

시변 페이딩 환경에서 Lattice Reduction 기반 MIMO 수신기를 위한 계산량 감소 기법

준회원 김 한 나*, 종신회원 최 권 휴*

Complexity Reduction Scheme for Lattice Reduction-based MIMO Receiver under Time Varying Fading Environments

Hannah Kim* *Associate Member*, Kwonhue Choi* *Lifelong Member*

요 약

본 논문에서는 시변 페이딩 환경에서 기존의 Lattice Reduction(LR)기반 MIMO 수신기의 계산량을 효과적으로 감소시키는 새로운 기법을 제안한다. 시변 페이딩 채널 환경의 경우 매 프레임의 채널 행렬들이 시간 상관성에 의해 변화되므로, LR을 통해 얻어진 정수 행렬 P 가 시간에 따라 크게 바뀌지 않는 성질을 발견하였다. 이러한 특성을 이용하여 연속된 채널에 대하여 LR을 독립적으로 수행하는 것이 아니라 직전 채널에서 구한 P 를 초기조건으로 하여 LLL-LR 기법과 Seysen LR 기법을 수행한다. 실험결과에서는 제안된 기법이 기존 LR 기법과 같은 직교성 정도를 유지하면서 기존 LR 기법에 비해 계산량은 확연히 감소시켰음을 보인다.

Key Words : MIMO, Time Varying Fading Channel, Seysen LR, Lattice Reduction-Aided Detection, Complex LLL-LR

ABSTRACT

We propose a complexity reduced Lattice Reduction(LR) scheme for MIMO detection under time varying fading environments. It is found that for successive MIMO transmission instances, the integer matrix P after LR decomposition remains the same or only a few elements of the matrix P are slightly changed. Based on this feature, we perform LR reduction by setting the initial values for P matrix for the decomposition to be the one obtained in the previous instance not starting from the identity matrix. Simulation results reveal that the proposed scheme drastically reduces overall complexity of LR reduction compared to the conventional scheme for various system parameters under time varying channels. We also show that the proposed scheme can be applied to Seysen LR as well as LLL(Lenstra, Lenstra, and Lavasaz)-LR.

I. 서 론

최근 무선 통신 환경에서 고속 데이터 전송이 요구되면서 MIMO(Multiple Input Multiple Output) 시스템에 대한 관심이 늘고 있다. MIMO 시스템은

송수신 안테나의 개수가 늘어남에 따라, 다이버시티 이득 및 전송속도의 이득을 가진다. MLD(Maximum Likelihood Detection)는 이상적인 성능을 가지는 MIMO 검출기법이다. 그러나 송신 안테나의 개수가 늘어남에 따라 지수적으로 계산량이 증가하는 단점

※ 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었으며(NIPA-2009-C1090-0902-0045) 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2009-0088286)

* 영남대학교 정보통신공학과 광대역무선통신 연구실(hanna0112@ynu.ac.kr, gonew@yu.ac.kr)

논문번호 : KICS2009-06-254, 접수일자 : 2009년 6월 22일, 최종논문접수일자 : 2009년 10월 21일

이 있어, 이런 단점을 보완하기 위해 복잡도가 낮은 ZF(Zero-Forcing) 또는 MMSE (Minimum Mean Square Error)와^{[11][12]} 같은 선형 검출 기법이 제안되었지만 성능의 열화가 심각하다. 이에 최근에는 Lattice Reduction(LR)을 이용하여 채널 행렬을 직교 좌표계에 근접하게 변환시켜 선형 검출을 수행함으로써, 낮은 복잡도를 가지면서 ML의 성능에 가까운 방법으로 제안되었다^{[3][6]}. 채널 행렬을 거의 직교가 되도록 변환시키는 LLL(Lenstra-Lenstra-Lovasz)-LR 기법은 많은 계산량이 요구되어지고 안테나의 수가 늘어남에 따라 계산량이 증가되는 단점이 있어 최근 이를 보완하기 위해서 LLL-LR 기법 보다 낮은 복잡도를 가지는 Seysen LR 기법이 제안되었다^[7].

본 논문에서는 시변 페이딩 환경에서 기존의 LR 기반 MIMO 수신기의 계산량을 효과적으로 감소시키는 새로운 기법을 제안한다. 시변 페이딩 채널의 경우 매 프레임의 채널 행렬들이 시간 상관성에 의해 변화되므로, LR을 통해 얻어진 정수 행렬 P 가 시간에 따라 크게 바뀌지 않는 성질을 발견하였다. 이러한 특성을 이용하여 연속된 채널에 대하여 LR을 독립적으로 수행하는 것이 아니라 직전 채널에서 구한 P 를 초기조건으로 하여 LLL-LR 기법과 Seysen LR 기법을 수행한다. 실험결과에서는 제안된 기법이 기존의 LR 기법과 같은 직교성 정도를 유지하면서 기존 LR 기법에 비해 계산량은 확연히 감소시켰음을 보인다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 시스템의 구성, 기존의 LR 기법과 LR 검출 기법을 설명하고, 3장에서는 제안된 방식의 LR 기법을 설명한다. 4장에서는 본 논문이 제안하는 방식의 성능 및 계산량의 결과를 보인다.

II. 시스템 모델

2.1 시변 페이딩 환경의 MIMO 시스템 구성

본 논문에서는 N 개의 송신 안테나와 L 개의 수신 안테나로 구성된 시변 페이딩 환경의 MIMO 시스템을 고려하며, 수신 심벌 벡터 y 는 다음과 같이 표현된다.

$$y = H's + n \tag{1}$$

송신 신호 벡터 s 는 N 의 크기를 가지며 평균에너지 E_s 를 갖는 QAM(Quaternary Amplitude Modulation)으

로 변조된 심벌이라고 정의한다. 복소 AWGN을 나타내는 L 차원 잡음벡터 n 은 평균은 0 이며, 분산은 $N_0/2$ 인 가우시안 분포를 따른다고 가정한다. 또한 t 는 연속된 채널에 대해서 정적인 채널로 표시하기 위한 변수로 시각을 나타낸다. 시변 페이딩 환경에서의 시각 t 의 채널 행렬 H^t 는 $L \times N$ 의 크기를 가지며, 전체 채널의 평균과 분산이 일정하도록 식 (2)와 같이 first order autoregressive 모델^[8] 이용하여 발생시켰다.

$$H^t = \sqrt{1-d^2} \times H^{t-1} - d \times H_{\text{offset}} \tag{2}$$

여기서 H^{t-1} 는 이전 시각 $t-1$ 의 채널을 의미하고 H_{offset} 은 시각 t 의 채널 행렬 H^t 와 이전 시각 $t-1$ 의 채널 H^{t-1} 의 몫에 기여하는 행렬이다. 행렬 H^{t-1} 와 H_{offset} 은 $L \times N$ 크기를 가지고, 원소는 서로 독립이며 분산이 1인 복소 가우시안 분포를 따른다. d 는 이전 채널 H^{t-1} 와 시각 t 의 채널 H^t 의 변화의 크기를 결정하는 변수로써 크기가 클수록 채널의 변화가 크다.

2.2 Complex Lenstra, Lenstra, and Lavasaz (LLL)-Latticed basis reduction 기법

LR 기법은 시각 t 의 채널 행렬 H^t 를 거의 직교가 되도록 변환시키는 기법이다. 채널 H^t 의 열벡터 $\{h_j^t\}_{j=1}^N$ 로 이루어진 기저를 거의 직교를 이루는 새로운 기저 $\{\tilde{h}_j^t\}_{j=1}^N$ 로 변환된 벡터 \tilde{H}^t 는 다음과 같이 표현된다.

$$\tilde{H}^t = H^t P^t \tag{3}$$

여기서 P^t 는 $N \times N$ 의 크기를 가지면 모든 성분이 정수이고 행렬식(determinant)이 ± 1 이다. Complex LLL-Latticed basis reduction 기법을 통해 변환된 기저 벡터 $\{\tilde{h}_j^t\}_{j=1}^N$ 는 선형 독립이며 표 1과 같이 구할 수 있다^{[9]-[10]}. Complex LLL-Latticed basis reduction 기법은 Gram-Schmidt 과정으로부터 구한 Gram-Schmidt coefficients인 $\mu_{k,i}^t$ 을 이용하여 구할 수 있다.

$$\mu_{k,i}^t = \frac{\langle \hat{h}_i^t, \hat{h}_k^t \rangle}{\langle \hat{h}_i^t, \hat{h}_i^t \rangle} \quad (k=2,3,\dots,N, i=k-1,\dots,1) \tag{4}$$

여기서 $\langle \hat{h}_i^t, h_k^t \rangle = \hat{h}_i^{tH} h_k^t$ 로 두 열의 내적을 의미하고 \hat{h}_i^t 는 Gram-Schmidt 과정을 통해 얻어진 기저벡터로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{h}_1^t &= h_1^t \\ \hat{h}_k^t &= h_k^t - \sum_{i=1}^{k-1} \mu_{k,i}^t h_i^t \quad (k = 2, 3, \dots, L) \end{aligned} \quad (5)$$

식 (4)에서 계산된 $\mu_{k,i}^t$ 를 이용하여 reduced basis 와 LR 기법을 통하여 얻어지는 벡터 P' 의 기저 벡터 $\{p_k^t\}_{k=1}^L$ 을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} h_k^t &= h_k^t - \text{round}(\mu_{k,i}^t) h_i^t \\ p_k^t &= p_k^t - \text{round}(\mu_{k,i}^t) p_i^t \quad (k = 2, 3, \dots, L) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서 $\text{round}(\mu_{k,i}^t)$ 은 $\mu_{k,i}^t$ 을 실수부와 허수부 각각 가까운 정수로 반올림해준다. 초기의 P' 는 크기가 $L \times L$ 인 단위행렬 I_L 로 설정하여 LR 기법을 수행한다. 식 (6)을 통해 reduced basis가 만들어지고 식 (7)을 만족하는지 검사하도록 한다.

$$\delta \cdot \|\hat{h}_{k-1}^t\|^2 > \|\hat{h}_k^t + \mu_{k,k-1}^t \hat{h}_{k-1}^t\|^2, \quad 1/4 < \delta < 1 \quad (7)$$

여기서 δ 은 기저 벡터들 간의 직교성 정도를 결정하는 변수로 임의로 $1/4 < \delta < 1$ 의 범위에서 정할 수 있다. δ 값이 클수록 기저 벡터들이 직교에 가까워진다^[9]. 식 (7)을 만족하면 k 번째 열과 $k-1$ 번째 열을 교환해주고 다시 식 (6)을 이용하여 k 번째 열의 LR 한 새로운 열을 다시 구한다. 식 (7)번을 만족하지 않으면 k 번째 열을 더 이상 LR 할 필요가 없기 때문에 다음 열인 $k+1$ 번째 열을 LR 해준다. 식 (6)~(7)의 과정을 L 열까지 반복하고 이렇게 얻어진 기저 벡터 $\{\hat{h}_k^t\}_{k=1}^L$ 는 Complex LLL-Latticed basis reduction한 채널 \tilde{H}^t 가 된다.

2.3 Lattice reduction-aided 검출 기법

Lattice reduction-aided 검출 기법은 채널 행렬을 거의 직교로 변환시켜 ZF 선형 검출 기법으로 수신 신호를 검출함으로써 기존의 ZF 검출 기법에서 발생하는 잡음 증폭을 크게 줄일 수 있다^[1]. LR을 이

표 1. Complex LLL-Latticed basis reduction 기법

```

Input  $H$ , set  $k=2, 1/4 < \delta < 1, P=I_L$ 
While  $k \leq N$ 
For  $i=k-1, \dots, 1$ 
 $\mu_{k,i}^t = \frac{\langle \hat{h}_i^t, h_k^t \rangle}{\langle \hat{h}_i^t, \hat{h}_i^t \rangle}$ 
 $h_k^t = h_k^t - \text{round}(\mu_{k,i}^t) h_i^t$ 
 $p_k^t = p_k^t - \text{round}(\mu_{k,i}^t) p_i^t$ 
End
update  $\hat{h}_k^t$ 
if  $\delta \cdot \|\hat{h}_{k-1}^t\|^2 > \|\hat{h}_k^t + \mu_{k,k-1}^t \hat{h}_{k-1}^t\|^2, 1/4 < \delta < 1$ 
 $h_k^t \longleftrightarrow h_{k-1}^t$  (exchange)
 $p_k^t \longleftrightarrow p_{k-1}^t$  (exchange)
 $k = \max(k-1, 2)$ 
else
 $k=k+1$ 
end
end
Output:
 $\tilde{H}^t = [h_1^t, h_2^t, \dots, h_L^t], P^t = [p_1^t, p_2^t, \dots, p_L^t]$ 
    
```

용한 신호 검출 과정에서 수신 심벌 벡터 식 (1)은 다음과 같이 표현 된다.

$$y = H^t s + n = (H^t P^t)((P^t)^{-1} s) + n = \tilde{H} z + n \quad (8)$$

여기서 채널 행렬은 LR 기법을 통해 얻은 가상 채널 $\tilde{H} = H^t P^t$ 로, 송신 심벌 벡터 s 는 $z = (P^t)^{-1} s$ 로 변환된다. LR을 이용한 ZF(LR-ZF) 검파 과정은 그림1과 같다. 수신 심벌 벡터 y 에 $(\tilde{H}^t)^{-1}$ 을 곱한 뒤 양자화(quantized)한다. 양자화를 통해 얻은 벡터 \hat{z} 에 P^t 를 곱하여 송신 심벌벡터 $\hat{s} = P^t \hat{z}$ 를 검출한다.

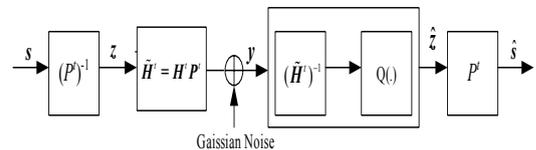


그림 1. Lattice reduction-aided 검출 기법

III. 제안하는 Lattice Reduction 기법

$$\bar{H}^t = H^t P^{t-1} \quad (10)$$

이번 절에서는 시변 페이딩 환경에서 계산량을 줄인 LR 기법을 제안한다. 제안된 기법에서는 시변 채널의 시간 특성을 이용하여 연속된 채널에 대하여 LR을 독립적으로 수행하는 것이 아니라 이전 채널에서 구한 P^{t-1} 을 이용하여 전체 계산량을 줄인다.

앞 절에서 언급했듯이 P^t 의 기저 벡터 $\{p_k^t\}_{k=1}^L$ 는 아래 식 (9)와 같이 반올림한 $\text{round}(\mu_{k,i}^t)$ 에 의해 결정된다.

$$p_k^t = p_k^{t-1} - \sum_{i=1}^{k-1} \text{round}(\mu_{k,i}^t) p_i^{t-1} \quad (9)$$

$$\mu_{k,i}^t = \frac{\langle \hat{h}_i^t, h_k^t \rangle}{\langle \hat{h}_i^t, \hat{h}_i^t \rangle} \quad (k=2,3,\dots,L, i=k-1,\dots,1)$$

시변 MIMO 환경에서는 시간에 따라 채널 환경이 변하는데 그 이전 시각의 채널과 상관성을 가진다. 만약 채널이 시간에 따라 크게 변하지 않는다고 가정해보자. 이런 경우에는, 시각 t 의 채널, H^t 의 기저 벡터 $\{h_j^t\}_{j=1}^N$ 의 크기가 이전 시각 $t-1$ 의 채널, H^{t-1} 의 기저 벡터 $\{h_j^{t-1}\}_{j=1}^N$ 와 비슷한 크기를 가지게 된다. 이때, 시각 t 채널 H^t 의 Gram-Schmidt coefficients인 $\mu_{k,i}^t$ 의 값 역시 그 이전 시각 $t-1$ 채널의 $\mu_{k,i}^{t-1}$ 의 값과 약간의 차이만을 갖게 된다. 시각 t 의 채널, H^t 와 시각 $t-1$ 채널의 변화가 크지 않다면 시각 t 의 $\mu_{k,i}^t$ 의 값과 시각 $t-1$ 의 $\mu_{k,i}^{t-1}$ 값의 크기 차이가 크게 나지 않기 때문에 반올림한 $\text{round}(\mu_{k,i}^t)$ 와 $\text{round}(\mu_{k,i}^{t-1})$ 는 동일할 확률이 높고 따라서, p_k^t 와 p_k^{t-1} 은 같은 기저 벡터가 될 확률이 높게 된다. 만약 이전 채널과 현 채널의 P 행렬이 동일하지 않더라도, 동일한 원소의 개수가 많을 확률이 높다. 즉 시변 페이딩 환경에서는 채널의 시간 상관 특성으로 인하여 LR 기법을 통해 얻어진 벡터 P^t 가 이전 채널에서 얻은 벡터 P^{t-1} 과 비교했을 때 동일하거나 비슷하다는 것을 알 수 있다. 본 논문에서는 이러한 특성을 이용하여 새로운 LR 기법을 제안한다.

기존 LR 기법에서는 H^t 을 이용하여 LR 과정을 수행하지만 제안하는 기법에서는 P^t 가 잘 변하지 않는다는 특성을 이용하여 H^t 와 이전 시각의 P^{t-1} 의 곱한 \bar{H}^t 을 이용하여 LR 과정을 수행한다.

식 (10)을 이용하여 LR 한 \bar{H}^t 의 새로운 기저는 식 (11)을 이용하여 구할 수 있다.

$$\bar{h}_k^t = \bar{h}_k^{t-1} - \sum_{i=1}^{k-1} \text{round}(\mu_{k,i}^t) \bar{h}_i^{t-1} \quad (k=2,3,\dots,L) \quad (11)$$

만약 이전 시각의 P^{t-1} 의 기저 벡터 $\{p_k^{t-1}\}_{k=1}^L$ 가 t 시각의 P^t 의 기저 벡터 $\{p_k^t\}_{k=1}^L$ 와 같다면 \bar{H}^t 의 기저 벡터 $\{\bar{h}_j^t\}_{j=1}^N$ 은 거의 직교에 가까운 열 벡터이기 때문에 더 이상 LR을 해줄 필요가 없게 된다. LR을 해줄 필요가 없을 경우에는 이전 시각 $t-1$ 에서 수행한 기존 LR 과정이 시각 t 에서의 기존 LR 과정과 중복이 되기 때문에 $\sum_{i=1}^{k-1} \text{round}(\mu_{k,i}^t) = 0$ 이 된다. 이와 같이 본 논문에서는 이전 시각의 P^{t-1} 을 사용하여 중복되는 계산량을 줄일 수 있다. 반대로, t 시각의 P^t 의 기저 벡터 $\{p_k^t\}_{k=1}^L$ 가 이전 시각의 P^{t-1} 의 기저 벡터 $\{p_k^{t-1}\}_{k=1}^L$ 와 비교하여 변하게 되면, 이전 시각 $t-1$ 에서 수행한 기존 LR 과정이 시각 t 에서의 기존 LR 과정이 다르기 때문에 식 (11)에서 $\sum_{i=1}^{k-1} \text{round}(\mu_{k,i}^t) \neq 0$ 이 되어 새로운 기저를 구한다. 이러한 경우, 이전 시각의 P^{t-1} 을 이용하여 LR을 하게 된다. 시변 채널 환경에서는 채널의 변화가 크지 않기 때문에 식 (10)을 식 (12)와 같이 근사화 할 수 있다.

$$H^t P^{t-1} (= \bar{H}^t) \approx H^t P^t (= \tilde{H}^t) \quad (12)$$

식 (12)를 보면 알 수 있듯이 \bar{H}^t 은 이미 직교로 변환된 상태임을 알 수 있다. 그렇기 때문에 P^{t-1} 을 이용하여 LR을 수행하는 것은 P^t 행렬을 단위행렬 (I_L)로 초기화하여 LR을 수행하는 기존 방식보다 적은 계산량으로 LR을 수행 할 수 있다.

본 논문에서 제안하는 기법에서는 LR을 해야 하는 기저들을 구분하기 위해서 $\text{round}(\mu_{k,i}^t)$ 값들을 식 (13)와 같이 체크한다.

$$S = \sum_{i=1}^{k-1} \left| \text{round}(\mu_{k,i}^t) \right| \quad (13)$$

여기서 $|\bullet|$ 은 절대값을 의미한다. $S \neq 0$ 이면 시각 t 의 $\text{round}(\mu_{k,i}^t)$ 와 시각 $t-1$ 의 $\text{round}(\mu_{k,i}^{t-1})$ 이 같지 않기 때문에 식 (11)번을 이용하여 k 열의 LR한 새로운 기저를 구한다. $S=0$ 이 되면 p_k^{t-1} 와 p_k^t 가 같다는 것을 의미하기 때문에 그 이전의 p_k^{t-1} 을 그대로 사용하고 k 열과 $k-1$ 의 열의 길이를 체크하는 식 (14)을 만족하는지 체크하도록 한다.

$$\delta \cdot \|\hat{h}_{k-1}^t\|^2 > \|\hat{h}_k^t + \mu_{k,k-1} \hat{h}_{k-1}^t\|^2 \quad (14)$$

$S \neq 0$ 이 되면 새로운 기저를 구한 후 \hat{h}_i^t 의 값이 새롭게 갱신되었기 때문에 Gram-Schmidt의 과정을

통해 얻어진 기저 벡터 \hat{h}_i^t 를 식 (4)을 통해 다시 구한 후 식 (14)을 만족하는지 체크한다. 식 (14)을 만족하면 k 열과 $k-1$ 열을 교환해주고 식 (14)을 만족하지 않으면 더 이상 k 열은 LR을 해줄 필요가 없기 때문에 다음 열린 $k+1$ 번째 열을 LR을 해준다. 매번 S 의 값을 체크하여 LR을 해주어야 하는 기저만 구분하여 새로운 기저를 구하는 과정을 L 열까지 반복하고 이렇게 얻어진 기저 벡터 $\{\bar{h}_j\}_{j=1}^N$ 는 최종적으로 LR을 수행한 기저 벡터가 된다. 그림 2는 본 논문에서 제안하는 기법의 절차를 도식화한 것이다. 제안하는 알고리즘 P 의 초기값은 단위행렬(I_L)로 두고 LR을 해주었고 다음 시각부터 이전 채널에서 구한 P 를 사용하여 LR을 해주었다.

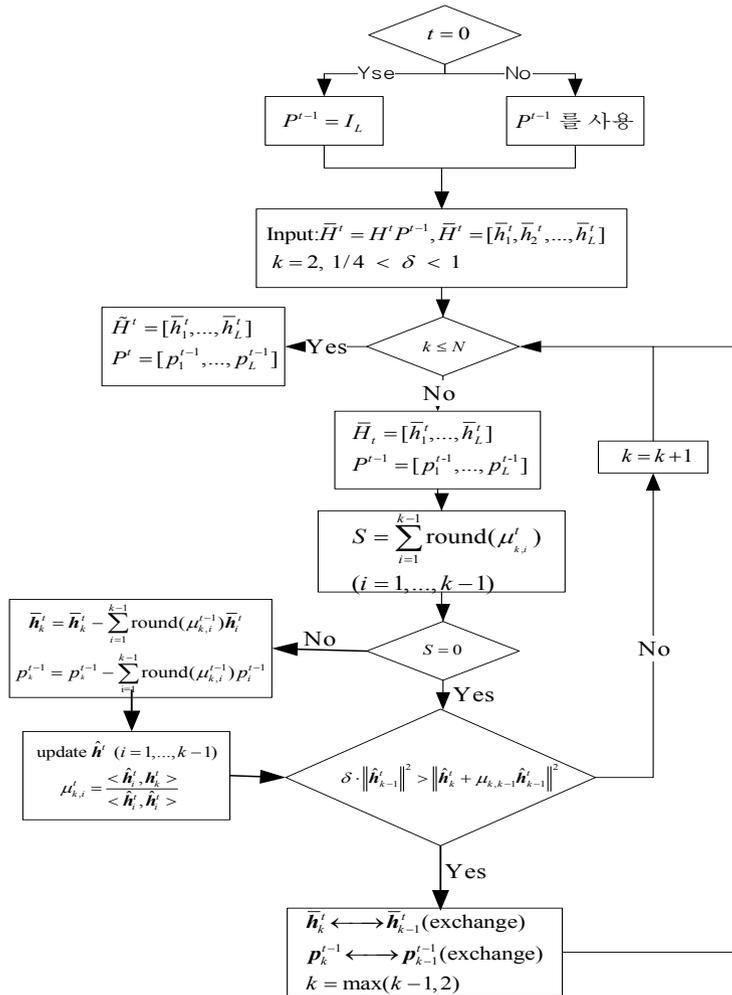


그림 2. 제안하는 LR 기법

이전 시각의 P^{t-1} 을 사용하여 LR을 수행하는 제안하는 LR 방식은 Complex-LLL LR 방식에만 적용할 수 있는 것만이 아니라 Seysen LR 기법^[7]에도 적용이 가능하다. 제안하는 LR 기법에서와 같이 t 시각의 채널 H^t 와 P^{t-1} 을 곱한 식 (10)을 이용하여 Seysen LR 기법에 적용하면 어느 정도 LR이 된 상태에서 LR을 해주기 때문에 기존 Seysen 기법에서 수행해야 하는 중복되는 Seysen LR 과정의 계산량을 줄일 수 있다.

다음 절의 실험 결과에서는 제안된 LR 기법이 기존의 LR 기법과 같은 성능을 가지며 기존의 LR 기법에 비해 계산량이 확연히 작다는 것을 보여준다. 또한 기존 Seysen 기법에 전 채널에서 구한 P^{t-1} 를 초기조건으로 하여 LR을 수행하는 제안된 계산량 줄인 LR 방식이 Seysen LR 기법에도 적용이 가능하다는 것을 보여준다.

IV. 실험 결과

본 절에서는 시변 페이딩 환경에서 제안하는 알고리즘이 기존의 알고리즘과 같은 직교성을 가지면서 계산량을 감소시켰음을 실험을 통해 보인다. 본 논문에서 시변 페이딩 환경은 식 (2)와 같이 발생하였고 연속된 채널의 변화량을 결정짓는 변수 d 는 0.01~1의 영역에서 분석하였다. 또한 10^6 개 이상의 채널을 생성하여 실험을 하였다.

표 2는 채널 변화의 크기에 따라 이전 시각 $t-1$ 의 행렬 P^{t-1} 와 시각 t 의 행렬 P^t 를 비교하여 동일한 확률을 표로 나타내었다. 송, 수신 안테나의 수는 $N=L=2,4,6$ 이고 벡터들 간의 직교성 정도를 결정짓는 변수 $\delta=0.9$ 로 설정하였다. 채널의 변화가 큰 경우를 보면 이전 시각의 행렬 P^{t-1} 와 시각 t 의 행렬 P^t 가 동일한 확률이 매우 작다. 예를 들어, 송수신 안테나의 수가 4, $d=0.5$ 인 경우 이전 시각의 행렬 P^{t-1} 와 시각 t 의 P^t 가 동일한 확률이 2%로 작음을 알 수 있다. 반면, 현실적인 채널 상황인 채널의 변화가 작은 경우($d=0.01,0.1$)를 보면 이전 시각의 행렬 P^{t-1} 와 시각 t 의 행렬 P^t 가 동일한 확률이 커짐을 표 2를 통해서 알 수 있다. 예를 들어, $d=0.01$ 일 경우 안테나의 수와 상관없이 이전 시각의 행렬 P^{t-1} 와 시각 t 의 행렬 P^t 가 거의 90% 이상 같다는 것을 알 수 있다. 이 결과를 통해 시변 페이딩 환경에서는 P 행렬이 잘 변하지 않는다는 것을 알 수 있다. 제안하는 기법에서는 이러한 성질을 이용하여 LR 기법의 계산량을 줄이고자 한다.

표 2. 시각 $t-1$ 행렬 P^{t-1} 와 시각 t 의 행렬 P^t 가 동일한 확률

δ	채널 변화크기 (d)	안테나수($L \times N$)		
		P^{t-1} 와 P^t 가 동일한 확률		
		2 X 2	4 X 4	6 X 6
0.9	0.01	98.15%	91.59%	91.86%
	0.1	61.75%	45.22%	42.81%
	0.5	11.47%	2%	1.7%
	0.7	6.17%	0.9%	0.5%

이전 채널과 현 채널의 기저벡터가 동일하다면 그대로 사용하여 계산량을 감소 시켰다. 또한 이전 채널과 현 채널 P 행렬의 기저 벡터들이 동일하지 않더라도 단위행렬(I_d) 벡터를 사용하여 LR을 해주는 기존 LR 기법과 비교하여 어느 정도 LR이 된 상태에서 LR을 해주기 때문에 계산량을 줄일 수 있다.

표 3은 안테나의 수, 기저 벡터들 간의 직교성 정도를 결정짓는 변수 δ 와 이전 채널과의 변화의 크기(d)에 따라 기존의 방식과 제안된 방식의 평균 계산량과 기저들간의 평균 correlation, χ 을 비교하였다. 평균 계산량은 새로운 기저를 찾기 위해 계산되는 곱셈과 나눗셈의 횟수를 합하여 측정하였다. 기저들간의 평균 correlation, χ 은 식 (15)와 같이 서로 다른 기저벡터들의 서로 이루는 각도를 측정하였고 0.5π 에 가까울수록 직교에 가까워짐을 의미한다.

$$\chi = E_{(i \neq j)} \left[\cos^{-1} \left(\frac{\langle \tilde{h}_i, \tilde{h}_j \rangle}{\|\tilde{h}_i\| \|\tilde{h}_j\|} \right) \right] \quad (15)$$

표 3에서 알 수 있듯이 제안된 기법은 기존의 기법의 χ 와 거의 동일함을 알 수 있다. 하지만 평균 계산량을 비교해보면 제안된 기법이 기존 기법에 비해 계산량이 현저히 감소되었음을 알 수 있다. 먼저 채널 변화의 크기에 따라 기존 기법과 제안된 기법의 계산량과 χ 을 비교해 보면 제안된 기법이 채널 변화의 크기에 상관없이 기존 LR 기법보다 더 적은 평균 계산량을 가짐을 알 수 있다. 예를 들어 송수신 안테나의 수가 4, $\delta=0.9$ 이고 채널의 변화가 작은 경우($d=0.01$)에 제안된 기법은 같은 χ 을 유지하면서 평균 계산량은 기존 기법의 평균 계산량에 비해 약 1/5로 감소되었음을 알 수 있다. 채널의 변화가 큰 경우인, $\delta=0.9, d=0.5$ 인 경우, 안테

표 3. 제안하는 LR 기법과 기존의 LR 기법의 평균 계산량과 χ 비교

δ	채널 변화크기 (d)	LR	안테나수($L \times N$)					
			2 X 2		4 X 4		6 X 6	
			평균 계산량	χ	평균 계산량	χ	평균 계산량	χ
0.3	0.01	기존 기법	34	0.38π	617	0.39π	3435	0.40π
		제안된 기법	20	0.38π	310	0.39π	444	0.40π
	0.5	기존 기법	40	0.41π	679	0.41π	3414	0.40π
		제안된 기법	30	0.41π	550	0.41π	679	0.40π
0.9	0.01	기존 기법	44	0.42π	1825	0.42π	10028	0.42π
		제안된 기법	19	0.42π	327	0.42π	557	0.42π
	0.5	기존 기법	58	0.43π	1827	0.43π	11164	0.43π
		제안된 기법	45	0.43π	1002	0.43π	1149	0.42π

나수가 4인 경우 제안된 기법은 기존 기법에 비해 같은 χ 를 유지하면서 계산량은 약 1/1.8 감소하였다. 제안된 기법은 시변 페이딩 환경에서 P^{-1} 을 사용하여 LR을 해주므로써 기존 LR 기법보다 적은 계산량으로 효율적으로 채널을 직교로 변환시키는 것을 알 수 있다.

기존의 LR 기법은 직교성 정도를 결정하는 변수 δ 값이 클수록 기저 벡터들이 직교에 가까워지는 장점이 있지만 계산량이 증가하는 단점이 있다. 예를 들어 $L=N=6$, $d=0.01$ 인 경우, $\delta=0.9$ 인 기존 LR 기법은 $\delta=0.3$ 인 기존 LR 기법보다 계산량이 약 3 배 많음을 알 수 있다. 하지만 제안된 기법을 LR은 δ 값이 증가하여도 기존 기법보다 적은 계산량으로 LR을 할 수 있다. 표 3에서 알 수 있듯이 제안된 기법과 기존 기법의 평균 계산량을 $L=N=6$, $d=0.01$ 일때 비교해 보면 $\delta=0.9$ 인 경우 제안된 기법은 기존기법과 같은 직교성을 유지하면서 약 1/18배 정도 평균 계산량이 감소되었고, $\delta=0.3$ 인 경우 ($L=N=6$, $d=0.01$), 제안된 기법은 기존의 기법의 평균 계산량에 비해 약 1/7배 정도 감소되었음을 알 수 있다. 제안된 기법은 δ 이 증가하여도 기존의 기법에 비해 현저히 적은 계산량을 가지고 같은 χ 를 유지함을 알 수 있다.

그림 3~4에서는 제안된 LR 기법과 기존 LR 기법을 통해 얻은 새로운 가상 채널을 이용하여 ZF 검출 기법으로 수신 신호를 검출하여 SER(Symbol Error Rate) 성능을 측정하였다. 그림 3와 그림 4에서는 채널의 변화크기 d 에 따라 제안된 기법과 기존 기법의 SER 성능을 송수신 안테나의 수가 2개, 16 QAM 그리고 $\delta=0.9$ 환경에서 비교하였다. 그림

3은 채널의 변화 크기가 $d=0.01$ 인 작은 경우로 제안된 기법과 기존 기법의 SER의 성능이 같음을 알 수 있다. 채널의 변화가 큰 $d=1$ 인 경우에는 식 (2)에서 알 수 있듯이 이전 채널과 상관성을 가지지 않고 채널이 변한다는 것을 알 수 있다. 채널이 이전 채널과 상관없이 독립적으로 생성되는 환경에서도 그림 4에서 알 수 있듯이 제안된 기법과 기존 기법의 SER 성능이 같음을 알 수 있다. 즉, 이 실험을 통해 제안된 기법은 이전 채널과 상관성을 가지지 않고 독립적으로 변하는 채널 환경에서도 기존 기법과 같은 직교성을 가지도록 LR을 해주는 것을 알 수 있다.

그림 5는 제안된 방식과 기존 방식이 동일한 평균 계산량을 가질 경우에 $N=L=4$, 16QAM, $\delta=0.9$, $d=0.01$ 인 환경에서 두 방식의 SER 성능을 비교하

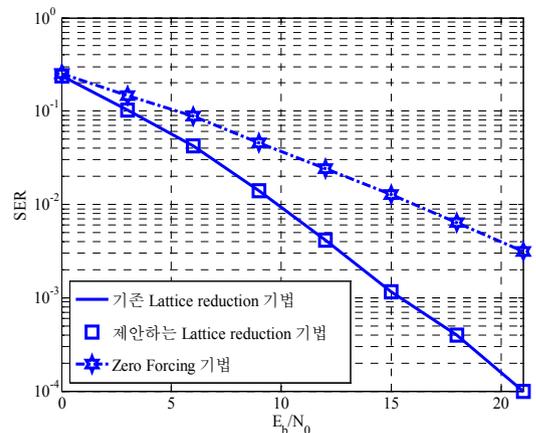


그림 3. 제안된 기법과 기존 기법의 SER 성능($N=L=2, 16QAM$, $\delta=0.9$, $d=0.01$)

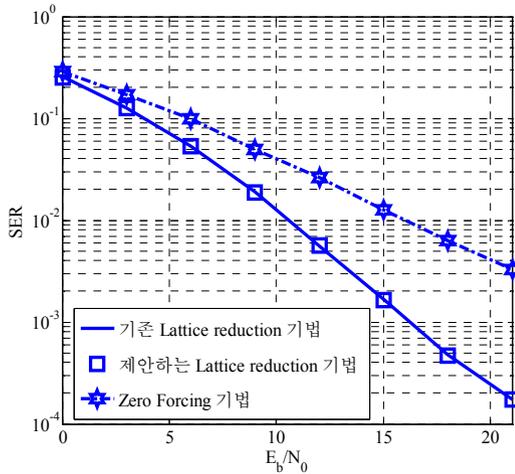


그림 4. 제안된 기법과 기존 기법의 SER 성능(N=L=2,16QAM, $\delta=0.9$, $d=1$)

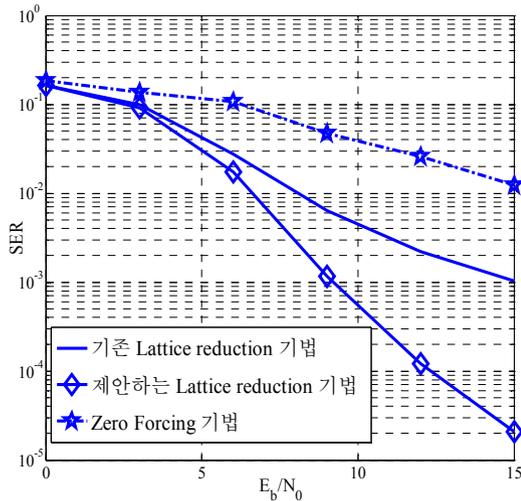


그림 5. 동일한 계산량을 가질 경우 제안된 기법과 기존 기법의 SER 성능 비교(N=L=4,16QAM, $\delta=0.9$, $d=0.01$)

였다. 기존 방식과 제안된 방식의 계산량을 동일하게 하기 위해서 표 2를 바탕으로 하여 기존 방식은 5번에 한번씩 LR을 해주었다. 그림 5에서 알 수 있듯이 제안된 방식의 SER 성능이 $SER=10^{-3}$ 일 때 기존 LR 기법의 SER 성능에 비해 6dB 정도 성능이 좋음을 알 수 있다. 이 결과를 통해서 두 기법인 같은 평균 계산량을 가질 경우 제안된 기법이 기존 기법보다 SER 성능이 더 좋음을 알 수 있다.

지금까지 first order autoregressive 채널 모델을 사용하여 제안하는 LR 기법과 기존 LR 기법의 SER 성능을 비교하였다. 좀 더 현실적인 채널상황을 고려하기 위해서 도플러 주파수에 따라 채널이

변하는 시변 페이딩 채널 환경에서 실험을 해보았다. 표 4는 시변 페이딩 채널을 위해서 사용한 MathWorks 사의 Simulink 패키지의 “Multipath Rayleigh Fading Channel” 블록의 내부 변수 설정을 보인 것이다. 도플러가 존재하더라도 작은 시간 간격안의 연속된 MIMO 채널들에 대해서는 정적인 채널로 근사화 할 수 있으므로 $n(>=1)$ 의 정수배 프레임에서는 기존 LR 기법으로 LR을 수행하였다. 나머지 프레임에서는 제안하는 LR 기법으로 LR을 수행하는 A 방식, LR을 수행하지 않고 가장 최근에 수행한 LR 결과를 그대로 사용하는 B 방식과 매번 기존 LR 기법을 LR 수행한 경우의 계산량과 SER 성능을 비교해보았다. 그림 6은 $N=L=4$, $E_b/N_0=30\text{dB}$, 35dB , 16QAM, MIMO 프레임 rate는 1MHz이고 도플러 주파수가 700Hz인 경우에 A 방식과 B 방식의 각각에 대하여 n 값을 달리하면서 바뀌는 계산량과 SER 성능을 그래프로 나타낸 것이다. 그림 6에서 알 수 있듯이 제안하는 기법을 적용한 경우 A 방식이 B 방식보다 더 좋은 SER 성능을 가짐을 알 수 있다. 예를 들어 $E_b/N_0=35\text{dB}$ 이고 곱셈 계산량이 1000인 경우 제안된 LR 기법을 적용한 A 방식이 B 방식보다 SER 성능이 약 3배 정도 좋음을 알 수 있다. 또한 A 방식은 매번 기존 LR 방식으로 LR을 해준 경우와 같은 SER 성능을 가짐을 알 수 있다. 즉 제안된 방식이 매번 LR을 해준 방식과 SER 성능의 저하 없이 적은 계산량으로 LR을 해줄 수 있음을 알 수 있다.

표 4. Multipath Rayleigh Fading Channel 블록의 내부 변수

Maximum Doppler Shift(Hz)	700
Delay vector(s)	$[0 \ 2 \times 10^{-6}]$
Gain vector(dB)	$[0 \ -3]$

제안하는 LR 기법과 같이 t 시각의 채널 H^t 와 P^{t-1} 을 곱하여 LR을 수행하는 방식은 Seysen LR 기법에도 적용이 가능하다. 기존 Seysen LR 기법에서는 채널 H^t 를 이용하여 LR 과정을 수행하지만 계산량 줄인 Seysen LR 기법에서는 H^t 와 P^{t-1} 을 곱한 식 (10)을 이용하여 Seysen LR 과정을 수행하였다. 제안된 기법으로 계산량을 줄인 Seysen LR 방식과 기존의 Seysen LR 방식의 평균 correlation χ 와 곱셈 계산량과 나눗셈 계산량을 합한 평균 계산량을 표 5에서 비교하였다. 표 5에서는 first order autoregressive 채널 모델을 사용하였고, $N=L=2$, 채

표 5. 제안된 Seysen LR기법과 기존 Seysen LR 기법의 평균 계산량과 χ 비교 (N=L=2)

채널 변화 크기 (d)	LR 기법	평균 계산량	χ
0.01	기존 Seysen LR 기법	2335	0.42π
	제안된 Seysen LR 기법	250	0.42π
0.1	Seysen LR 기법	2100	0.45π
	제안된 Seysen LR 기법	751	0.45π
0.3	Seysen LR 기법	2322	0.45π
	제안된 Seysen LR 기법	1800	0.45π

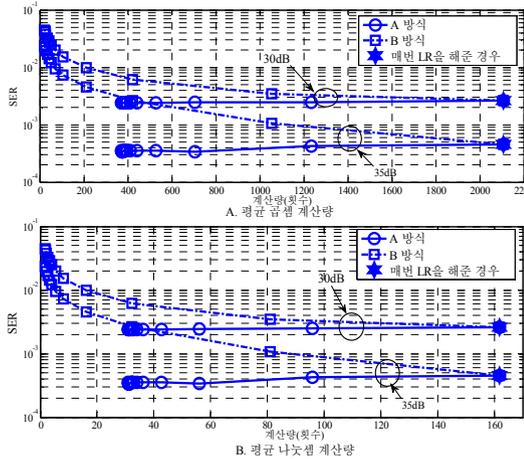


그림 6. 제안하는 LR 기법을 적용한 경우와 기존 LR기법의 평균 계산량과 SER 성능 비교 (Doppler frequency=700Hz, 16 QAM, N=L=4, n=1,2,5,10,20,30,...,100, Eb/N0=30dB, 35dB)

널 변화크기를 결정하는 $d=0.01, 0.1, 0.3$ 으로 설정하였다. 채널의 변화의 크기 $d=0.01$ 인 경우 제안된 Seysen LR 기법은 기존 Seysen LR 기법과 같은 χ 값을 유지 하면서 계산량은 약 1/9 감소 하였음을 알 수 있다. 채널의 변화 $d=0.1$ 인 경우에도 계산량 줄인 Seysen LR 기법의 계산량이 기존 Seysen LR 기법의 계산량 보다 약 1/3 정도 감소 하였음을 알 수 있다. 이 실험을 통해서 시변 페이딩 채널 환경에서 직전 채널에서 구한 P^1 을 초기 조건으로 하여 LR을 수행하는 것은 Complex-LLL LR 기법 뿐만이 아니라 Seysen LR 기법에도 적용할 수 있음을 증명해 보였다.

V. 결 론

본 논문에서는 시변 페이딩 채널 환경의 시간 상

관성을 이용하여 기존 LR 과정의 계산량을 줄인 새로운 LR기법을 제안하였다. 제안하는 LR 기법은 LR 기반으로 하는 MIMO 수신기에 적용함으로써 MIMO 수신기의 복잡도를 크게 감소시키는 효과를 얻을 수 있었다. 이러한 시변 상관 성질을 이용한 채널 행렬 연산의 감소 방식을 QRD(QR-Decomposition) 또는 SVD(Singular Value Decomposition)와 같은 다른 행렬 연산 과정으로 확장하여 적용할 경우 계산량의 감소 효과를 기대할 수 있는데, 이 연구 또한 본 저자들에 의해 진행 중이다.

참 고 문 헌

- [1] Huan Yao and W. Wornell, "Lattice-Reduction-Aided Detectors for MIMO Communication Systems," *Global Telecommunication Conference*, vol. 1, pp. 424-428, Nov. 2002.
- [2] Drink Wübben, Ronald Böhnke, Volker Kühn, and Karl-Dirk Kammeyer, "Near-Maximum-Likelihood Detection of MIMO Systems using MMSE-based Lattice-Reduction," *2004 IEEE International Conference on Communications*, vol. 2, pp. 798-802, June. 2004.
- [3] M.O. Damen, H.F. Germal, and G. Caire, "On maximum-likelihood detection and the search for the closet lattice point," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 49, pp. 2389-2402, Oct. 2003.
- [4] Windpassinger, C. Fischer, R.F.H., "Low-complexity Near-Maximum-Likelihood Detection and Precoding for MIMO Systems using Lattice Reduction," in *Proc. IEEE Information Theory Workshop*, Nov. 2002.
- [5] T.D. Nguyen, X.N. Tran and T. Fujino, "Layer Error Characteristic of Lattice-Reduction Aided V-BLAST Detectors," *IEICE Transactions on Fundamentals of Electronics and Computer Science*, vol. 10, pp. 2535-2534, Oct. 2006.
- [6] Windpassinger, C. Fischer, R.F.H. Huber, J.B., "Lattice-reduction-aided broadcast precoding," *IEEE Transactions on Communications*, vol. 52, pp.2057-2060, Dec. 2004.
- [7] J. Niu and I-Tai Lu, "A New Lattice Reduction Based Receiver for MIMO Systems," *Proc. of 41st CISS*, March. 2007.

- [8] H. Wang and P. Chang, "On verifying the first-order Markovian assumption for a Rayleigh fading channel model," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 45, pp.353-357, Sep. 2004.
- [9] Inaki Berenguer and Xiaodong Wang, "MIMO Antenna Selection With Lattice- Reduction-Aided Linear Receivers," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 53, pp.1289-1302, Sep. 2004.
- [10] Tien Duc Nguyen, Tadashi Fujino and Xuan Nam Tran, "An Improved Quantization Scheme for Lattice-Reduction Aided MIMO Detection," *2007 International Symposium on Communications and Information Technologies(ISCIT 2007)*, vol. 45, pp.296-300, Oct. 2007.

김 한 나 (Hannah Kim)

준회원



2007년 2월 : 영남대학교 전자
공학과졸업
2008년 3월~현재 영남대학교
정보통신공학과 석사과정
<관심분야> MIMO detection
알고리즘

최 권 휴 (Kwonhue Choi)

중신회원



1994년 2월 포항공과대학교 전
자전기공학과 졸업
1996년 2월 포항공과대학교 전
자전기공학과 석사
2000년 2월 포항공과대학교 전
자전기공학과 박사

2000년 4월~2003년 2월 한국전자통신연구원 광대
역 무선전송 연구부 광대역 무선전송 연구팀 선
임연구원

2003년 2월~현재 : 영남대학교 전자정보공학부 정보
통신공학전공 부교수

<관심분야> OFDM 기반 다중반송파 전송방식,
MIMO detection 알고리즘, CDMA 시스템