MML} &= \arg\max_j \min_i SNR_i^j \\ &= \arg\max_j \min_i \frac{1}{\|\boldsymbol{g}_i^{(j)}\|^2} \\ &= \arg\min_j \max_i \|\boldsymbol{g}_i^{(j)}\|^2 \end{aligned} \tag{6}$$

여기서 $SNR_i^j, j=1,2,...,n_T$, $i=1,2,...,j-1, j+1, ...,n_T$는 j 번째 레이어를 제외했을 때 i번째 레이어의 검출 후 SNR을 나타내며, $\boldsymbol{g}_i^{(j)}$는 $\mathbf{G}^{(j)}$행렬의 i번째 행벡터를 의미한다. 제안된 QR-MML을

표 1. 검출순서화 복잡도 비교 (실수 곱셈횟수)

검출기법	연산내용	복잡도	반복횟수	총 연산량
QR-MRL	식(2)의 $n\times n$ psuedo inverse	$12\times n^3$	1	$12\times n^3+2n^2$
	식(3)의 $\|g_i\|^2$	$2n$	n	
QR-LRL	상 동	상 동	상 동	상 동
QR-MML	식(5)의 pusedo inverse	$(n-1)^2\times 8n$ $+(n-1)^3\times 4$	n	$(n-1)^2\times 8n^2$ $+(n-1)^3\times 4n$ $+2n^2(n-1)$
	식(6)의 $\|g_i^{(j)}\|^2$	$2n$	$(n-1)n$	

적용하기 위해서는 식 (5)로 표현되는 pseudo inverse를 각 j에 대해 구해야 하는 단점이 있다. 식 (5)의 계산은 채널이득이 변경될 때마다 수행해야 하므로 복잡도 증가정도가 채널의 시변성에 의존하게 된다.

복잡도 비교: 본 논문에서 거론된 QR-MRL, QR-MML, 그리고 제안된 QR-MML의 복잡도를 비교한다. 세 가지 기법 모두 검출순서화를 마친 이후 검출을 하는 절차는 동일하다. 따라서, 세 기법들의 복잡도는 검출순서화를 위한 복잡도를 비교하는 것이 중요하다. 실수 곱셈횟수를 기준으로 검출순서화의 복잡도 비교는 표 1과 같이 정리할 수 있다.

표 1의 비교는 1번의 복소수 곱이 4번의 실수곱셈과 같고, $n\times n$ 행렬의 역행렬 연산을 위해 $4n^3$회 실수 곱셈이 필요하고 두 개의 $n\times n$ 행렬의 곱셈연산이 $4n^3$회 실수 곱셈을 소요한다는 가정을 기반으로 한다. 표 1에서 알 수 있듯이 QR-MML의 주된 복잡도는 pusedo inverse의 n회 연산에 기인한다. [12]에서는 pusedo inverse를 곱셈을 회피하며 Cordic algorithm을 사용해서 효율적으로 구현하는 방법이 제안되었다. 이 구현기법을 사용하면 QR-MML의 복잡도 증가를 완화할 수 있을 것으로 기대된다.

Ⅳ. 모의실험

본 장에서는 4x4와 8x8의 MIMO 송수신 환경에서 모의실험을 통해 제안된 QR-MML에 의한 성능 향상을 보인다. 변조 방식은 16-QAM을 사용하였고, 가우시안 잡음 및 independent Rayleigh fading 채널을 가정하였다.

그림 2는 4x4 MIMO 환경에서 2가지 기존 검출기법들과 제안된 QR-MML의 성능을 비교한다. 세 가지 기법 중 기존 QR-MRL이 가장 열화된 성능을 보이며, 기존 QR-LRL과 제안된 QR-MML은 모두 개선된 성능을 보이면서 동시에 동일한 성능을 달성한다. 그림 2의 성능으로부터 4x4 MIMO 환경에서는 l_{LRL} 과 l_{MML}이 거의 항상 동일하다는 것을 추정할 수 있다. 또한, 그림 2에 나타난 바와 같이 기존의 QR-LRL 성능이 이미 ML성능에 근접해 있다는 것을 관찰할 수 있다. 따라서, QR-MML과 같은 어떠한 개선된 신호검출기법으로도 성능을 더 향상시키는 것은 불가능함을 알 수 있다. 그림 3은 8x8 MIMO 환경에서 세 가지 신호검출기법들의 성능을 비교한다. 이때에도 QR-MRL이 가장 열화된

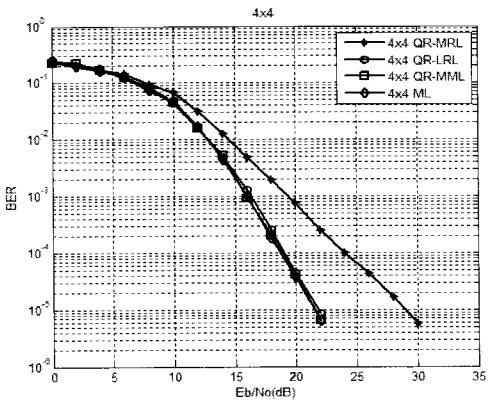


그림 2. 4x4 송수신 환경에서의 모의실험

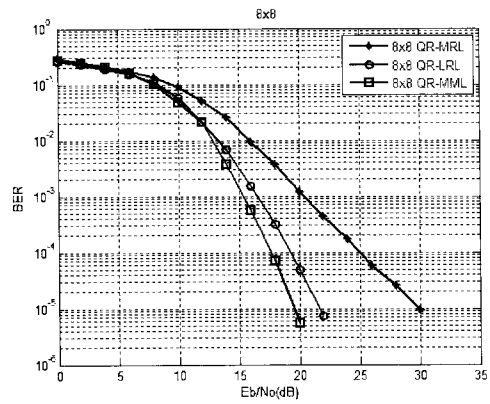


그림 3. 8x8 송수신 환경에서의 모의실험

성능을 보이고 QR-LRL이 QR-MRL에 비해 개선된 성능을 달성함을 알 수 있다. 오류율 10^(-5) 기준으로 4x4 환경에서의 성능과 비교할 때 8x8 환경에서 QR-MRL은 성능이 약 1.5dB 손실이 발생했고, QR-LRL은 아주 미미하게 손실이 발생했으나, QR-MML은 약 2.5dB 이득이 발생했음을 관찰할 수 있다. 제안된 QR-MML은 가장 우수한 성능을 달성함을 알 수 있는데, 이로부터 8x8 MIMO 환경에서는 l_{LRL}과 l_{MML}이 높은 확률로 다르다는 것을 추론할 수 있다. 3GPP LTE-Advanced 에서는 하향링크에서는 최대 8x8 까지 요구되고 있으며 상향링크에서는 최대 4x8까지의 지원이 요구된다[13],[14].

V. 결 론

본 논문에서는 한 개의 레이어에 해당하는 송신 신호에는 모든 성상점을 시도하고 나머지 레이어는 순차적 간섭제거 기법으로 구하여 후보벡터들을 생성하는 기법들을 다루었다. 기존의 QR-MRL과 QR-LRL은 각각 신뢰도가 가장 높은 레이어와 가장 낮은 레이러를 첫 번째 레이어로 선택하였다. 본 논문에서는 제외되었을 때 나머지 레이어들에게 일어나는 최고 잡음상승 값을 최소화하는 기준으로 첫 번째 레이어를 선택하는 QR-MML을 제안하였다. 모의실험을 통해 4x4 MIMO 환경에서는 기존의 QR-LRL과 제안된 QR-MML이 거의 동일한 성능을 나타내며, LTE-Advanced에서 요구하는 8x8 MIMO 환경에서는 제안된 QR-MML이 가장 우수한 성능을 달성함을 보였다. 제안된 QR-MML을 사용하기 위해서는 여러 번의 pusedo inverse가 소요되는 단점이 있으나, 이러한 pusedo inverse는 Cordic 알고리즘을 사용하여 간단히 구현이 가능함을 이용하여 하드웨어 구현 복잡도 증가를 완화할 수 있을 것으로 예상된다.

참 고 문 헌

[1] A. F. Naguib, N. Seshadri, and A. R. Calderbank, "Increasing data rate over wireless channel," *IEEE Sig. Proc. Mag.*, vol. 17, no. 2, pp. 744-765, Mar. 1998.

[2] 3GPP TS 36.211 "Technical specification group radio access network; evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA); physical channel and modulation," 2007-09.

[3] TTAS.KO-06.0082/R1, "2.3GHz 휴대인터넷 표준; 물리계층 및 매체접근제어 계층," 2005년 12월.

[4] J. Yue, K. J. Kim, J. D. Gibson, and R. A. Iltis, "Channel estimation and data detection for MIMO-OFDM systems," *Proc. of IEEE GLOBECOM*, pp. 581-585, 2003.

[5] U. Fincke and M. Pohst, "Improved methods for calculating vectors of short length in a lattice, including a complexity analysis," *Math. Comput.*, vol. 44, pp. 463-471, Apr. 1985.

[6] 김재권, 김영수, 김기호, "다중 안테나를 사용하는 차세대 이동통신을 위한 효율적 신호 검출기법," *SK Telecommun. Review*, 제 17권, 1호, PP. 183-191, 2007년 2월.

[7] G. J. Foschini, "Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas," *Bell Labs Technical Journal*, pp. 41-59, Oct. 1996.

[8] S. Kim and K. Kim, "Log-likelihood ratio based detection ordering in V-BLAST," *IEEE Trans. Commun.* vol. 54, no. 2, Feb. 2006.

[9] S. Lee, S. Park, S. W. Kim and I. Lee, "Enhanced Detection with New Ordering Schemes for V-BLAST Systems" *IEEE Trans. Commun.*, vol. 57 no. 6, pp. 1648-1651, June 2009.

[10] J. Kim, D. Kim, and S. Yun, "Mitigating Error Propagation in Successive Interference Cancellation," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E89-B, No. 10, pp. 2956-2960, Oct. 2006.

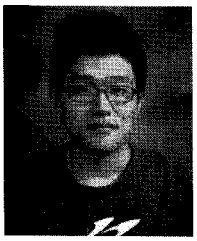
[11] S. Bahng, Y. Park, J. Kim, "QR-LRL signal detection for spatially multiplexed MIMO systems," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E91-B, no. 10, pp. 3383-3386, Oct. 2008.

[12] Z. Khan, T. Arslan, J. Thompson, and A. Erdogan, "Area & power efficient VLSI architecture for computing pseudo inverse of channel matrix in a MIMO wireless system." *Proc. of Int. Conf. VLSI Design*, 2006.

[13] 노태균, 고영조 외, "LTE-Advanced 표준화," 전자통신 동향분석 제 23권, 제3호, Oct. 2008.

[14] 3GPP TS 35.213 v8.6.0, "Evolved universal terrestrial radio access (E-UTRA) physical layer procedures," Mar. 2009.

박 상 현 (Sanghyun Bak) 준회원

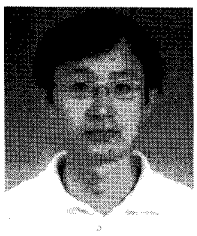


2009년 2월 연세대학교 원주캠퍼스 컴퓨터정보통신공학부 학사

2009년 3월~현재 연세대학교 원주캠퍼스 전산학과 석사 과정

<관심분야> 디지털 통신, OFDM, MIMO, 실용적인 신호검출 기법

김 재 권 (Jae-Kwon Kim) 종신회원



1995년 8월 중앙대학교 전기공학과 졸업

2000년 2월 중아대학교 전기공학과 석사

2004년 5월 The University of Texas at Austin 공학박사

2004년 8월~2005년 8월 삼성종합기술연구원 4G 시스템 Lab.

2005년 9월~현재 연세대학교 원주캠퍼스 컴퓨터정보통신공학부 조교수

<관심분야> 디지털 통신, OFDM, MIMO, 실용적인 신호검출 기법

양 원 영 (Won Young Yang) 종신회원

1975년 2월 서울대학교 전기공학과 졸업(학사)

1981년 2월 서울대학교 전기공학과 졸업(석사)

1986년 8월 USC 전기공학과 졸업(박사)

1986년 9월~현재 중앙대학교 전자전기공학부 교수