

# 반복 MIMO 시스템을 위한 효율적인 연판정 검출 기법

이지현\*, 임형용\*, 윤동원\*\*

## Soft-Decision Detection for Iterative MIMO Systems

Jihyeon Lee\*, Hyeongyong Lim\*, and Dongweon Yoon\*\*

---

이 논문은 2017년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임  
(NRF-2014R1A2A1A11052701).

---

### 요 약

다중 입출력 시스템에서 반복 복호가 가능한 오류 정정 부호의 적용은 사논의 채널 용량에 근접한 성능을 얻는 것을 가능하게 한다. 터보 또는 LDPC(Low Density Parity Check) 부호와 같은 강력한 오류 정정 부호의 적용을 위해서는 수신단의 신호 검출 과정에서 연판정 정보를 생성해야 한다. MIMO(Multiple-Input Multiple-Output) 시스템의 수신 기술의 복잡도는 일반적으로 고려되는 후보 심볼 벡터의 개수에 비례하여 증가하며, 모든 송신 가능한 벡터를 고려하는 ML(Maximum Likelihood) 신호 검출 기법은 신뢰도가 높은 연판정 값을 발생하여 최적의 성능을 달성하나 계산 복잡도가 상당히 증가한다. 본 논문에서는 낮은 복잡도로 연판정 값의 출력력이 가능한 효율적인 알고리즘을 제안하고, 컴퓨터 모의실험을 통해 BER(Bit Error Rate) 성능을 분석하여 제안된 방식의 신뢰도를 검증한다.

### Abstract

It is possible to obtain performance close to the channel capacity by using an error correction code capable of iterative decoding in a Multiple-Input Multiple-Output (MIMO) system. In order to use powerful error correction codes such as turbo or low density parity check (LDPC) codes, the soft value should be generated in the signal detection process of the receiving end. The receiver complexity of the MIMO system generally increases in proportion to the number of candidate symbol vectors. The maximum likelihood (ML) signal detection considering all possible vectors generates a reliable soft value, however, its computational complexity is extremely high. In this paper, we propose an efficient algorithm that can output soft decision values with low complexity. We verify the reliability of the proposed method by analyzing bit error rate (BER) performance through computer simulations.

### Keywords

MIMO, signal detection, log-likelihood ratio, list sphere decoding

---

\* 한양대학교 전자컴퓨터통신공학과  
\*\* 한양대학교 융합전자공학부(교신저자)  
· 접수 일: 2017년 04월 14일  
· 수정완료일: 2017년 06월 15일  
· 게재확정일: 2017년 06월 18일

· Received: Apr. 14, 2017, Revised: Jun. 15, 2017, Accepted: Jun. 18, 2017  
· Corresponding Author: Dongweon Yoon  
Dept. of Electronic Engineering, Hanyang University, 222 Wangsimni-ro,  
Seongdong-gu, Seoul 04763, Korea  
Tel.: +82-02-2220-0362, Email: dwyoon@hanyang.ac.kr

## 1. 서 론

대용량 데이터의 고속 전송이 요구되는 현대 무선통신 환경에서는 주파수 대역폭 및 송신 전력의 증가 없이 데이터 전송률을 높일 수 있는 다중 입출력(MIMO, Multiple-Input Multiple-Output) 기술이 주목받고 있다[1]. MIMO 기술 중 다수의 송신 안테나를 통해 서로 다른 데이터를 동시에 전송함으로써 시스템의 대역폭을 증가시키지 않고 고속으로 데이터를 전송할 수 있는 공간 다중화 기법[2]은 반복 복호가 가능한 터보[3], LDPC(Low Density Parity Check) 부호와 같은 강력한 오류 정정 부호와의 결합을 통해 사논의 채널 용량에 근접한 성능을 얻는 것이 가능하다[4].

그러나 MIMO 시스템에서 터보 또는 LDPC와 같이 반복 복호가 가능한 채널 복호기가 함께 사용되기 위해서는 수신단의 MIMO 검출기에서 각 비트에 대한 연판정 정보가 먼저 생성되어야 한다. MIMO 검출기에서 출력되는 연판정 값의 신뢰도가 복호 성능에 큰 영향을 미치기 때문에 정확한 연판정 정보를 출력할 수 있는 MIMO 검출기의 신호 검출 방식이 필요하다.

반복 복호 시스템의 연판정 정보인 LLR(Log-Likelihood Ratio)은 사후 확률을 이용하여 계산되며, 최적의 성능을 제공하기 위해서는 송신 가능한 모든 심볼 벡터를 고려해야 한다. 그러나 송신 안테나의 개수나 변조 차수의 증가에 따라 계산 복잡도가 기하급수적으로 증가하여 실제 통신 시스템에 적용하는 데 어려움이 있으며, 이에 따라 낮은 복잡도로 연판정 신호 검출을 수행하기 위해 다양한 신호 검출 기법이 연구되어 왔다[5]-[7].

여러 가지 신호 검출 기법 중 LSD(List Sphere Decoding) 기법은 기존 SD(Sphere Decoding) 알고리즘[8][9]을 변형하여 제안된 검출 기법으로, 구(Sphere) 반경 내의 심볼 벡터들 중 후보 리스트를 구성하고 이를 이용하여 LLR을 계산하는 방식이다[7]. 송신 가능한 모든 심볼 벡터 중 반경 내에 포함되는 심볼 벡터들만 이용하기 때문에 ML 기법에 비해 적은 연산량으로 ML에 근접한 성능을 얻을 수 있지만, 후보 리스트 구성에 따라 모든 비트에 대한 LLR을 계산할 수 없어 정확한 연판정 값을

출력할 수 없는 경우도 발생한다. 또한 후보 리스트 생성 과정에서 SD 알고리즘을 반복적으로 수행하기 때문에 후보 리스트의 크기나 구 반경의 초기값에 따라 계산 복잡도가 크게 증가하는 문제점이 있다.

본 논문에서는 최적 심볼 벡터 근처에 제곱 유클리드 거리가 작은 심볼 벡터들이 분포해 있을 것이라는 점과 이 심볼 벡터들을 후보 리스트로 이용하면 보다 정확한 LLR이 계산될 수 있을 것이라는 점에 착안하여 후보 리스트를 구성한다. SD 알고리즘을 이용하여 최적 심볼 벡터를 찾은 후, 간단한 후보 리스트 구성 과정을 통해 낮은 복잡도로 연판정 값을 출력할 수 있는 효율적인 알고리즘을 제시한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 MIMO 시스템 모델에 대하여 설명하고, 3장에서는 ML 기반의 LLR 계산 과정과 LSD 기법, 이를 바탕으로 한 새로운 신호 검출 기법에 대하여 서술한다. 4장에는 제안하는 방식에 대하여 컴퓨터 모의실험 결과를 바탕으로 BER(Bit Error Rate) 성능에 대해 분석하며, 마지막으로 5장에서는 본 논문의 결론을 제시한다.

## II. 시스템 모델

본 논문에서는  $N_T$ 개의 송신 안테나와  $N_R$ 개의 수신 안테나로 구성된 다중 입출력 시스템을 고려한다.  $\bar{y} = [y_1, y_2, \dots, y_{N_R}]^T$ 을  $N_R \times 1$  수신 심볼 벡터,  $\bar{s} = [s_1, s_2, \dots, s_{N_T}]^T$ 는  $N_T \times 1$  송신 심볼 벡터라 하면, MIMO 시스템의 입출력 관계는 다음과 같다.

$$\bar{y} = H\bar{s} + \bar{n} \quad (1)$$

$$= \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} & \dots & h_{1N_T} \\ h_{21} & h_{22} & \dots & h_{2N_T} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ h_{N_R1} & h_{N_R2} & \dots & h_{N_RN_T} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} s_1 \\ s_2 \\ \vdots \\ s_{N_T} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ n_2 \\ \vdots \\ n_{N_R} \end{bmatrix}$$

여기서,  $H$ 는  $N_R \times N_T$  채널 행렬로  $i$ 번째 행  $j$ 번째 열의 원소  $h_{i,j}$ 는  $j$ 번째 송신 안테나에서  $i$ 번째

수신 안테나 사이의 채널 이득을 나타내며,  $\bar{n} = [n_1, n_2, \dots, n_{N_T}]^T$ 은 평균이 0이고 분산이  $\sigma^2$ 인  $N_T \times 1$  백색 가우시안 잡음 벡터이다.

MIMO 시스템의 입출력 구조가 포함된 전체 시스템 모델을 그림 1에 나타내었다. 송신단에서 발생된 데이터 비트는 채널 부호화를 통해  $R_c$ 의 부호화율로 채널 부호화되고, 인터리버를 거친 비트 시퀀스는 변조 기법에 따라 신호점 매핑되어  $N_T$ 개의 송신 안테나를 통해 전송된다. 수신단의 MIMO 검출기에서는 수신 심볼 벡터  $\bar{y}$ 를 이용하여 반복 복호기에서 사용할 수 있도록 연관정 정보를 출력하며, 송신단의 반대되는 과정을 거치게 된다.

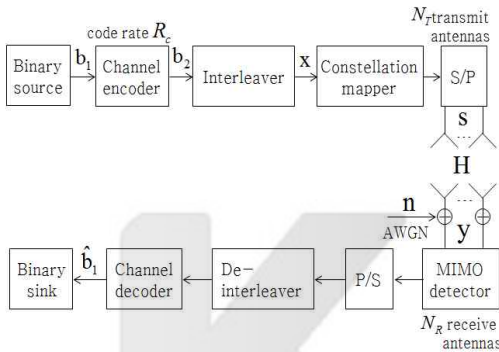


그림 1. MIMO 시스템 모델  
Fig. 1. MIMO system model

### III. MIMO 시스템에서 연관정 검출 기법

#### 3.1 ML 기반 연관정 검출 기법

$N_R$  개의 수신 안테나를 통해 수신된 심볼 벡터는 다중 안테나 검출기를 통해 각 비트의 연관정 정보를 추출하며, 사후 확률로 표현되는 LLR은 다음 식과 같이 정의된다.

$$L(x_{i,k}|\bar{y}) = \ln \frac{P(x_{i,k}=1|\bar{y})}{P(x_{i,k}=0|\bar{y})} \quad (2)$$

여기서,  $x_{i,k}$ 는 송신 심볼 벡터  $\bar{s} = [s_1, s_2, \dots, s_{N_T}]^T$ 의  $i$  ( $i=1, 2, \dots, N_T$ ) 번째 심볼에서  $k$  ( $k=1, 2, \dots, \log_2 M$ ) 번째 비트를 나타내며,  $M$ 은 변조 차수,

$P(x_{i,k}=1|\bar{y})$ 과  $P(x_{i,k}=0|\bar{y})$ 는 심볼 벡터  $\bar{y}$ 가 수신되었을 때  $x_{i,k}$ 가 각각 1과 0일 사후확률이다. Bayes 이론을 이용하여 식 (2)를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L(x_{i,k}|\bar{y}) = \ln \frac{\sum_{\hat{s} \in \chi_{i,k}^{(1)}} \exp\left(-\frac{\|\bar{y} - H\hat{s}\|^2}{2\sigma^2}\right)}{\sum_{\hat{s} \in \chi_{i,k}^{(0)}} \exp\left(-\frac{\|\bar{y} - H\hat{s}\|^2}{2\sigma^2}\right)} \quad (3)$$

여기서,  $\|\cdot\|$ 은 임의 복소 벡터에 대한 크기이며,  $\chi_{i,k}^{(1)}$ 과  $\chi_{i,k}^{(0)}$ 는  $i$  번째 송신 안테나 심볼  $s_i$ 에서  $k$  번째 비트가 각각 1과 0인 부호화된 심볼 벡터의 집합으로 각  $2^{N_T \cdot \log_2 M - 1}$  개의 원소를 갖고,  $\hat{s}$ 은  $\chi_{i,k}^{(1)}$  또는  $\chi_{i,k}^{(0)}$  집합에 포함된 심볼 벡터를 나타낸다.

식 (3)의 연산은 부호화된 심볼 벡터의 모든 조합에 대한 계산을 수행하여야 하기 때문에, 변조차수가 증가하거나 안테나 개수가 증가할수록 복잡도가 매우 커지게 되어 통신 시스템에서 구현이 어렵게 된다. 이에 따라 최댓값만을 고려하는 Max-Log 근사화 알고리즘 등 복잡도를 줄일 수 있는 방법들이 사용되고 있다. 식 (3)에 Max-Log 근사화 알고리즘을 적용하면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$L(x_{i,k}|\bar{y}) \approx \max_{\hat{s} \in \chi_{i,k}^{(1)}} \left( -\frac{\|\bar{y} - H\hat{s}\|^2}{2\sigma^2} \right) - \max_{\hat{s} \in \chi_{i,k}^{(0)}} \left( -\frac{\|\bar{y} - H\hat{s}\|^2}{2\sigma^2} \right) \quad (4)$$

식 (4)는 식 (3)의 송신 가능한 모든 심볼 벡터의  $\exp(\cdot)$  연산에서 최댓값만을 고려하기 때문에 비교적 적은 연산량으로 LLR을 계산할 수 있다. 그러나 여전히 같은 수의 제곱 유클리드 거리 연산이 요구되어 고차 변조 기법 또는 다수의 안테나를 사용하는 환경에서는 계산 복잡도가 매우 크게 증가하기 때문에 실제 시스템의 적용에는 어려움이 있다. 이에 따라 ML에 근접한 성능을 보이면서 낮은 복잡도로 연관정 신호 검출을 수행하기 위한 신호 검출 기법으로 LSD 검출 기법 등이 제안되었다[5]-[7].

### 3.2 LSD 기반 연판정 검출 기법

LSD 신호 검출 기법은 신뢰도 높은 LLR을 계산하기 위해 기존 SD(Sphere Decoding) 검출 방식을 변형하여 제안된 기법이다. 수신 심볼 벡터를 중심으로 구 반경 내에서 가장 가까운 심볼 벡터를 찾는 SD 알고리즘에 반해, LSD 검출 기법은 반경 내 심볼 벡터들을 후보 리스트로 구성하여 LLR을 계산한다. LSD 검출 기법의 후보 리스트  $\Phi$ 는 SD 알고리즘의 특징에 따라 최적 심볼 벡터를 항상 포함하며, 후보 리스트에 포함되는 후보 심볼 벡터의 개수  $N_{cand}$ 는  $1 \leq N_{cand} < 2^{N_T \log_2 M}$ 이다.

SD를 기반으로 LSD의 후보 리스트  $\Phi$ 는 다음과 같이 구성된다. SD 알고리즘은 구 반경 내에서 검출된 심볼 벡터의 제곱 유클리드 거리가 초기 설정된 반경보다 작을 경우 반경을 새롭게 갱신하며, 구 반경 내 심볼 벡터들 중 수신 심볼 벡터와 가장 가까운 심볼 벡터를 선택한다. 이에 반하여 LSD 검출 기법은 반경을 갱신하지 않고, 검출되는 심볼 벡터를 모두 후보 리스트에 포함시키며, 반경 내 심볼 벡터 중 수신 심볼 벡터와 가까운  $N_{cand}$ 개의 심볼 벡터로 후보 리스트를 구성한다.

이 과정을 통해 생성된 후보 리스트  $\Phi$ 를 적용하여 식 (4)를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$L(x_{i,k}|y) \approx \max_{\hat{s} \in \Phi_{i,k}^{(1)}} \left( -\frac{\|\bar{y} - H\hat{s}\|^2}{2\sigma^2} \right) - \max_{\hat{s} \in \Phi_{i,k}^{(0)}} \left( -\frac{\|\bar{y} - H\hat{s}\|^2}{2\sigma^2} \right) \quad (5)$$

여기서,  $\hat{s} \in \Phi_{i,k}^{(1)}$ 는 후보 리스트  $\Phi$ 에 속한 심볼 벡터 중  $x_{i,k} = 1$ 을 만족하는 심볼 벡터들의 집합이고, 마찬가지로  $\hat{s} \in \Phi_{i,k}^{(0)}$ 는 후보 심볼 벡터 중  $x_{i,k} = 0$ 을 만족하는 심볼 벡터들의 집합을 나타낸다.

LSD 검출 기법은 구 반경 내의 심볼 벡터 중 수신 심볼 벡터와 가까운  $N_{cand}$ 개의 심볼 벡터로 후보 리스트를 구성하고, 이를 이용하여 LLR을 계산하기 때문에 후보 리스트에 특정 비트가 1 또는 0에 해당하는 부호화된 심볼 벡터들이 모두 존재할

경우 송신 가능한 모든 심볼 벡터에 대해 연산을 수행하지 않으면서 정확한 LLR을 계산할 수 있어 ML에 근접한 성능을 얻을 수 있다. 그러나 사용되는 안테나의 개수가 많거나 고차 변조 방식이 적용될 때 후보 리스트 내 모든 심볼 벡터들이 1 또는 0의 정보를 갖는 해당 비트가 존재하지 않는 경우가 발생한다. 이와 같은 경우 존재하지 않는 비트에 대해 Extreme value를 적용하여 LLR을 계산하는데, Extreme value의 적용은 모든 비트에 대하여 정확한 LLR을 계산할 수 없어 성능 저하를 초래할 수 있다. 또한 LSD 신호 검출 기법은 초기 설정된 반경에 따라 복잡도가 상당히 가변적으로, 반경이 너무 작게 설정된 경우 반경 내의 심볼 벡터들로 후보 리스트를 구성할 수 없어 반경을 증가시킨 후 재탐색하기 때문에 계산 복잡도가 크게 증가한다. 반대로 반경이 너무 크게 설정된 경우 후보 리스트는 모두 채울 수 있지만 불필요한 심볼 벡터에 대한 탐색을 수행하기 때문에 마찬가지로 복잡도가 증가하는 문제가 발생한다.

### 3.3 제안하는 연판정 신호 검출 기법

연판정 출력을 위한 MIMO 신호 검출 과정에서 각 비트의 LLR은 후보 심볼 벡터 집합을 어떻게 설정하는가에 따라 BER 성능 및 계산 복잡도가 크게 달라진다. LLR은 특정 비트가 1 또는 0의 정보를 갖는 심볼 벡터들 중 수신 심볼 벡터와 가장 가까운 심볼 벡터에 대한 계산 결과이기 때문에, 제곱 유클리드 거리가 작은 심볼 벡터들로 구성된 후보 리스트를 이용하면 신뢰도 높은 LLR 계산이 가능하다.

본 논문에서 제안하는 연판정 기반의 신호 검출 기법은 최적 심볼 벡터 근처에 제곱 유클리드 거리가 작은 심볼 벡터들이 분포해 있을 것이라는 점과 이 심볼 벡터들을 후보 리스트로 이용하면 보다 정확한 LLR이 계산될 수 있을 것이라는 점에 착안하여 후보 리스트를 구성한다.

새롭게 제안하는 신호 검출 기법은 SD 알고리즘을 이용하여 최적 심볼 벡터를 찾은 후에 후보 리스트를 구성한다.  $N_T \times 1$  크기의 최적 심볼 벡터에

서  $N_T - 1$  개의 심볼은 고정시키고, 나머지 하나의 심볼 위치에 송신 가능한 심볼들을 조합하여 후보 심볼 벡터를 생성한다. 수신 심볼 벡터의 첫 번째 심볼에 대하여 생성된 후보 심볼 벡터는  $M$  개다. 그림 2에는 예로써, QPSK 신호가  $4 \times 4$  MIMO 시스템에 적용되었을 때 후보 심볼 벡터의 생성 과정을 트리 다이어그램을 통해 나타내었다.

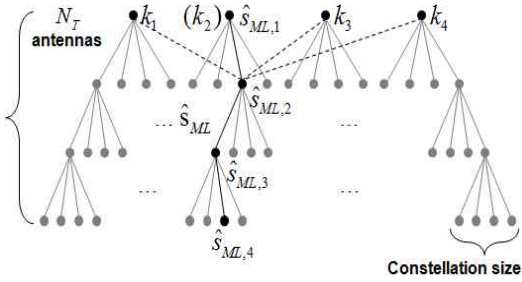


그림 2. 첫 번째 심볼에 대한 후보 리스트 생성  
Fig. 2. Generating candidate lists using the first symbol

그림 2에서 실선으로 나타낸 심볼 벡터는 SD 알고리즘을 통해 얻은 최적 심볼 벡터로  $\hat{s}_{ML} = [\hat{s}_{ML,1}, \hat{s}_{ML,2}, \dots, \hat{s}_{ML,4}]^T$ 이고,  $k_m$ 은 송신 가능한 심볼을 의미하는데 그림 2에는 QPSK를 가정했기 때문에 4가지 심볼이 존재한다. 첫 번째 심볼  $\hat{s}_{ML,1}$ 에 대한 후보 리스트는 두 번째 심볼  $\hat{s}_{ML,2}$ 부터  $\hat{s}_{ML,4}$ 까지 고정시키고, 첫 번째 심볼의 위치에는 해당 변조 기법에 따른 송신 가능한 심볼들을 모두 조합하여 후보 심볼 벡터를 생성한다. 수신 심볼 벡터의 두 번째 심볼에 대하여 생성된 심볼 벡터 또한  $M$  개이며 생성 과정은 그림 3과 같다.

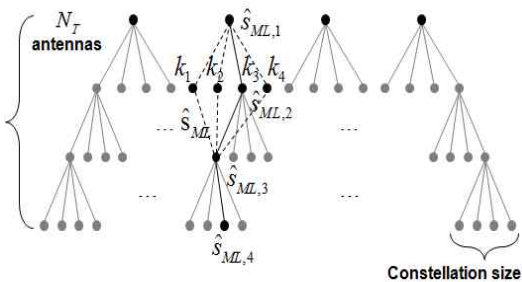


그림 3. 두 번째 심볼에 대한 후보 리스트 생성  
Fig. 3. Generating candidate lists using the second symbol

두 번째 심볼  $\hat{s}_{ML,2}$ 에 대한 후보 리스트 또한 두 번째 심볼의 위치에 송신 가능한 심볼들을 모두 조합하고 나머지 심볼은 고정시킴으로써 후보 리스트를 생성한다. 첫 번째 심볼부터 네 번째 심볼까지 같은 과정을 반복하여 후보 리스트를 생성하는 절차를 거치며, 새로운 알고리즘을 이용하여 구성된 후보 리스트  $\Phi_{NEW}$ 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\Phi_{NEW} = \left\{ \begin{array}{l} [k_1, \hat{s}_{ML,2}, \hat{s}_{ML,3}, \hat{s}_{ML,4}]^T \\ [k_2, \hat{s}_{ML,2}, \hat{s}_{ML,3}, \hat{s}_{ML,4}]^T \\ [k_3, \hat{s}_{ML,2}, \hat{s}_{ML,3}, \hat{s}_{ML,4}]^T \\ [k_4, \hat{s}_{ML,2}, \hat{s}_{ML,3}, \hat{s}_{ML,4}]^T \\ \vdots \\ [\hat{s}_{ML,1}, \hat{s}_{ML,2}, \hat{s}_{ML,3}, k_4]^T \end{array} \right\} \quad (6)$$

기존 LSD 검출 기법은 후보 리스트의 심볼 벡터들이 1 또는 0의 정보를 갖는 해당 비트가 존재하지 않는 경우, 각 비트의 LLR을 계산하기 위해 Extreme value를 적용하기 때문에 이에 대한 성능 저하가 발생한다. 반면 새롭게 제안된 알고리즘은 간단한 방식으로 구성된 후보 리스트로 모든 비트에 대한 LLR을 계산할 수 있어 Extreme value 적용으로 인한 성능 저하가 발생하지 않는다. 또한 기존 LSD 검출 기법은 후보 리스트를 구성하기 위해 SD 알고리즘을 반복 수행하여 복잡도가 상당히 증가하는 문제가 발생한다. 그러나 본 논문에서 제안하는 방식은 오직 단 한번의 SD 알고리즘 수행으로 최적 심볼 벡터를 구한 후, 이를 기준으로 간단한 알고리즘을 통해 후보 리스트를 구성할 수 있어 복잡도 측면에서도 상당한 이점을 갖는다.

#### IV. 성능 분석

본 논문에서 제안된 신호 검출 기법의 성능 분석을 위해 다양한 MIMO 시스템 환경을 가정하여 컴퓨터 모의실험을 수행하였다. 표 1에는 모의실험을 위해 적용된 파라미터들과 MIMO 수신기에 적용된 기법들을 나타내었다.

표 1의 파라미터를 반영하여 그림 4에는  $4 \times 4$  MIMO 시스템의 QPSK에 대한 BER 성능을 기존 LSD 신호 검출 기법과 비교하여 나타내었고, 그림

5와 그림 6에는 16-QAM, 64-QAM에 대한 BER 성능을 비교하여 나타내었다.

표 1. 모의실험 파라미터  
Table 1. Parameters of simulation

구분	내용
송신 안테나 개수	· 4개
수신 안테나 개수	· 4개
변조 기법	· QPSK, 16-QAM, 64-QAM
블록 길이	· 9216 정보 비트열
인터리버	· 블록 랜덤 인터리버
채널 부호화	· 재귀적 조직 길쌈 부호(RSC)의 병렬 연결 · 구속장 K=3 · 생성 방정식 [7 5] · 부호율=1/2
채널 복호화	· 터보 복호기 내 반복 복호 8회

LSD 알고리즘과 제안하는 신호 검출 기법의 BER 성능을 비교하였을 때, 그림 4에서는 16개의 후보 심볼 벡터로 비트 오류율  $10^{-5}$ 을 달성하기 위해 요구되는 SNR의 차이가 미미하다. 그러나 그림 5에서 64개의 후보 심볼 벡터를 이용하였을 때 제안하는 방식의 BER 성능은 기존 LSD 보다 약 1dB의 성능 개선을 보이며, 그림 6에서 256개의 후보 심볼 벡터로 비트 오류율  $10^{-5}$ 을 달성하기 위해 요구되는 SNR은 제안하는 알고리즘이 대략 1.2dB의 이득을 보이고 LSD에서 512개의 후보 심볼 벡터를 이용한 경우와 거의 동일한 성능을 보인다.

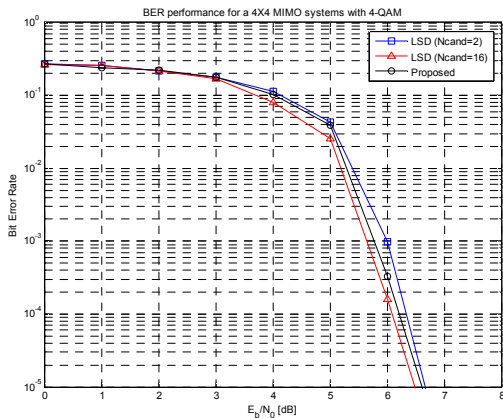


그림 4. 4X4 MIMO 시스템에서 QPSK에 대한 BER 성능  
Fig. 4. BER performance for a 4X4 MIMO system with QPSK

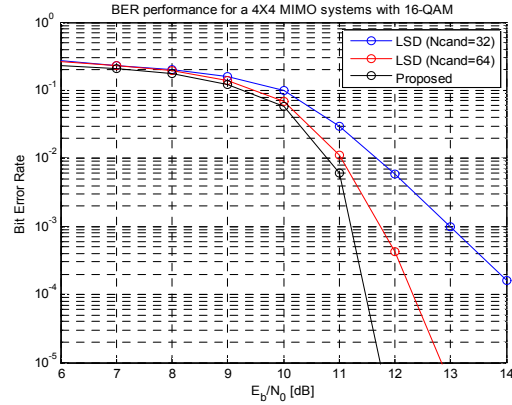


그림 5. 4X4 MIMO 시스템에서 16-QAM에 대한 BER 성능  
Fig. 5. BER performance for a 4X4 MIMO system with 16-QAM

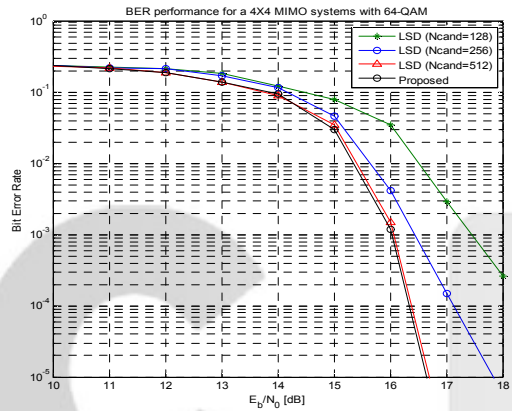


그림 6. 4X4 MIMO 시스템에서 64-QAM에 대한 BER 성능  
Fig. 6. BER performance for a 4X4 MIMO system with 64-QAM

## V. 결론

본 논문에서는  $N_R \times N_T$  MIMO 시스템에서 효율적으로 연관정 출력이 가능한 신호 검출 기법을 제안하였다. 제안된 알고리즘은 최적 심볼 벡터 근처에 제곱 유클리드 거리가 작은 심볼 벡터들이 분포해 있을 것이라는 점에 착안하여, SD 알고리즘으로 얻은 최적 심볼 벡터를 이용하여 간단한 방식으로 후보 리스트를 구성하였다. 컴퓨터 모의실험을 통해 제안된 알고리즘은 변조 차수가 높을수록 같은 개수의 후보 심볼 벡터를 이용하였을 때 기존 LSD보다 우수한 BER 성능을 보이는 것을 확인할 수 있었다. 따라서 제안된 알고리즘은 고차 변조 기법 또는 다수의 송수신 안테나 적용을 고려하는 다양한

MIMO 시스템에 적용할 경우 효율적인 구현이 가능할 것으로 기대된다.

### References

- [1] I. E. Telatar, "Capacity of multi-antenna Gaussian channels", Eur. Trans. Telecommun., Vol. 10, No. 11, pp. 585-595, Nov. 1999.
- [2] G. J. Foschini, "Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas", Bell Labs. Tech. J., Vol. 1, No. 2, pp. 41-59, 1996.
- [3] Jae-Pil Chung and In-Jea Kim, "Performance Analysis of Turbo Equalizer in Fading Channel", Journal of KIIT, Vol. 10, No. 1, pp. 91-96, Jan. 2012.
- [4] C. Berrou, A. Glavieux, and P. Thitimai-shima, "Near Shannon limit error-correcting coding and decoding: Turbo codes", In Proc. Int. Conf. Commun., pp. 1064-1070, May 1993.
- [5] B. Steingrimsson, Z. Q. Luo, and K. M. Wong, "Soft quasi-maximum-likelihood detection for multiple-antenna wireless channels", IEEE Trans. Signal Processing, Vol. 51, No. 11, pp. 2710-2719, Nov. 2003.
- [6] C. Studer, A. Burg, and H. Bolcskei, "Soft-output sphere decoding: algorithms and VLSI implementation", IEEE J. Select. Areas Commun., Vol. 26, No. 2, pp. 290-300, Feb. 2008.
- [7] B. Hochwald and S. ten Brink, "Achieving near-capacity on a multiple-antenna channel", IEEE Trans. Commun., Vol. 51, No. 3, pp. 389-399, Mar. 2003.
- [8] B. Hassibi and H. Vikalo, "On the sphere decoding algorithm: Part I, the expected complexity", IEEE Trans. Signal Processing, Vol. 53, No. 8, pp. 2806-2818, Aug. 2005.
- [9] B. Hassibi and H. Vikalo, "On the sphere decoding algorithm: Part II, generalizations, second-order statistics and applications to communications", IEEE Trans. Signal Processing, Vol. 53, No. 8, pp. 2819-2834, Aug. 2005.

### 저자소개

이 지 현 (Jihyeon Lee)



2015년 2월 : 강남대학교  
전자공학과(공학사)  
2017년 2월 : 한양대학교  
전자컴퓨터통신공학과(공학석사)  
관심분야 : 통신이론, 무선 및 이동  
통신 시스템

임 형 용 (Hyeongyong Lim)



2012년 2월 : 한양대학교  
전자통신컴퓨터공학부(공학사)  
2012년 3월 ~ 현재 : 한양대학교  
전자컴퓨터통신공학과  
(석박사통합과정)  
관심분야 : 디지털 및 무선 통신  
이론, 통계 신호 처리

윤 동 원 (Dongweon Yoon)



1989년 2월 : 한양대학교  
전자통신공학과(공학사)  
1992년 2월 : 한양대학교  
전자통신공학과(공학석사)  
1995년 8월 : 한양대학교  
전자통신공학과(공학박사)  
2017년 6월 현재 : 한양대학교

융합전자공학부 교수  
관심분야 : 무선통신, 위성 및 우주통신, 신호정보