

# 페이딩 채널의 시간 상관성을 이용한 Lattice Reduction 기반 MIMO 수신기 계산량 감소 기법

준회원 김 한 나\*, 종신회원 최 권 휴\*°, 김 수 영\*\*

## Low Complexity Lattice Reduction for MIMO Detection using Time Correlation of the Fading Channels

Hannah Kim\* Associate Member, Kwonhue Choi\*°, Sooyoung Kim\*\* Lifelong Member

### 요 약

본 논문에서는 페이딩 채널의 시간 상관성을 이용한 Lattice Reduction(LR)기반 MIMO 수신기의 계산량을 효과적으로 감소시키는 새로운 기법을 제안한다. 시변 페이딩 채널 환경에서는 채널의 시간 상관 특성으로 인하여 LR을 통해 얻어진  $P$  행렬이 시간에 따라 크게 바뀌지 않는다. 이러한 특성을 이용하여 제안된 기법에서는 채널이 바뀔 때 마다 LR을 수행하는 것이 아니라 수신단에서  $K$ 개의 채널 프레임을 저장하여  $K$ 번째 채널, 즉  $nK$ 번째 ( $n=1,2,3..$ ) 채널에서만 LR을 수행하여  $P$  행렬을 구한 후  $(n-1)K$ 번째  $P$  행렬과 비교한다. 두 개의  $P$  행렬이 동일한 경우  $K-1$ 개의 채널 프레임에서는 LR을 수행하지 않고  $K$ 번째 채널 프레임의  $P$  행렬을 그대로 사용하여 불필요한 계산량을 감소시켰다. 반대로 두 개의  $P$  행렬이 다른 경우 나머지  $K-1$ 개 채널 프레임의  $P$  행렬을 이전 채널 프레임에서 구한  $P$  행렬을 초기조건으로 하여 LR을 수행함으로써 계산량을 감소시킨다. 제안된 기법은 기존 LR 기법과 같은 성능을 유지하면서 계산량을 확연히 감소시킨다.

**Key Words** : Lattice Reduction, MIMO, Time Correlation of the Fading Channel, Lattice Reduction-Aided Detection

### ABSTRACT

We propose a very low complexity lattice reduction (LR) algorithm for MIMO detection in time varying channels. The proposed scheme reduces the complexity by performing LR in a block-wise manner. The proposed scheme takes advantage of the temporal correlation of the channel matrices in a block and its impact on the unimodular matrices during LR process. From this, the proposed scheme can skip a number of redundant LR processes for consecutive channel matrices and performs a single LR in a block. The simulation results investigated in this letter reveal that the proposed detection scheme requires only 43.4% multiplications and 17.3% divisions of LLL-LR and only 50.2% multiplications and 68.2% divisions of the conventional adaptive LR with almost no performance degradation.

### I. 서 론

최근 무선 통신 환경에서 고속 데이터 전송이 요구

되면서 MIMO(Multiple Input Multiple Output) 시스템에 대한 관심이 늘고 있다. MIMO 시스템은 송수신 안테나의 개수가 늘어남에 따라, 다이버시티 이득 및

\* 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터(NIPA-2010-C1090-1031-0009)와 2009년 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의(No. 2009-0088286) 지원을 받아 수행된 기초연구사업임

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

\*\* 전북대학교 전자공학부 디지털통신시스템 연구실(sookim@chunbuk.ac.kr)

논문번호: KICS2010-03-087, 접수일자: 2010년 3월 2일, 최종논문접수일자: 2010년 5월 31일

전송속도의 이득을 가진다. MLD (Maximum Likelihood Detection)는 이상적인 성능을 가지는 MIMO 검출기법이다. 그러나 송신 안테나의 개수가 늘어남에 따라 지수적으로 계산량이 증가하는 단점이 있어, 이런 단점을 보완하기 위해 복잡도가 낮은 ZF(Zero-Forcing) 또는 MMSE (Minimum Mean Square Error)와 같은 선형 검출 기법이 제안되었지만, 선형 검출 과정에서 잡음 증폭에 의해 성능의 열화가 심각하다. 이에 최근에는 LR(Lattice Reduction)을 이용하여 채널 행렬을 직교 좌표계에 근접하게 변환시켜 선형 검출을 수행함으로써, 잡음 증폭을 크게 줄인 기법이 제안되었다<sup>11-31</sup>. 채널 행렬을 거의 직교가 되도록 변환시키는 LLL(Lenstra-Lenstra-Lovasz)-LR 기법은 많은 계산량이 요구되어지고 안테나의 수가 늘어남에 따라 계산량이 증가되는 단점이 있다<sup>41</sup>.

이를 보완하기 위한 방법으로 시변 페이딩 채널 환경에서 LR을 통해 얻어진  $P$  행렬이 시간에 따라 크게 바뀌지 않는 특성을 이용하여 LR을 수행할 채널과 이전 채널 프레임에서 구한  $P$  행렬을 곱하여 LR을 수행하는 기법이 연구되어 오고 있다<sup>5-6</sup>. 참고 문헌 [5]에서는 LR을 수행 할 채널과 이전 채널에서 구한  $P$  행렬을 곱한 기저 벡터들을 체크하여 LR을 해주어야만 하는 기저 벡터만 새로운 기저 벡터를 구하여 LLL-LR기법에서 수행한 중간 과정의 계산량을 감소시켰다. 참고문헌 [6]에서는 LR을 수행할 채널과 이전 채널에서 구한  $P$  행렬을 곱하여 직교성 정도를 측정한다. 미리 정해놓은 임계치 값과 측정된 직교성을 비교하여 측정된 직교성 정도가 임계치 값보다 작으면 이전 채널에서 구한  $P$  행렬을 그대로 사용하고, 측정된 직교성 정도가 임계치 값보다 큰 경우에는 이전 채널에서 구한  $P$  행렬을 초기조건으로 하여 LLL-LR 기법을 수행한다. 기존 적응형 기법[5-6]들은 기존 LLL-LR 의 기법에 비해 작은 계산량을 가지지만 현재 채널 프레임의  $P$  행렬과 이전 채널 프레임의  $P$  행렬이 같을 경우에도 LR 수행여부를 판단하기 위한 계산량이 요구되어지는 단점이 있다.

본 논문에서는 이러한 기존 기법의 단점을 보완한 LR기법을 제안하였다. 채널이 바뀔 때 마다 LR을 수행하는 것이 아니라  $K$ 개의 채널을 저장하여  $K$ 번째 채널, 즉  $nK$ 번째( $n=1,2,3,\dots$ )채널에서만 LR을 수행하여  $P$  행렬을 구한 후  $(n-1)K$ 번째 채널 프레임의  $P$  행렬과 비교한다. 두 개의  $P$  행렬이 동일한 경우  $K-1$ 개의 채널 프레임에서는 LR을 수행하지 않고  $K$  번째 채널 프레임의  $P$  행렬을 그대로 사용을 하여 기존 적응형 LR 기법들<sup>5-6</sup>의 불필요한 계산량을 감소시켰다. 반대

로 두 개의  $P$  행렬이 다른 경우 LR을 수행하지 않은  $K-1$ 개 채널 프레임의  $P$  행렬을 이전 채널 프레임에서 구한  $P$  행렬을 초기조건으로 하여 LR을 수행함으로써 계산량을 감소시킨다. 제안된 기법은 기존 LR 기법들과 같은 성능을 유지하면서 계산량을 확연히 감소시킨다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 시스템의 구성, LR 검출 기법을 기술하고, 3장에서는 기존 적응형 LR 기법들을 논의한다. 4장에서는 본 논문이 제안하는 LR 기법을 기술하고 마지막으로 5장에서는 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 벡터는 다음과 같이 표현된다.

$$y = Hs + w \tag{1}$$

송신 신호 벡터  $s$ 는  $N$ 의 크기를 가지며 평균 에너지  $E_s$ 를 갖는 QAM(Quaternary Amplitude Modulation)으로 변조된 심벌이라고 정의한다. 시변 페이딩 환경에서의 채널 행렬 는  $L \times N$ 의 크기를 가지며,  $H$ 의  $i$ 행  $j$ 열의 성분  $h_{i,j}$ 는  $j$  번째 송신 안테나와  $i$  번째 수신 안테나 사이의 채널 이득을 나타낸다. 채널 행렬의 성분은 i.i.d (independent and identically distributed)인 레일리 페이딩(Rayleigh Fading)이라고 가정하고 Jakes fading model을 사용하였다<sup>71</sup>. 복소 AWGN을 나타내는  $L$ 차원 잡음 벡터  $w$ 은 평균은 0 이고 분산,  $\sigma^2$ 은 아래와 같이 주어진다.

$$\sigma^2 = N_0/2 \tag{2}$$

여기서  $N_0$ 는 잡음 전력 성분 밀도 (Noise Power Spectral Density)를 나타낸다.

### 2.2 Lattice Reduction-aided 검출 기법

기존 ZF 방식의 선형검출 기법에서는 잡음 증폭 현상으로 인해 성능의 열화가 발생하는 단점이 있다. Lattice Reduction-Aided 검출(LRAD) 기법은 LR 기법을 통해 채널 행렬을 거의 직교로 변환 시킨 가상 채널을 사용함으로써 기존 선형검출 기법에서 발생하

는 잡음 증폭을 크게 줄일 수 있다<sup>[1]</sup>. Complex Lenstra, Lenstra and Lovasx-Latticed basis Reduction(LL-LR) 기법을 통해 직교로 변환된 채널  $H'$ 는 다음과 같이 표현된다<sup>[1,7]</sup>.

$$H' = HP \tag{3}$$

여기서  $P$ 는  $N \times N$ 의 크기를 가지며 모든 성분이 정수이고 행렬식(determinant)이  $\pm 1$ 이다. LR을 이용한 신호 검출 과정에서 수신 심벌 벡터 식 (1)은 다음과 같이 표현된다.

$$y = Hs + n = (HP)(P)^{-1}s + n = H'z + w \tag{4}$$

여기서 채널 행렬은 LR 기법을 통해 얻은 가상채널  $H' = HP$ 로 변환되고 송신 심벌 벡터  $s$ 는  $z = P^{-1}s$ 로 변환된다. LR을 이용한 Lattice Reduction-aided 검출 과정은 그림 1과 같다. 먼저 수신 심벌 벡터  $y$ 에  $(H')^{-1}$ 을 곱하여  $\hat{z}$ 를 구할 수 있다.

$$\hat{z} = (H')^{-1}y \tag{5}$$

식 (5)을 통해 얻은 값을 양자화(quantized)한다.

$$\hat{s}_{quantized} = Q(\hat{z}) \tag{6}$$

양자화를 통해 얻은 벡터  $\hat{s}_{quantized}$ 에  $P$ 를 곱하여 송신 심벌벡터를 검출한다.

$$\hat{s} = P\hat{s}_{quantized} \tag{7}$$

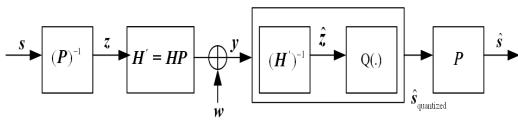


그림1. Lattice reduction-aided 검출 기법

### III. 기존 적응형 Lattice Reduction 기법

#### 3.1 적응형 Lattice Reduction 기법

이 기법은 시변 페이딩 채널 환경에서  $P$  행렬이 시간에 따라 크게 바뀌지 않는 특성을 이용하여  $i$ 번째 채널인  $H_i$ 와 이전 채널 프레임에서 구한  $P_{i-1}$ 을 곱

한  $\hat{H}_i$ 을 이용하여 LR 과정을 수행한다<sup>[6]</sup>.

$$\hat{H}_i = H_i P_{i-1} \tag{8}$$

적응형 LR 기법에서는  $\hat{H}_i$ 가 충분히 직교에 가까운지를 판단하기 위해 식 (9)를 이용하여 직교성 정도를 측정한다.

$$\Theta(\hat{H}_i) = \frac{\|\hat{h}_1\|^2 \|\hat{h}_2\|^2 \dots \|\hat{h}_N\|^2}{\det[(\hat{H}_i)^H \hat{H}_i]} \tag{9}$$

여기서  $\hat{h}_a$  ( $1 \leq a \leq N$ )은  $\hat{H}_i$ 의 기저 벡터를 나타내고  $\|\cdot\|$ 은 norm을 나타내고  $\det[\cdot]$ 은 determinant 값을 나타낸다. 적응형 LR 알고리즘에서는 식 (10)을 만족하는지 체크하여 LR 수행 여부를 판단한다.

$$\frac{1}{\alpha} < \frac{\Theta(\hat{H}_i)}{\Theta(\hat{H}_{i-1})} < \alpha \tag{10}$$

여기서  $\Theta(\hat{H}_{i-1})$ 은  $i-1$  번째 채널에서 LR을 통해 얻어진 행렬의 직교성을 나타낸다.  $\alpha$ 은 성능과 계산량의 trade-off 를 가지는 선택 가능한 미리 정해진 변수이다. 식 (10)을 만족하면  $\hat{H}_i$ 가 거의 직교에 가깝기 때문에  $i$ 번째 채널의  $P_i$ 를 구하지 않고 이전 프레임에서 구한  $P_{i-1}$ 을 그대로 사용하여 계산량을 줄였다. 반대로 식 (10)을 만족하지 않을 경우,  $\hat{H}_i$ 와 이전 채널 프레임의  $P_{i-1}$ 을 초기조건으로 두고 LLL-LR을 수행하여  $P_i$ 를 구하기 때문에 행렬을 단위행렬( $I_N$ )로 초기화하여 LR을 수행하는 LLL-LR 방식보다 작은 계산량으로 LR을 수행할 수 있다.

#### 3.2 기저 벡터의 직교성 특정 기반 적응형 Lattice Reduction 기법

이 기법은 적응형 LR 방식과 같이 이전 채널 프레임에서 구한  $P_{i-1}$ 를 이용하여 LR을 수행한다. 하지만 적응형 LR 방식은 행렬  $\hat{H}_i$ 의 직교성을 측정하여 이전 채널 프레임의  $P_{i-1}$ 를 그대로 사용할 것인지 판단했다면 이 기법은  $\hat{H}_i$  기저 벡터의 직교성을 식 (11)과 같이 계산하여 LR을 해주어야 하는 기저 벡터를

구별한다<sup>[5]</sup>.

$$\bar{\mu}_{a,b} = \frac{\langle \hat{\mathbf{h}}_b, \hat{\mathbf{h}}'_a \rangle}{\langle \hat{\mathbf{h}}_b, \hat{\mathbf{h}}_b \rangle} \quad (a=2,3,\dots,L, b=a-1,\dots,1) \quad (11)$$

여기서  $\langle \hat{\mathbf{h}}_b, \hat{\mathbf{h}}'_a \rangle = \hat{\mathbf{h}}_b^H \hat{\mathbf{h}}'_a$ 로 두 기저 벡터의 내적을 의미하고  $\hat{\mathbf{h}}'_a$ 은 Gran-Schmidt과정을 통해 얻어진 기저벡터로 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\hat{\mathbf{h}}'_1 = \hat{\mathbf{h}}_1, \hat{\mathbf{h}}'_c = \hat{\mathbf{h}}_c - \sum_{d=1}^{c-1} \bar{\mu}_{c,d} \hat{\mathbf{h}}'_d \quad (12)$$

이전 채널 프레임의  $\mathbf{P}_{i-1}$  행렬의 기저 벡터가 현재 채널 프레임의  $\mathbf{P}_i$  행렬의 기저벡터와 동일하거나 비슷한 경우,  $\bar{\mu}_{a,b}$  값은 0에 가까워진다. 이러한 성질을 이용하여 이 기법에서는 LR이 필요한 기저벡터를 구분하기 위해서  $\bar{\mu}_{a,b}$ 의 값들을 식 (13)과 같이 계산한다.

$$\text{round}(\bar{\mu}_{a,b}) == 0 \quad (a=2,3,\dots,L) \forall (b=a-1,\dots,1) \quad (13)$$

여기서  $\text{round}(\bar{\mu}_{a,b})$ 는 실수부와 허수부 각각 가까운 정수로 반올림해 준다. 식 (13)을 만족하면  $a$  번째 기저 벡터는 LR을 수행하지 않고 식 (13)을 만족하지 않으면  $a$  번째 기저 벡터만 LR을 수행한다.

기존 적응형 LR 기법들은<sup>[5-6]</sup> 이전 채널 프레임  $\mathbf{P}_{i-1}$  행렬을 초기조건으로 두고 LR을 수행하기 때문에  $\mathbf{P}_i$  행렬을 단위행렬로 두고 LR을 수행하는 LLL-LR 기법에 비해 작은 계산량을 가진다. 하지만  $i$  번째 프레임의  $\mathbf{P}_i$ 와 이전 채널 프레임의  $\mathbf{P}_{i-1}$ 가 같은 경우에도 LR 수행여부를 판단하기 위한 불필요한 계산량이 요구되어지는 단점이 있다.

#### IV. 제안하는 Lattice Reduction 기법

제안하는 기법은 시변 페이딩 채널의 시간 상관 특성으로 인하여 LR 기법을 통해 얻어진  $\mathbf{P}$  행렬이 크게 바뀌지 않는 성질을 이용한다. 제안하는 기법에서는 매번 채널 프레임이 바뀔 때 마다 LR을 수행하는 것이 아니라  $K$ 개의 채널과 수신 심벌 벡터를 수신단에 저장한다. 이때  $K-1$ 개의 채널, 즉  $i$ 가  $(n-1)K < i < nK$  인 경우에는 LR을 수행하지 않고  $i$ 가  $K$ 의 정수배가 되는

경우에만( $i=nK, n=1,2,3,\dots$ ) LR을 수행한 후  $nK$  번째 채널 프레임의  $\mathbf{P}_{nK}$  행렬과  $(n-1)K$ 번째 채널 프레임의  $\mathbf{P}_{(n-1)K}$  행렬을 비교한다. 제안하는 기법에서는 이 두  $\mathbf{P}$  행렬의 비교 결과에 따라 *block* 모드와 *sequential* 모드로 나누어 LR을 수행한다.

먼저 *block* 모드는  $\mathbf{P}_{nK}$ 와  $\mathbf{P}_{(n-1)K}$ 를 비교하여 동일한 경우에만 동작된다. 두 행렬인  $\mathbf{P}_{nK}$ 와  $\mathbf{P}_{(n-1)K}$ 가 같다는 것은 채널의 변화가 크지 않다는 것을 의미하기 때문에 LR을 수행하지 않은 나머지  $K-1$ 개 채널의  $\mathbf{P}_i$  ( $(n-1)K < i < n$ )도  $\mathbf{P}_{nK}$ 와 동일할 확률이 굉장히 높다. 이러한 경우에는 LR을 수행하지 않은  $K-1$ 개의 채널 프레임에서는 LR을 통해  $\mathbf{P}_i$  ( $(n-1)K < i < nK$ )를 구하지 않고  $\mathbf{P}_{nK}$ 와 동일한 행렬을 사용하여 함으로써 기존 적응형 LR 기법의 불필요한 계산량을 줄였다.

두번째로 *sequential* 모드에서는  $\mathbf{P}_{nK}$ 와  $\mathbf{P}_{(n-1)K}$ 가 같지 않은 경우에 동작한다. *sequential*모드는 *block* 모드와 달리 나머지  $K-1$  개의 채널 프레임의  $\mathbf{P}_i$  ( $(n-1)K < i < nK$ )가  $\mathbf{P}_{nK}$ 와 비교하여 같지 않을 확률이 높기 때문에 LR을 수행하여  $\mathbf{P}_i$  ( $(n-1)K < i < nK$ )를 구해준다. LR을 수행 할 때  $i$ 번째 채널인  $\mathbf{H}_i$ 와 이전 채널 프레임에서 구한  $\mathbf{P}_{i-1}$ 을 곱한  $\hat{\mathbf{H}}_i$ 를 초기값으로 두고 LR을 수행한다.  $\hat{\mathbf{H}}_i$ 는 어느 정도 직교로 변환된 상태이기 때문에  $\mathbf{P}_i$  ( $(n-1)K < i < nK$ )를 단위행렬로 초기화 하여 LR을 수행하는 기존 LLL-LR 방식보다 적은 계산량으로 LR을 수행할 수 있다. *sequential* 모드는 부분적으로 기존 적응형 LR 기법들과 비슷하지만 LR 수행 여부를 판단하기 위한 계산과정을 거치지 않고 LR을 수행한다는 차이가 있다.

제안하는 기법은  $K$ 개의 채널을 저장한 후  $nK$ 번째  $\mathbf{P}_{nK}$  행렬과  $(n-1)K$ 번째  $\mathbf{P}_{(n-1)K}$  행렬의 비교 결과에 따라 *block* 모드와 *sequential* 모드로 나누어  $\mathbf{P}_i$  ( $(n-1)K < i < nK$ )를 구한 후, LRAD 수행하여  $K$ 개의 송신 심벌 벡터를 추정한다. 이해를 돕기 위해 제안된 기법의 순서를 아래와 같이 설명한다.

- 1)  $n=1$ 로 초기화한다.
- 2)  $(n-1)K < i < nK$ 일 때,  $\mathbf{H}_i$ 와 수신 심벌 벡터  $\mathbf{y}$ 를 저장한다.
- 3)  $nK$ 번째 채널 프레임에서 LR을 수행한다. LR을 수행할 때는 ( $n=1$ 일 때  $\mathbf{P}_i = \mathbf{I}_N$ )로 두고 LR을 수행한다.

4)  
 IF  $P_{nK} = P_{(n-1)K}$ : *block mode*  
 FOR  $i=(n-1)K+1, \dots, nK-1$  Do  
 SET  $P_i = P_{(n-1)K}$   
 COMPUTE  
 END FOR  
 ELSE  $P_{nK} \neq P_{(n-1)K}$ : *sequential mode*  
 FOR  $i=(n-1)K+1, \dots, nK-1$  Do  
 {Perform LR for with initial setting of  $P_i = P_{i-1}$  in the LR iteration}  
 END FOR

5)  $\hat{H}_i$ 를 이용하여 LRAD를 수행한다.

6)  $n=n+1$ , 2)~5)번의 과정을 반복한다.

다음 절의 실험결과에서는 제안된 LR 기법이 기존의 LR 기법과 같은 성능을 가지며 기존 LR 기법에 비해 계산량이 확연히 작다는 것을 보여준다.

### V. 실험 결과

본 절에서는 시변 페이딩 환경에서 제안하는 LR 기법과 기존 LR 기법(LL-LR, 적응형 LR, 기저 벡터의 적교성 측정 기반 적응형 LR)의 SER 성능과 평균 계산량을 16 QAM,  $N=L=3$ ,  $\delta=0.9$ 인 환경에서 비교하였다. 이 논문에서 제안하는 LR 기법의  $K$  값은 실험을 통하여 기존 LR 기법들과 같은 성능을 가지면서 계산량을 가장 작게 하는 최적화된 값으로 정하였다. 평균 계산량은 새로운 기저 벡터를 찾기 위해 계산되는 곱셈과 나눗셈의 횟수를 측정하였다. 본 논문의 시변 페이딩 환경은 2-ray Jakes Model을[7] 사용하여 다양한 Maximum Doppler Shift( $f_D$ )에서 채널을 생성하였다. 정규화된 Doppler Frequency 는  $f_{nD} = f_D T_D$ (Hz)로 정의되며,  $T_D$ 는 두 개의 연속적인 채널의 시간 간격을 나타낸다. 본 실험에서는  $T_D=1\mu\text{sec}$ ,  $f_D=10\sim 500\text{Hz}$ 로 설정하여  $f_{nD}$ 는  $10^{-5}\sim 5 \times 10^{-4}$ 의 범위를 가지도록 하였다.

그림 2은  $P_{nK}$ 와  $P_{(n-1)K}$ 가 같은 block 모드가 동작할 확률  $p_B$ 와 식 (14)와 같이 block 모드에서  $P_i$  ( $(n-1)K < i < nK$ )가 동일하지 않을 확률  $p_F$ 을 다양한  $f_D$ 와  $K$ 의 값에 따라 나타내었다.

$$p_F = \Pr[P_i \neq P_{nK}, \exists i \text{ for } ((n-1)K < i < nK) | \text{block mode}] \quad (14)$$

그림 2을 통해 알 수 있듯이  $K$ 의 값이 커지더라도 불구하고 제안된 기법의 block 모드가 동작할 확률이 크다는

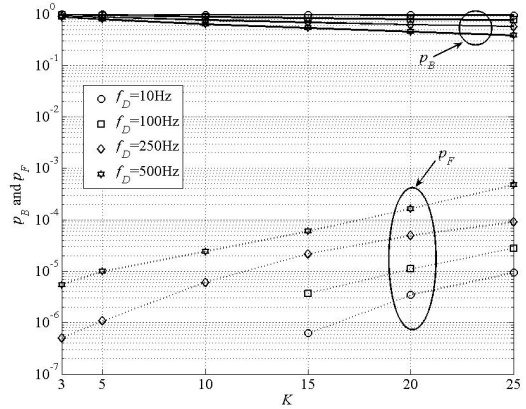


그림 2. block 모드가 일어날 확률( $p_B$ )과 block 모드에서  $K$ 개의 채널 중  $P$ 행렬이 동일하지 않을 확률( $p_F$ ),  $T_D=1\mu\text{sec}$

것을 알 수 있다. 예를 들어  $K=20$ 이고  $f_D = 500\text{Hz}$  일 때, block 모드가 동작할 확률  $p_B$ 가 45% 이며 이때  $p_F$ 는  $2 \times 10^{-4}$ 이하로 매우 작음을 알 수 있다. block 모드에서 한 블록 안의  $P_i$  행렬들이 모두 동일하지 않음에도 불구하고 block 모드를 통해 얻은  $P$  행렬이 실제 LR을 통해 얻은  $P$  행렬과 비슷하기 때문에 수신 성능의 영향에 크게 끼치지 않는다.

그림 3에서는  $K$ 의 값에 따라 제안된 기법의 평균 곱셈 계산량( $n_m$ )과 평균 나눗셈 계산량( $n_d$ )을 비교해 보았다. 그림 3을 보면 알 수 있듯이  $K$ 의 값이 커짐에 따라 계산량이 작아지지 않는다. 제안하는 LR 기법에서는  $P_{nK}$ 와  $P_{(n-1)K}$ 가 동일한 block 모드에서는  $K-1$ 개의 나머지 채널에서는 LR을 수행하지 않고  $P_{nK}$ 를 사용하면 되기 때문에 계산량을 많이 감소시킬 수 있다. 그림 2을 보면 알 수 있듯이 큰  $K$  값을 설정하면

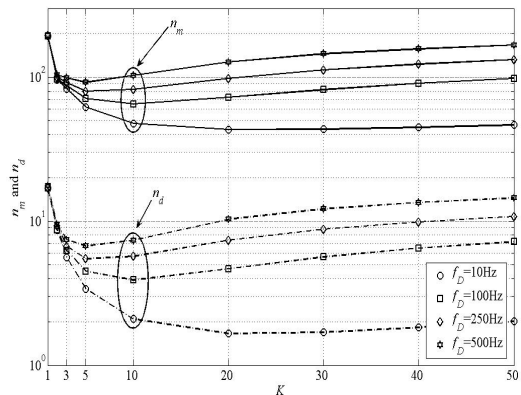


그림 3.  $K$  값에 따른 제안된 기법의 평균 계산량 비교,  $T_D=1\mu\text{sec}$

작은  $K$  값을 설정한 경우보다  $P_{n,K}$ 와  $P_{(n-1),K}$ 가 같은 확률  $p_B$ 가 작아져 나머지 프레임에서도 LR을 수행하여  $P_i$ 를 계산해야 하는 경우가 많아지게 된다. 예를 들어 설명해보면  $f_D=500\text{Hz}$ 인 경우,  $K=5, 10$ 일 때  $K$ 의 값이 커짐에 따라  $n_m$ 과  $n_d$ 가 작아지지만  $K>10$ 인 경우에는  $n_m$ 과  $n_d$ 가 커짐을 알 수 있다. 본 논문에서는 실험을 통하여 각  $f_D$ 에 따라 가장 작은 계산량을 가지게 하는 최적화된  $K$ 의 값을 정하였다.

그림 4는 제안된 기법들과 기존 LR 기법의 SER 성능을  $f_D=10, 250\text{Hz}$  일 때 비교하였다. 제안된 LR 기법은  $f_D$ 에 따라 최적화된  $K$ 의 값을 사용한 기법과 공통된  $K=10$ 을 사용한 기법의 SER 성능을 측정하였다. 공정한 비교를 위해서 적응형 LR 기법의  $\alpha$  값은 LLL-LR 기법과 같은 성능을 가지면서 계산량은 최소가 되는 값으로 정하였다. 제안된 LR 기법은 기존 LR 기법들과 같은 SER 성능을 가짐을 알 수 있다.

그림 5에서는 제안된 기법과 기존 LR 기법의 평균 곱셈 계산량( $n_m$ )과 평균 나눗셈 계산량( $n_d$ )을 비교하였다. 먼저 다양한  $f_D$ 에서 최적화된  $K$ 의 값을 사용한 제안된 기법과 기존 LR 기법의 계산량을 비교해보면 제안된 기법이 LLL-LR 기법과 기존 적응형 LR 기법들에 비해 계산량을 줄였음을 알 수 있다. 예를 들어  $f_D=10\text{Hz}$ 인 경우, 제안된 LR 기법의 평균 곱셈 계산량( $n_m$ )은 LLL-LR 기법의 평균 곱셈 계산량( $n_m$ )보다 1/11로 감소되었음을 알 수 있다. 또한 제안된 LR 기법과 기존 적응형 LR 기법들과 평균 곱셈 계산량( $n_m$ )을 비교해보면 제안된 LR 기법이 적응형 LR 기법(최적화된  $\alpha$ )보다 1/3로 감소되었고 기저 벡터의 직교성 측정 기반 적응형 LR 기법의 평균 곱셈 계산량( $n_m$ )

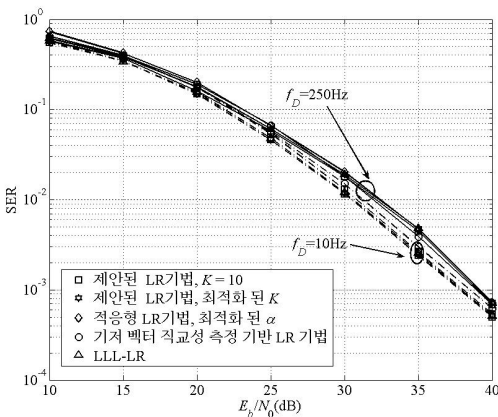


그림 4. 제안하는 LR 기법과 기존 기법들의 SER 성능 비교,  $T_D=1\mu\text{sec}$

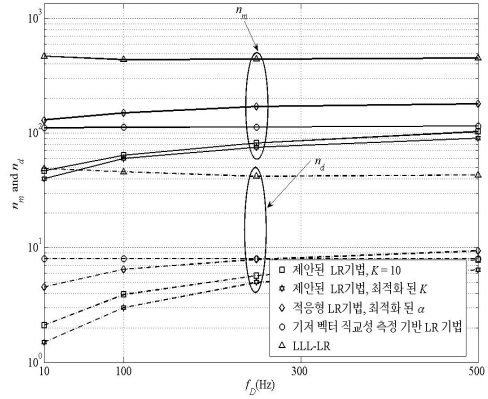


그림 5. 제안된 기법과 기존 기법들의 계산량 비교,  $T_D=1\mu\text{sec}$

보다 약 1/2.7 정도 작음을 알 수 있다. 이러한 결과는 제안된 LR 기법이 block 모드를 사용함으로써  $i$  번째 프레임의  $P_i$ 와 이전 채널 프레임의  $P_{i-1}$  행렬이 같은 경우에도 불구하고 LR 수행여부를 판단하는 기존 LR 기법들의 불필요한 계산량을 줄였다.

Maximum Doppler Shift 값이 고정된 채널이 아니라 변화하는 채널 환경에서는  $f_D$ 가 변화 할 때 마다 최적화된  $K$ 의 값으로 바꾸어 주는 것은 어렵다. 그래서 각  $f_D$ 에서 최적화된  $K$ 가 아닌 공통된  $K=10$ 을 사용하여 제안된 LR 기법과 기존 LR 기법들의 계산량을 비교하였다. 그림 5에서 알 수 있듯이 각  $f_D$ 에서 최적화된  $K$ 를 사용하지 않아도 제안된 LR 기법은 기존 LR 기법보다 더 작은 계산량을 가짐을 알 수 있다. 예를 들어  $f_D=250\text{Hz}$ 인 경우, 제안된 LR 기법의 평균 곱셈 계산량은 적응형 LR 기법의 평균 곱셈 계산량보다 약 1/2로 감소되었으며 기저 벡터의 직교성 측정 기반 적응형 LR 기법의 평균 곱셈 계산량 보다는 약 1/1.4 정도 작음을 알 수 있다. 더구나, 제안된 LR 기법( $K=10$ )은 LLL-LR 기법에 대해서도 현저한 계산량 감소를 보인다. 이러한 결과는 제안된 기법에서 다양한  $f_D$ 에서 공통된  $K(K=10)$ 을 사용하여 최적화된  $K$ 를 사용한 제안된 기법보다 계산량이 증가하였음에도 기존의 기법들보다 작은 계산량을 가짐을 보여준다.

## VI. 결론

본 논문에서는 시변 페이딩 채널 환경의 시간 상관성을 이용하여 기존 LR 기법인 LLL-LR 기법과 기존의 적응형 LR 기법들과 동일한 성능을 가지면서, 복잡

도는 확연히 줄인 LR 기법을 제안하였다. 제안된 LR 기법을 LR 기반 MIMO 수신기에 적용함으로써 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 행렬의 연산과정으로 확장하여 적용할 경우 계산량의 감소 효과를 기대할 수 있다.

### 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] 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.2389-2 402, Oct. 2003.
- [3] 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.
- [4] Wei Zhang, Xiaoli Ma, Gestner. B. and Anderson. D., "Designing Low-Complexity Equalizers fir Wireless systems," *IEEE Communications Magazine*, Vol.47, pp.56-62, Jan. 2009.
- [5] 김한나, 최권휴, "시변 페이딩 환경에서 Lattice Reduction 기반 MIMO 수신기를 위한 계산량 감소기법," *한국통신학회 논문지*, Vol. 34, pp.852-861, Nov. 2009
- [6] M.E.D.Jafari, M.O.Damen, "Adaptive Lattice Reduction in MIMO Systems," *Int.Symp.On Info.Theory and its Applications*, New Zealand, Dec. 2008.
- [7] Jakes, W.C, *Microwave Mobil Communications*, John Wiley & Sons, New York, 1974
- [8] 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.

김 한 나 (Hannah Kim)

준회원



2007년 2월 영남대학교 전자공학과 학사  
2010년 2월 영남대학교 정보통신공학과 석사  
<관심분야> MIMO detection 알고리즘

최 권 휴 (Kwonhue Choi)

종신회원



1994년 2월 포항공과대학교 전자전기공학과 학사  
1996년 2월 포항공과대학교 전자전기공학과 석사  
2000년 2월 포항공과대학교 전자전기공학과 박사  
2000년 4월~2003년 2월 한국전자통신연구원 광대역 무선전송 연구부 광대역 무선전송 연구팀 선임연구원  
2003년 2월~현재 영남대학교 전자정보공학부 정보통신공학전공 부교수  
<관심분야> OFDM 기반 다중반송파 전송방식 MIMO detection 알고리즘, CDMA 시스템

김 수 영 (Sooyoung Kim)

종신회원



1990년 2월 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 학사  
1991년 9월 ETRI 연구원  
1992년 10월 Univ. of Surrey, U.K 공학석사  
1995년 2월 Univ. of Surrey, U.K 공학박사  
1994년 11월~1996년 6월 Research Fellow, Univ. of Surrey, U.K  
1996년 8월~2004년 2월 한국전자통신연구원 광대역무선전송연구팀 팀장  
2004년 3월~현재 전북대학교 전자공학부 부교수  
<관심분야> 오류정정보호화방식, 이동/위성 통신