

논문 2009-46TC-5-11

Look-Up Table 기반의 복잡도가 낮은 Lattice Reduction MIMO 검출기

(Low-Complexity Lattice Reduction Aided MIMO Detectors Using
Look-Up Table)

이충원*, 이호경**, 허서원**

(ChungWon Lee, Ho-Kyoung Lee, and Seo Weon Heo)

요약

본 논문에서는 다중 안테나 시스템에서 신호 수신을 위한 lattice reduction (LR) 기반 복호기의 복잡도를 줄이기 위한 방법을 제안한다. ML (Maximum Likelihood) 방식이 복호 성능은 우수하지만 안테나와 성상 점의 개수에 따라 지수적으로 복잡도가 증가하는데 반해 LR 기반의 복호기는 상대적으로 적은 복잡도로 동일한 다이버시티 성능을 보이는 것으로 알려져 있다. 그러나 LR 과정도 채널 행렬의 열 벡터 교환 과정을 포함한 반복 연산에 의해서 복잡도가 높고 하드웨어 구현이 어려운 점이 있다. LR 과정은 채널 행렬이 주어지는 경우 유일하게 결정되기 때문에 이 과정을 offline으로 미리 수행하여 Look-Up Table (LUT) 에 저장하는 방식으로 계산량을 줄일 수 있다. 본 논문에서는 LR 기반 수신기에서 LUT 를 효율적으로 구성하는 방법을 제시하고 성능을 비교한다. 제안된 방식을 적용할 경우 기존의 LR 방식에 비하여 적은 연산량으로 유사한 수신 성능을 보임을 모의실험을 통하여 보인다.

Abstract

We propose a scheme which reduce the computational complexity of the lattice reduction (LR) aided detector in MIMO system. The performance of the ML detection algorithm is good but the computational complexity grows exponentially with the number of antenna elements and constellation points. LR aided detector shows the same diversity with the ML scheme with relatively less complexity. But the LR scheme still requires many computations since it involves several iterations of size reduction and column vector exchange. We notice that the LR process depends not on the received signal but only on the channel matrix so we can apply LR process offline and store the results in Look-Up Table (LUT). In this paper we propose an algorithm to generate the LUT which require less memory requirement and we evaluate the performance and complexity of the proposed system. We show that the proposed system requires less computational complexity with similar detection performance compared with the conventional LR aided detector.

Keywords : Lattice Reduction, MIMO, Look-Up Table, Low-Complexity

I. 서론

페이딩 채널 환경에서 다이버시티를 통하여 채널 용량을 증가시키기 위해 다중 안테나를 사용한 MIMO 기술에 대한 연구가 활발하다^[1]. ML (Maximum Likelihood) 복

호 방식은 MIMO 신호 수신을 위한 최적의 복호 방식이지만 복호 복잡도가 안테나와 성상 점의 개수에 따라 지수적으로 증가한다는 문제가 있다. 따라서 수신 복잡도가 높지 않은 선형 신호 처리 방식을 이용한 ZF (Zero-Forcing), MMSE, V-BLAST 와 같은 여러 준 최적 복호 알고리즘이 제안되었다. 이러한 방식들은 복잡도는 낮지만 최대 다이버시티를 얻을 수 없기 때문에 ML 기법에 비해 성능 열화가 심하다는 단점이 있다. Lattice reduction (LR)^[2] 방식은 채널 행렬을 구성하는

* 학생회원, ** 정회원, 홍익대학교 전자정보통신공학과
(Department of Electronic, Information &
Communication Engineering, Hongik University)
접수일자: 2009년2월10일, 수정완료일: 2009년4월16일

기저 벡터를 선형 변환을 통하여 직교성이 높은 기저 벡터로 변환하고 변환 영역에서 ZF 이나 MMSE 와 같은 간단한 선형 복호 과정을 통하여 ML 방식과 동일하게 최대 다이버시티를 얻을 수 있다^[3].

변환 행렬을 구하는 Lattice Reduction 과정은 일반적으로 NP complete 문제로 알려져 있었으나 이를 다항 시간 안에 수행할수 있는 LLL (Lenstra-Lenstra-Lovasz) 기법이 [5]에서 제안되었다. LLL 기법은 기본적으로 Gram-Schmidt 직교화 과정을 통한 size reduction 과정과 열 벡터 교환 과정을 반복적으로 수행하게 되기 때문에 여전히 연산 복잡도가 높고 실제 구현이 어려운 문제점이 있다. LLL 연산의 복잡도를 줄이기 위한 여러 알고리즘적인 시도는 이루어졌으나 실제 구현 측면에서 접근한 시도는 많지 않은 편이다. 본 논문에서는 LR 과정이 실제로 채널 행렬에만 의존하기 때문에 미리 offline으로 이 과정을 수행하고 이를 LUT의 형태로 저장하는 방식을 제안한다. LLL 알고리즘 수행 과정을 고려하여 LUT의 입력 항목을 줄이기 위한 방법을 제시하고 여러 가지 양자화 값에 따른 수신 성능을 모의실험을 통해서 분석한다. 시간적으로 천천히 변하는 채널 환경에서는 채널 행렬의 시간 상관성이 높기 때문에, LR 과정을 모든 시간에 수행할 필요는 없으며 LUT에 update 시점에 대한 내용 만을 저장하는 방식으로 응용하는 경우, 메모리 사용량을 줄이면서 평균 연산량을 줄이는 방법으로 응용도 가능하다.

본 논문의 구성은 우선 II 장에서 시스템 모델과 기본적인 LR 알고리즘에 대해서 설명하고 III 장에서 LUT 을 생성하는 알고리즘과 이를 사용하는 복호 과정을 기술한다. IV 장에서는 제안 방식의 성능을 모의 실험을 통해서 보이고 마지막으로 V 장에서 결론을 맺는다.

II. Lattice Reduction

1. 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1에 나타난 다중 안테나 시스템 모델을 고려한다. 송신기는 입력신호를 역다중화기(Demultiplex)를 통하여 n_T 개의 데이터 스트림으로 분리한 후, 격자 형태의 성상도를 가지는 M-QAM 이나 M-PAM 신호로 변조한다. 다중 안테나를 통해서 송신된 신호는 각각 독립적인 페이딩 채널을 통과한 후 n_R 개의 수신 안테나를 통하여 수신된다. 이 과정은 다

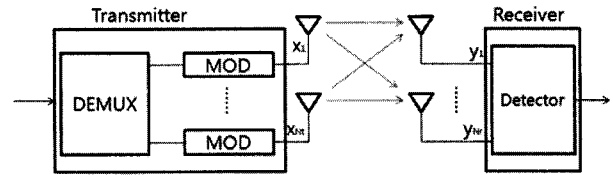


그림 1. 다중 안테나 시스템 모델
Fig. 1. MIMO system model.

음과 같은 수식으로 기술된다.

$$y = Hx + n. \tag{1}$$

여기서 n_T 는 전송 안테나의 개수, n_R ($n_T \leq n_R$)은 수신 안테나의 개수를 나타내고 x 는 $n_T \times 1$ 인 복소 송신 신호 벡터, y 는 $n_R \times 1$ 인 복소 수신 신호 벡터를 나타낸다. 그리고 n 은 송신 안테나의 평균 신호 전력을 1 로 정규화 시켰을 때, 분산이 σ^2 인 원형 대칭의 복소 백색 가우시안 잡음이다. 즉, 만약 $E\{xx^H\} = I_{n_T}$ 이면 $E\{nn^H\} = I_{n_R}\sigma^2$ 이다. H 는 $n_R \times n_T$ 인 채널 행렬이고 각 원소들은 분산이 1인 비상관 복소 가우시안 확률분포를 가진다. 수신부에서만 전체 CSI (Channel State Information)를 안다고 가정한다.

2. Lattice reduction을 이용한 복호 과정

채널 행렬 H 의 열 벡터 h_1, \dots, h_{n_T} 가 선형 독립이고 격자 공간을 구성하는 기저 벡터라고 가정하자. $\{h_i\}_{i=1}^{n_T}$ 로 만들 수 있는 격자 공간이 $u \in \mathcal{L}(H)$ 라면, 격자 공간위의 격자점 u 는

$$u = h_1x_1 + h_2x_2 + \dots + h_{n_T}x_{n_T} = \sum_{i=1}^{n_T} h_i x_i \tag{2}$$

로 나타낼 수 있다. $\{x_i\}_{i=1}^{n_T}$ 는 성상 점을 나타내는 정

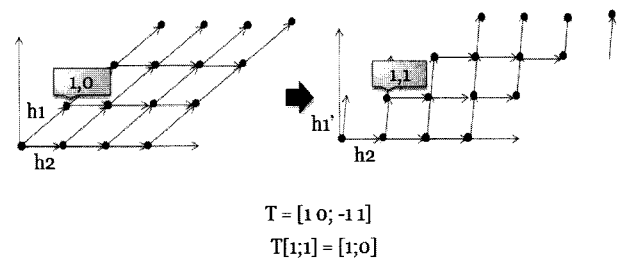


그림 2. Lattice reduction 과정을 통한 기저 벡터 변환
Fig. 2. Transform of basis vector with lattice reduction.

수의 복소 값이다. 페이딩 채널 환경에서 채널 행렬을 구성하는 열 벡터들은 그림 2의 좌측에 나타난 것처럼 길이가 상이하고 직교성이 떨어지는 경우가 발생하며, 여기에 ZF 나 MMSE 기법을 적용하는 경우 최대 다이버시티를 얻지 못하고 복호 성능이 떨어진다. 이 문제를 해결하기 위해 오른쪽 그림에 나타난 것과 같이 동일한 격자점을 표시할 수 있지만 길이가 비슷하고 직교에 가깝게 기저 벡터를 선형 변환하는 것이 LR 과정이다. 이 선형 변환을 $\tilde{H} = HT$ 라고 표시하는 경우, \tilde{H} 와 H 가 동일한 격자 공간을 구성하기 위해서는 변환 행렬 T 가 $n_T \times n_T$ 인 unimodular 행렬이어야 한다. 즉, $\det(T) = \pm 1$ 이고 역행렬이 존재하며 그 원소들은 복소 정수값을 가진다. 이제 수신 신호 벡터 y 는

$$y = Hx + n = (HT)T^{-1}x + n = \tilde{H}z + n \quad (3)$$

와 같이 나타난다. 여기서 \tilde{H} 는 변환된 기저 벡터로 표시되는 채널 행렬이고 z 는 변환된 격자 구조에서 성상 점들을 나타내는 복소 정수 벡터이다.

송신 안테나가 2 인 경우를 가정하자. 채널 행렬 H 를 $[h_1, h_2]$ 라고 표시하면 LR 과정, 즉 변환 행렬 T 를 구하는 과정은 직교성에 가까운 벡터를 구하는 size reduction 과정과 두 개의 열을 교환하는 과정을 반복한다. 이 중 size reduction 과정은 다음 식에 의해서 기술된다.

$$h_1' = h_1 - h_2 \times [Q\{Re(\mu_{2,1})\} + Q\{Im(\mu_{2,1})\}] \quad (4)$$

위 식에서 $\mu_{2,1} = \frac{\langle h_2, h_1 \rangle}{\langle h_1, h_1 \rangle}$ 이며 $Q[u]$ 는 실수 u 에 가장 가까운 정수를 구하는 함수이고 $Re(\cdot)$ 은 복소수의 실수부, $Im(\cdot)$ 는 허수부를 의미한다. 위 수식은 기본적으로 Gram-Schmidt 직교화 과정을 수행하여 보다 직교성이 뛰어난 벡터를 찾는 과정을 나타낸다. Size reduction 결과 값이 아래의 조건식을 만족하는 경우 두 개의 열을 서로 교환하여 다시 size reduction 과정을 반복한다.

$$\langle h_2, h_2 \rangle \geq (\delta - |\mu_{2,1}|^2) \times \langle h_1, h_1 \rangle. \quad (5)$$

이러한 과정을 그림 2에 예를 들어 나타내었다. 좌측 그림이 원래 채널 행렬의 기저 벡터로, 오른쪽 그림이 변환된 벡터로 표시되는 격자 구조를 나타낸다. LR 과정을 거쳐서 기저 벡터의 변환 행렬 $T = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -1 & 1 \end{bmatrix}$ 을 구하였다.

그림에서 보듯이 원래 행렬 H 와 변환된 행렬 \tilde{H} 가 동일한 격자 점들을 표시함을 보였다. 그림에서 $[1, 0]$ 에 해당하는 격자점이 변환된 영역에서는 $[1, 1]$ 로 좌표가 바뀌지만, 격자 구조 자체는 동일함을 알 수 있다.

복호는 식 (3)으로 표시된 변환된 영역의 수신 신호 벡터 $y = \tilde{H}z + n$ 에 ZF이나 MMSE와 같은 선형 신호 처리 기법을 적용하여 먼저 변환 영역의 격자점 z 를 결정한다. \tilde{H} 의 열벡터가 직교에 가깝기 때문에 상관성이 적고, 따라서 선형의 복잡도를 가지는 간단한 복호 기법을 적용하여도 ML과 같이 최대 다이버시티를 가질 수 있다^[2]. 결정한 z 로부터 $x = Tz$ 를 거쳐 원래의 신호 점을 얻을 수 있다.

III. LUT을 이용한 Lattice Reduction 알고리즘

1. Look Up Table의 생성

Lattice reduction (LR) 과정은 size reduction 과정과 열 벡터 교환 과정을 (5)의 조건이 발생하지 않을 때까지 반복하여 진행한다. 이 과정은 채널 행렬에 따라서 여러 번 반복될 수 있으므로 연산 복잡도가 높다. 실제로 채널 행렬이 주어진 경우, LR 과정은 유일하게 결정되기 때문에 송신 안테나가 많지 않은 경우 이 과정을 offline 으로 미리 수행하고 변환 행렬 T 를 LUT 형태로 저장하는 것이 가능하다. LUT 생성을 위해서는 양자화된 채널 행렬로부터 LR 과정을 거쳐 변환 행렬 T 를 구해야 하는데, 본 논문에서는 [4]에서 제안된 복소 LLL 기법을 기반으로 LUT의 입력 파라미터를 줄인다. 이제부터는 송신과 수신 안테나가 각각 2 개인 경우를 가정한다. 이때 채널 행렬 H 를 구성하는 각 원소를 모두 고려하는 경우 4 개의 복소 값을 양자화 해야 하므로 필요한 메모리가 비현실적으로 커지게 된다. 그러나 [4]에서 제안된 복소 LLL (Lenstra-Llenstra-Lovasz) 과정을 살펴보면 알고리즘의 입력으로는 채널 행렬을 받지만 변환 행렬 T 는 h_1 과 h_2 벡터의 길이와 둘 사이의 상관 벡터인 $\mu_{2,1} = \langle h_2, h_1 \rangle / \langle h_1, h_1 \rangle$ 만 이용해도 구할 수 있음을 알 수 있다. 실제로 T 행렬은 h_1 과 h_2 벡터의 길이의 비에만 의존하기 때문에 LUT의 입력 파라미터를 더 줄이기 위하여 채널 행렬 H 를 $|h_1|$ 으로 normalize 하여 다음식과 같이 표시할 수 있다.

$$\left[\frac{h_1}{|h_1|}, \frac{h_2}{|h_1|} \right] \quad (6)$$

그러면 식 (5)의 조건은

$$\frac{\langle h_2, h_2 \rangle}{\langle h_1, h_1 \rangle} + |\mu_{2,1}|^2 \geq \delta \quad (7)$$

로 표시된다. 따라서 이제부터는 채널 행렬 $H = [h_1 \ h_2]$ 의 첫 번째 열 벡터의 길이가 1 이라고 가

표 1. LUT 생성을 위한 lattice reduction 알고리즘
Table 1. Lattice reduction algorithm to generate LUT.

```

Input :  $\langle h_1, h_1 \rangle = 1, \langle h_2, h_2 \rangle, \mu_{2,1}, \delta$ 
Output :  $T = [T_1 \ T_2]$ 
1 :  $\langle h_2, h_2 \rangle = \langle h_2, h_2 \rangle - |\mu_{2,1}|^2$ 
2 :  $T = I_2$ 
4 : if  $|\text{Re}(\mu_{2,1})| > \frac{1}{2}$  or  $|\text{Im}(\mu_{2,1})| > \frac{1}{2}$  then
5 :    $c = Q\{\text{Re}(\mu_{2,1})\} + j \times Q\{\text{Im}(\mu_{2,1})\}$ 
6 :    $T_2 = T_2 - cT_1$ 
7 :    $\mu_{2,1} = \mu_{2,1} - c$ 
8 : end if
9 : while (식 (7)의 열 벡터 교환 조건 만족)
    열 벡터 교환시 연산 과정
    (1)  $\langle h_1, h_1 \rangle = \langle h_2, h_2 \rangle + |\mu_{2,1}| \langle h_1, h_1 \rangle$ 
    (2)  $\mu_{2,1} = \frac{\langle h_1, h_1 \rangle}{\langle h_1, h_1 \rangle}$ 
    (3)  $\langle h_2, h_2 \rangle = \left( \frac{\langle h_1, h_1 \rangle}{\langle h_1, h_1 \rangle} \right) \langle h_2, h_2 \rangle$ 
     $T_2$  열 벡터와  $T_1$  열 벡터 교환
    (• 현재의 연산 과정 연산 후 값)
10 : if  $|\text{Re}(\mu_{2,1})| > \frac{1}{2}$  or  $|\text{Im}(\mu_{2,1})| > \frac{1}{2}$ 
11 :    $c = Q\{\text{Re}(\mu_{2,1})\} + j \times Q\{\text{Im}(\mu_{2,1})\}$ 
12 :    $T_2 = T_2 - cT_1$ 
13 :    $\mu_{2,1} = \mu_{2,1} - c$ 
14 : end if
15 : end while
    
```

정한다. 안테나의 개수가 2 인 경우에 [4]에서 제시된 과정을 기반으로 LR 과정을 수행하고 T 행렬을 구하는 과정을 표 1에 기술하였다.

위 과정을 통하여 $\langle h_1, h_1 \rangle$ 은 1 로 가정하였기에 3 개의 항목으로 Look-Up Table 을 만들 수 있다. 첫 번째 항목은 $\langle h_2, h_2 \rangle$ 이고 두 번째 항목은 $\langle h_2, h_1 \rangle$ 의 실수부이며 마지막 항목은 $\langle h_2, h_1 \rangle$ 의 허수부이다. 본 논문에서는 $1 \leq \langle h_2, h_2 \rangle \leq h_2^{max}$ 구간을 일정한 간격으로 양자화 하였다. 실제로 레일리 페이딩 채널 환경에서 $\langle h_2, h_2 \rangle$ 는 이론적으로 무한대의 값까지 존재할 수 있지만 실제 구현을 위해서 이 값을 일정 범위내로 제한한다. 먼저 h_2^{max} 값은 $\langle h_2, h_2 \rangle$ 의 확률적 특성을 살펴본 후 CDF (cumulative distribution function) 를 구하고, $\langle h_2, h_2 \rangle$ 가 그 값을 넘을 확률이 미리 정해진 임계치를 초과하지 않게 선택하였다. 먼저 확률 변수 $Z = \langle h_2, h_2 \rangle$ 를 정의하자. Z는 분산이 1 인 복소 가우시안 잡음을 동일한 확률 특성을 가지는 다른 확률 변수로 normalize 했기 때문에 $Z = X/Y$ (여기서 X 와 Y는 서로 독립적이고 분산이 1 인 exponential 확률 변수) 로 표현된다. 확률 변수 Z의 확률 분포는 [6]에 나타나 있고 다음 식과 같다.

$$f_Z(z) = 1/(1+z)^2, z \geq 0, \quad (8)$$

$$F_Z(z) = 1 - 1/(z+1), z \geq 0. \quad (9)$$

채널 행렬이 주어지는 경우, 먼저 크기 순으로 열 벡터를 배치하는 것까지를 고려하여 그림 3에 누적 확률 분포

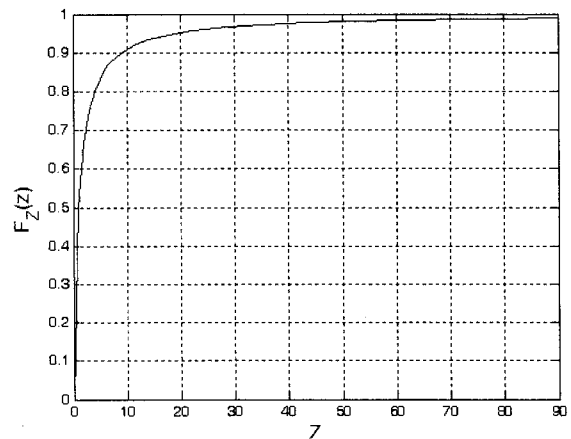


그림 3. 확률 변수 Z의 누적 확률 분포

Fig. 3. Cumulative distribution function of random variable.

$F_2(z)$ 를 나타내었다. 최대값을 64 (길이는 8) 로 제한하면 대략 98 % 이상의 경우를 포함하여, 입력 채널 특성이 LUT 참조 범위를 벗어날 가능성이 크지 않으며, 만약 범위를 벗어나는 경우에는 원래의 LR 과정을 수행한다. 그리고 $\langle h_2, h_1 \rangle$ 의 실수부와 허수부는 발생할 수 있는 최대와 최소값을 고려하여 $[-\sqrt{\langle h_2, h_2 \rangle}, \sqrt{\langle h_2, h_2 \rangle}]$ 구간을 일정한 간격 k 로 양자화 하였다. 따라서 항목의 총 수는 $2 \times \frac{1}{k}$ 개다. 위의 세 개의 항목으로 표 1에 기술된 LR 과정을 미리 수행하여 계산된 T 행렬을 저장하였다.

2. LUT 를 이용한 lattice reduction 기반의 복호기

먼저 수신부에서 채널 행렬의 열 벡터 크기순으로 정렬한다. 이유는 $\langle h_2, h_2 \rangle$ 이 1 이상의 값을 가지게 하기 위함이다. 다음에는 첫 번째 채널 행 벡터의 크기를 1 로 정규화 시킨다. 이러한 계산 과정을 거친 채널 행렬의 열 벡터간의 내적을 구하여 LUT 입력 항목들을 구한다. 이제 LUT를 참조하여 변환 행렬 T 를 구하고 원래 채널 행렬에 곱하여 변환된 기저의 채널 행렬을 구한다. 변환된 영역에서 Zero-Forcing이나 MMSE 같은 선형 처리 기법을 사용하여 변환된 영역의 격자점을 찾아낸다. 만약 Look-Up Table 에서 적절한 항목을 찾

표 2. LUT를 이용한 lattice reduction 기반의 복호방식 Table 2. Lattice reduction aided detector using LUT.

<p>채널 행렬이 $H = [h_1, h_2]$ 이면,</p> <p>1 단계 : $\langle h_1, h_1 \rangle$ 와 $\langle h_2, h_2 \rangle$ 의 크기를 비교하여 열 벡터의 순서를 정렬한다.</p> <p>2 단계 : 정렬된 행렬의 h_1 를 계산하여 채널 행렬의 각 원소들을 나눈다. ($\langle h_1, h_1 \rangle = 1$.)</p> <p>3 단계 : LUT의 첫 번째 항목인 $\langle h_2, h_2 \rangle$ 를 계산</p> <p>4 단계 : $\langle h_2, h_1 \rangle$ 를 계산하여 LUT의 두 번째, 세 번째 항목인 $Re\langle h_2, h_1 \rangle, Im\langle h_2, h_1 \rangle$ 를 계산</p> <p>5 단계 : LUT 출력인 변환 행렬 T 로 부터 $\tilde{H} = HT$ 를 계산한다.</p> <p>6 단계 : 변환된 채널 행렬을 이용하여 Zero-Forcing 또는 MMSE 기법을 적용한다.</p> <p>7 단계 : 결정된 신호 점을 $x = Tz$ 를 이용하여 원래의 신호 점을 계산하다.</p>

지 못하였을 경우 이전의 lattice reduction 기법을 적용하여 T 행렬을 계산한다. 찾아낸 격자점에 T 행렬을 곱하여 원래의 신호 점을 결정한다. 이 과정을 표 2 에 기술하였다.

IV. 모의 실험 결과 및 검토

이 장에서는 제안된 LUT을 이용한 LR 기반 검출기의 성능을 기존의 방식과 비교한다. 먼저 첫 번째 항목인 $\langle h_2, h_2 \rangle$ 는 LUT의 메모리를 줄이기 위하여 $\sqrt{\langle h_2, h_2 \rangle}$ 값을 앞 장에서 기술한 것과 같이 레일리 페이딩 채널에서 98% 이상의 경우까지 포함하는 값인 $h_2^{max} = 64$ 를 토대로, $[-8, 8]$ 구간을 0.25 간격으로 전체 64 단계로 양자화 하였다. 그리고 나머지 LUT 입력 항목들인 $Re\langle h_2, h_1 \rangle, Im\langle h_2, h_1 \rangle$ 값들은 $[-\sqrt{\langle h_2, h_2 \rangle}, \sqrt{\langle h_2, h_2 \rangle}]$ 구간을 일정한 간격 k 로 양자화 하였다.

송신과 수신 측 안테나는 각각 2 개이고 채널간 상관성이 없다고 가정하였다. NLOS (non line-of-sight) 레일리 페이딩 채널을 가정하고 16-QAM 변조 방식을 사용하였다. 채널 부호화는 고려하지 않았고 원래 영역 혹은 lattice reduction 된 영역에서 ZF (zero-forcing) 검출 방식을 적용하였다.

먼저 양자화 간격 k 에 따른 검출 성능을 그림 4에 나타내었다. 일반적으로 이동 수신기에서 채널 부호화가 적용되지 않은 경우의 비트 오류율이 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 이하라는 것을 고려할 때, 양자화 간격이 0.1 보다 작은

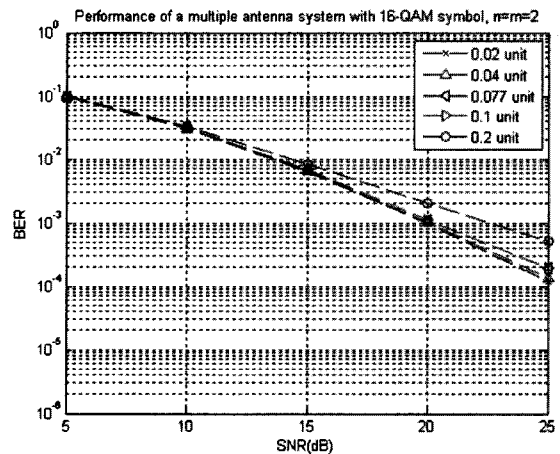


그림 4. 양자화 간격 k 값의 변화에 따른 비트 오류율 비교 Fig. 4. BER comparison with respect to the step-size k.

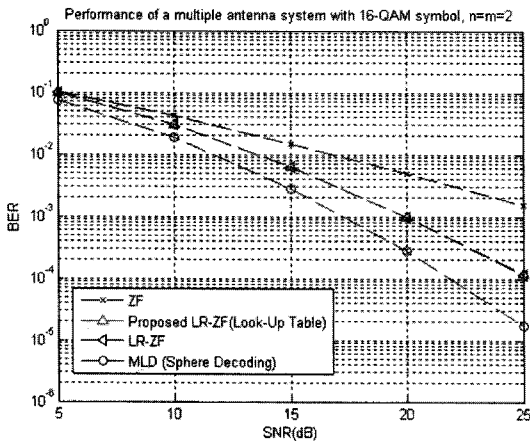


그림 5. Lattice reduction 기반의 ZF 검출기 비트 오류율 비교

Fig. 5. BER comparison of lattice reduction aided ZF detectors.

경우, 성능 저하가 크지 않다는 것을 알 수 있다. 양자화 간격이 0.1 인 경우에 필요한 메모리는 1.6 M (160 x 160 x 64) 정도의 entry 를 가진다. LUT 사용 빈도를 94 % 로 줄이면 그림 3으로부터 $\sqrt{\langle h_2, h_2 \rangle}$ 값을 $\sqrt{16} \times 4 = 16$ 단계로 양자화할 수 있으며 이 경우 필요한 메모리는 100 K 정도의 entry로 줄일 수 있다. 적절한 양자화 단계는 구현 과정에서 메모리의 여유와 연산 복잡도를 절충하여 결정해야 한다.

다음으로는 $k = 0.04$ 인 경우에 제안된 LUT 를 이용한 lattice reduction 기반 검출기와 다른 검출 방식과의 성능 비교 결과를 그림 5에 나타내었다. 제안된 방식의 성능은 기존 LR 방식과 거의 유사한 성능을 나타냄을 알 수 있다. 그러나 LR 기반 ZF 검출기의 한계로 인해, Sphere decoding 기반의 ML 수신기에 비해 다이버시티는 동일하지만 부호화 이득에서는 여전히 상당한 성능 차이가 있음을 알 수 있다.

V. 결론 및 향후 연구 방향

본 논문에서는 Look-Up Table (LUT) 을 이용하여 연산 복잡도를 줄인 lattice reduction 기반의 복호 기법을 제안하였다. LUT의 크기를 실현 가능한 수준으로 줄이기 위해서 채널 행렬을 직접 양자화 하지 않고 변환 행렬을 구하는데 필요한 항목만으로 LR 과정을 수행하였다. 전산 모의 실험을 통해서 제안된 방식이 양자화되지 않은 복소 LLL (Lenstra-Lenstra-Lovasz) 기반의 LR 검출기와 유사한 성능을 나타내면서 연산 복

잡도를 상당히 줄일 수 있음을 보였다. 제안된 알고리즘은 시스템의 메모리 용량은 여유가 있으나 연산량이 중요한 경우나 혹은 저전력 동작을 요구하는 이동형 수신기에 적용할 수 있다. 또한 천천히 변하는 시변 채널 (slowly time-varying channel)과 같이 시간의 변화에 따른 채널 환경의 변화가 적은 경우에는 LUT 에 변환 행렬이 변화하는 경계를 나타내는 플래그만 기록하는 방식으로 응용하는 경우, 메모리 사용량과 연산 복잡도를 절충하는 방식으로도 응용할 수 있다. 본 논문에서는 필요한 메모리의 양을 줄이기 위해 채널 행렬의 대칭성을 이용하거나 혹은 구조적 특성을 이용한 양자화 과정 등에 대한 시도를 하지 않았다. 향후에는 특히 안테나의 개수가 증가하는 경우, 채널 행렬의 특성을 결정하는 적은 수의 인자에 의한 LUT 생성 알고리즘 개발이 필요하다.

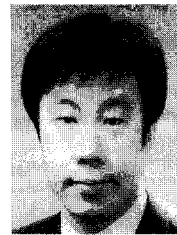
참고 문헌

- [1] G. J. Foschini and M. J. Gans, "On the limits of wireless communications in a fading environment when using multiple antennas," *Wireless Personal Commun.*, vol. 6, no. 3, pp.311-355, Mar. 1998.
- [2] H. Yao and G. W. Wornell, "Lattice-reduction-aided detectors for MIMO communication systems," in *Proc. 2002 Global Telecommunications Conference (GLOBECOM '02)*, vol. 1, pp. 424-428, Nov. 2002.
- [3] M. Taherzadeh, A. Mobasher and A. K. Khandani, "LLL reduction achieves the receive diversity in MIMO decoding," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 53, pp. 4801, Dec. 2006.
- [4] Y. H. Gan, C. Ling and W. H. Mow, "Complex Lattice Reduction Algorithm for Low-Complexity MIMO Detection", *IEEE Global Telecommunications Conf at St. Louis, USA*, vol. 5, pp. 2953-2957, Nov. 28-Dec. 2, 2005.
- [5] A. K. Lenstra, H. W. Lenstra, and L. Lovasz, "Factoring polynomials with rational coefficients," *Mathematische Annalen*, vol. 261, pp. 515-534, 1982.
- [6] Alberto Leon-Garcia, "Probability and Random Processes for Electrical Engineering," Addison Wesley, pp. 223-224. 1994.

저 자 소 개



이 충 원(학생회원)
 2007년 2월 홍익대학교
 전자공학과 학사 졸업.
 2007년 3월~현재 홍익대학교
 전자정보통신공학과
 석사과정.
 <주관심분야 : 채널코딩, 이동통신>



허 서 원(정회원)
 1990년 서울대학교 전자공학과
 학사 졸업.
 1992년 서울대학교 전자공학과
 석사 졸업.
 2001년 Purdue Univ. 전자공학과
 박사 졸업.
 1992년~1998년 LG 전자 선임연구원
 2001년~2006년 삼성전자 수석연구원
 2006년~현재 홍익대학교 전자전기공학부 조교수
 <주관심분야 : 채널코딩, 이동통신, 임베디드 시스템>



이 호 경(정회원)
 1981년 2월 서울대학교
 전자공학과 학사 졸업.
 1987년 Northrop Univ.
 전자공학과 석사 졸업.
 1994년 남가주대학교 전기공학과
 박사 졸업.

1994년 8월~현재 홍익대학교 전자전기공학부
 교수

<주관심분야 : 채널코딩, TCM, Turbo TCM, 이
 동통신, 위성통신>