

논문 2008-45SD-6-15

## 2 레벨 탐색을 이용한 스피어 디코딩 알고리즘과 VLSI 구현

( Sphere Decoding Algorithm and VLSI Implementation Using  
Two-Level Search )

현 트롱안\*, 조 종 민\*, 김 진 상\*\*, 조 원 경\*\*\*

( Tronganh Huynh, Jongmin Cho, Jinsang Kim, and Won-Kyung Cho )

### 요 약

본 논문에서는 새로운 2레벨 탐색 스피어 디코딩 알고리즘과 그 하드웨어 구조를 제안한다. 제안된 알고리즘은 심볼검출 시에 성능향상에 영향을 줄 수 있는 유용한 후보군이 이전 단계에서 버려지는 것을 피하기 위해서, 2 레벨 트리탐색을 동시에 수행한다. 시뮬레이션 결과, 제안된 알고리즘이 BER 측면에서 기존의 알고리즘보다 성능이 우수함을 확인할 수 있었다. 제안된 하드웨어 구조는 낮은 복잡도와 고정된 throughput을 갖는 구조로써 BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM의 변조방식을 지원한다. 하드웨어 측면에서 큰 복잡도를 갖는 정렬 블록은 다른 블록과 하드웨어를 공유함으로써 면적을 감소시켰고, 제안된 하드웨어 구조는 기존의 구조들과 비교했을 때 면적이 감소되고 성능이 향상됨을 확인하였다.

### Abstract

In this paper, a novel 2-level-search sphere decoding algorithm for multiple-input multiple-output (MIMO) detection and its VLSI implementation are presented. The proposed algorithm extends the search space by concurrently performing symbol detection on 2 level of the tree search. Therefore, the possibility of discarding good candidates can be avoided. Simulation results demonstrate the good performance of the proposed algorithm in terms of bit-error-rate (BER). From the proposed algorithm, an efficient very large scale integration (VLSI) architecture which incorporates low-complexity and fixed throughput features is proposed. The proposed architecture supports many modulation techniques such as BPSK, QPSK, 16-QAM and 64-QAM. The sorting block, which occupies a large portion of hardware utilization, is shared for different operating modes to reduce the area. The proposed hardware implementation results show the improvement in terms of area and BER performance compared with existing architectures.

**Keywords :** Sphere decoding, MIMO, VLSI, Space-Time Codes, Space-Division Multiplexing

### I. 서 론

무선통신 분야의 전송용량의 증가와 신뢰성 있는 전송에 대한 요구가 증대되고 있다. MIMO 기술은 이러

한 수요를 실현할 수 있는 돌파구로 간주되고 있다<sup>[1]</sup>. 일반적으로 MIMO 기법은 시공간 부호화(Space-Time Coding)와 공간분할 다중화 (Space-Division Multiplexing)로 나눌 수 있다. 시공간부호화는 서로 다른 안테나에서 전송되는 데이터를 인코딩함으로써 무선 통신 시스템의 신뢰성을 높일 수 있는 반면에, 공간분할다중화는 각 안테나에서 서로 독립적인 데이터를 동시에 전송함으로써 데이터 전송률을 높일 수 있다<sup>[2]</sup>. 공간분할 다중화의 가장 큰 문제점은 송수신 안테나의 수와 변조 방식이 높아질수록 수신기에서 디코딩 복잡도가 크게 증가하는데 있다. 그러므로 공간분할 다중화 시스템에서는 공간적으로 다중화 되어 있는 데이터를 효과적으

\* 학생회원, \*\* 평생회원, \*\*\* 정회원 경희대학교 전자·전파공학과

(Department of Electronics and Radio Engineering, KyungHee University)

※ 이 연구는 학술진흥재단과(2006년 D00337) 지식경제부 및 정보통신연구진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업(IITA-2008-(C1090-0801 -0002)) 으로 수행되었습니다.

접수일자: 2008년3월11일, 수정완료일: 2008년5월22일

로 분리하는 알고리즘과 구현방법이 필요하다.

공간분할 다중화를 위한 많은 심볼 검출 알고리즘이 제안되었다. ML(Maximum Likelihood) 검출은 성능측면에서 가장 우수한 기법이나, 안테나 수와 변조방식의 크기가 증가하면 그 복잡도가 지수적으로 증가하기 때문에 구현이 매우 어렵다. 이러한 ML 검출의 복잡도를 감소시키기 위하여 스피어 디코딩이 개발 되었다. 연산량과 성능간의 다양한 trade-off를 갖는 많은 스피어 디코딩 방법이 연구되었으나 일반적으로 스피어 디코딩 기법은 depth-first 탐색과 breadth-first 탐색 방법으로 분류할 수 있다.

Schnorr-Euchner에 의해 제안된 Depth-first 탐색 알고리즘<sup>[3]</sup>은 ML 검출의 복잡도를 낮출 수 있다. 이 방법들은 전후방으로 트리탐색을 함으로써 ML 검출의 복잡도를 낮출 수 있고<sup>[4]</sup>, 그에 관련된 하드웨어 구조가 제안되었다<sup>[5~6]</sup>. Depth-first 스피어 디코딩의 하드웨어 구현시 문제점은 디지털 회로에서 throughput을 높일 수 있는 파이프라인 특성을 이용하여 구현할 수 없다는 점이다. 또한, 연산량이 가변적이기 때문에 최악의 경우 매우 많은 연산량이 요구되는 디코딩을 해야 한다.

반면에 breadth-first 탐색 알고리즘<sup>[7~8]</sup>은 전방 방향으로만 최적의 후보군을 찾는다. K-best 스피어 디코딩 알고리즘<sup>[8]</sup>은 각 트리탐색 레벨에서 K개의 최적의 후보군만을 저장한다. breadth-first탐색 알고리즘의 가장 큰 단점은 K 값이 작을 경우 BER 측면에서 성능 열화가 발생한다는 점이다. breadth-first탐색 알고리즘의 하드웨어 구조 또한 연구되고 있다<sup>[9~10]</sup>. 이 방식의 하드웨어 구조는 파이프라인과 고정된 throughput이 제공된다는 장점을 가지고 있지만, 한 가지 변조 방식만 지원된다는 단점이 있다. 그러므로 이러한 문제를 극복하고 모든 변조방식을 지원할 수 있는 하드웨어 구조가 필요하다.

본 논문에서는 새로운 스피어 디코딩 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘은 최적의 후보군을 찾는 과정에서 성능 향상에 도움을 줄 수 있는 잠재적인 후보군이 삭제될 가능성을 배제하기 위해서 트리 탐색시 2개 레벨에서 동시에 심볼 검출을 수행한다. 탐색의 각 레벨에서는  $K_i$ 개의 심볼 쌍이 유지된다. 기존의 알고리즘과 비교했을 때 제안된 알고리즘의 탐색 레벨의 수는 절반으로 감소되었고, 잠재적인 후보군을 찾기 위한 심볼 탐색 공간이 확장되었기 때문에 성능을 향상시킬 수 있다. 또한 본 논문에서는 제안된 알고리즘을 이용한 새로운 하드웨어 구조도 제안한다.

## II. 2 레벨 탐색 스피어 디코딩 알고리즘

### 1. 시스템 모델

본 논문에서의 MIMO 시스템은  $M$ 개의 송신 안테나와  $N$ 개의 수신 안테나로 이루어지고, 기저대역  $N$ 차원 수신 심볼 벡터는 식 (1)로 나타난다.

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

여기서  $\hat{s} = [\hat{s}_1, \hat{s}_2, \dots, \hat{s}_M]^T$ 는  $M$ 차원 송신 신호 벡터이고 각 신호성분들은 BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM과 같은 복소 성좌도내에서의 독립적인 심볼이다.  $\hat{H}$ 는  $N \times M$  채널 행렬이고, 행렬내의  $\hat{h}_{ij}$ 는  $j$ 번째 송신안테나와  $i$ 번째 수신안테나 사이의 전달함수이다. 모든  $\hat{h}_{ij}$ 는 각 차원마다 평균값이 0이고 분산이 0.5인 i.i.d 복소 랜덤 가우시안 변수이고, 수신기에서는 이 채널 정보를 모두 알고 있다고 가정한다.

$\hat{n} = [\hat{n}_1, \hat{n}_2, \dots, \hat{n}_M]^T$ 는 평균 0, 분산  $\sigma^2$ 인 i.i.d 복소 가우시안 잡음이다.

식 (1)의 복소수 형태의 식은 아래의 식 (2)로 나타낼 수 있다.

$$\hat{y} = \begin{bmatrix} \mathcal{R}(\hat{y}) \\ \mathcal{I}(\hat{y}) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mathcal{R}(\hat{H}) - \mathcal{I}(\hat{H}) \\ \mathcal{I}(\hat{H}) \quad \mathcal{R}(\hat{H}) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathcal{R}(\hat{s}) \\ \mathcal{I}(\hat{s}) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \mathcal{R}(\hat{n}) \\ \mathcal{I}(\hat{n}) \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서  $\mathcal{R}(\cdot)$ 과  $\mathcal{I}(\cdot)$ 는  $(\cdot)$ 의 실수부와 허수부이다.  $n$ 을  $2N$ ,  $m$ 을  $2M$ 라 하고 식 (2)의  $n \times m$  채널 행렬  $\hat{H}$ 는 식 (3)과 같이 QR분할방식으로 삼각행렬로 표현할 수 있다.

$$\hat{H} = QR \quad (3)$$

여기서  $R$ 는  $m \times m$  상삼각행렬이고  $Q$ 는 직교하는 열을 갖는  $n \times m$  행렬이다. 식 (2)에  $Q^H$ 를 곱하면 식 (4)와 같이 표현할 수 있다.

$$y = \begin{bmatrix} R_{1,1} & R_{1,2} & \dots & R_{1,2M} \\ R_{2,1} & R_{2,2} & \dots & R_{2,2M} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ R_{2M,1} & R_{2M,2} & \dots & R_{2M,2M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathcal{R}(\hat{s}) \\ \mathcal{I}(\hat{s}) \end{bmatrix} + Q^H \begin{bmatrix} \mathcal{R}(\hat{n}) \\ \mathcal{I}(\hat{n}) \end{bmatrix} = Rs + n' \quad (4)$$

여기서  $y = Q^H \hat{y}$ 이고  $n' = Q^H \hat{n}$ 이다. MIMO 검출의 목적은 성상도 상에서 가장 가까운 심볼위치,  $\hat{s}$ 를 찾는

것이고 이는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{s} = \operatorname{argmin}_{s \in \Omega^{2M}} \|y - Rs\|^2 \quad (5)$$

여기서 각  $s$ 의 값은 실수 성좌도내의 점  $\Omega$  즉  $s \in \Omega^{2M}$  에서 정의된다.

## 2. 2 레벨 탐색 스피어 디코딩 알고리즘

MIMO 검출방식에서 ML 검출은 최적의 성능을 발휘하나 그 복잡도가 전송 속도에 비례하여 지수적으로 증가한다. 스피어 디코딩은 이런 ML 검출의 복잡도를 감소시키기 위하여 제안되었고 그 성능에 있어서도 ML 검출에 거의 근접한다<sup>[3]</sup>. 특히 breadth-first 탐색 스피어 디코딩은 고정된 throughput과 파이프라인 등의 많은 장점을 갖는 이유로 활발한 연구가 진행되고 있다. depth-first 방식과 비교했을 때 breadth-first 방식의 단점은 K변수가 충분히 크지 않을 때 BER 측면에서 성능 열화가 발생한다는 점이다. 그렇기 때문에 breadth-first 알고리즘은 효율적인 하드웨어 측면뿐만 아니라 BER 성능을 유지시킬 수 있어야 한다.

본 논문에서는 새로운 breadth-first 탐색 스피어 디코딩 알고리즘을 제안한다. 제안된 알고리즘은 성능 향상을 위해서 트리 탐색시 두 레벨에 걸쳐 동시에 후보를 탐색하는 방법을 이용하였다. 그림 1은 제안된 알고리즘 핵심개념을 보여준다. 그림 1(a)은 기존의 스피어 디코딩방법<sup>[8~10]</sup>에 대한 것으로서 트리탐색의 레벨  $i$ 의 노드 1, 3, 5가 선택된 후보군임을 나타내고, 이들은 각각 누적 PED (Partial Euclidean distance) 값 0.2, 0.3, 0.4를 가지고 있다. 여기서 노드 7은 높은 PED 값으로 인해서 버려진 것을 볼 수 있다. 선택된 후보군 노드들을 레벨  $i-1$ 로 확장하여 새로운 PED 값을 연산하고 다시 후보군 노드를 갱신하면 노드 2, 4, 6이 선택 되는 것을 볼 수 있다. 노드 8은 노드 6보다 더 낮은 PED 값을 가지고 있지만 이미 레벨  $i$ 에서 노드 7값이 버려졌기 때문에 두 레벨의 탐색과정 동안 최적의 후보군은 노드쌍 (1, 2), (3, 4), (5, 6)이 된다. 반면에 그림 1(b)과 같이 제안된 알고리즘은 최적의 심볼쌍을 찾기 위하여 2 레벨에서 동시에 탐색을 수행한다. 노드쌍 (7, 8)의 최종 누적 PED 값은 0.55이고 노드 (5, 6)의 최종 누적 PED는 0.7이기 때문에 현재 레벨에서의 최종적으로 선택된 후보군은 (7, 8), (1, 2), (3, 4)가 된다. 2 레벨 탐색을 이용한 제안된 알고리즘은 탐색 영역이 확장되어 성능개선에 영향을 줄 수 있는 잠재적인 후보군이 버려지는 것을 막을 수 있기 때문에 MIMO 검출기의 성능을

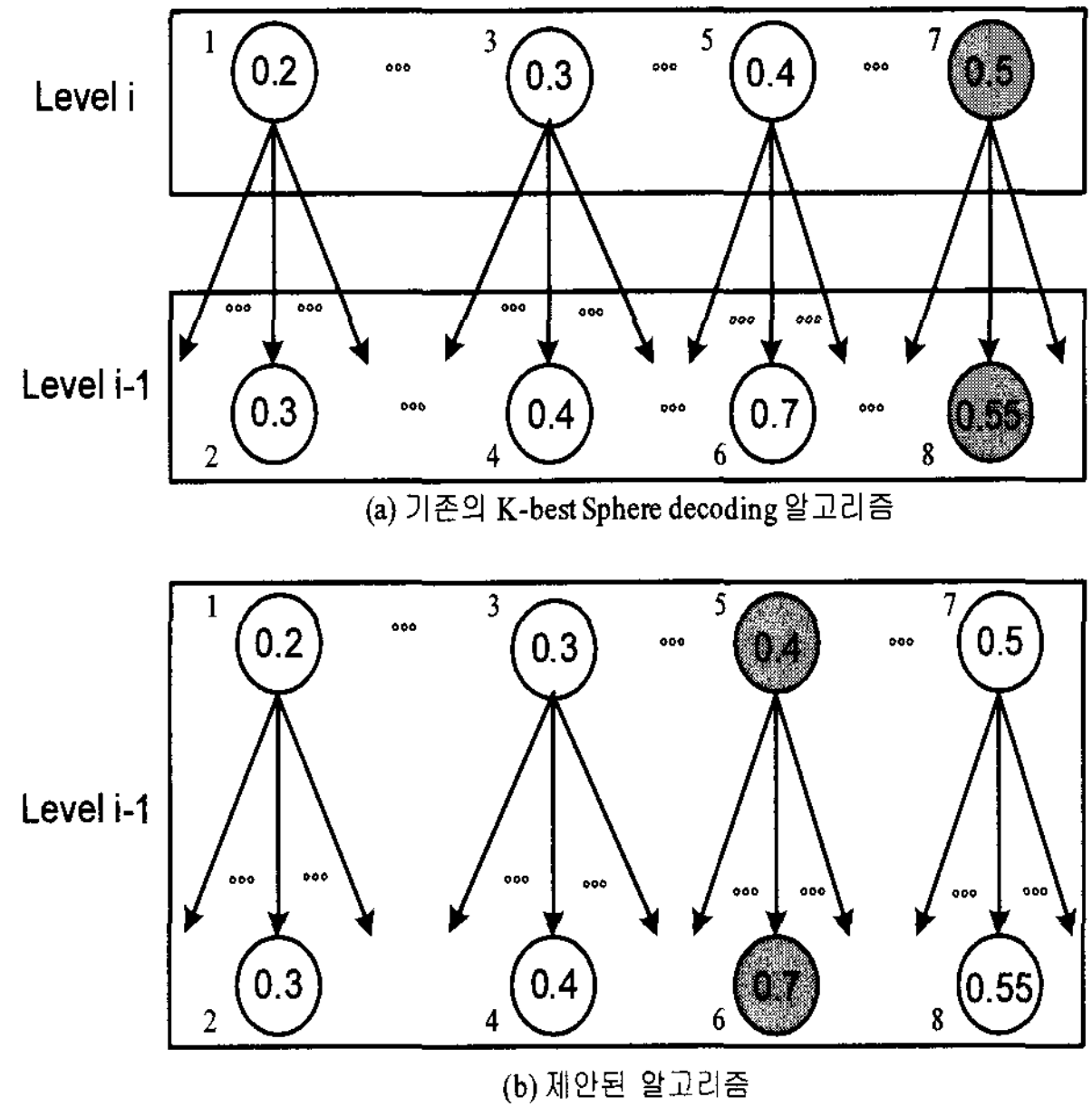


그림 1. 기존 및 제안된 알고리즘의 탐색과정 비교  
Fig. 1. Search process Comparison between the proposed algorithm and conventional algorithm.

향상시킬 수 있다.

제안된 알고리즘은 다음과 같이 요약할 수 있다.

단계 1) (초기화) 초기 PED  $L_{M+1} = 0$ , 입력  $y, R$ .

단계 2) (각 레벨  $i$ 에서 PED 연산)

$i = M, M-1, M-2, \dots, 1$ .

레벨  $i$ 에서 PED  $L_i(s^{(j-1)})$ 는 식 (6)과 같다.

$$L_i(s^{(j-1)}) = L_{i+1}(s^{(j+1)}) + \left| y_i - \sum_{k=j}^{2M} R_{j,k} s_k \right|^2 + \left| y_{j-1} - \sum_{k=j-1}^{2M} R_{j-1,k} s_k \right|^2 \quad (6)$$

여기서  $j = 2i$  이다. 식 (6)에서  $s^{(j+1)} = [s_{j+1} \ s_{j+2} \ \dots \ s_{2M}]$  는 트리탐색의 이전 레벨에서 찾아진 심볼의 부분 벡터이다. 식 (6)은 식 (7)과 같이 다시 나타낼 수 있다.

$$L_i(s^{(j-1)}) = L_{i+1}(s^{(j+1)}) + \left| y_{j-1} - R_{j,j} s_j - \sum_{k=j+1}^{2M} R_{j,k} s_k \right|^2 + \left| y_j - R_{j-1,j-1} s_{j-1} - R_{j-1,j} s_j - \sum_{k=j+1}^{2M} R_{j-1,k} s_k \right|^2 \quad (7)$$

$$= L_{i+1}(s^{(j+1)}) + \left| y_{j-1} - R_{j,j} s_j - a_j(s^{(j+1)}) \right|^2 + \left| y_j - R_{j-1,j-1} s_{j-1} - R_{j-1,j} s_j - b_j(s^{(j+1)}) \right|^2$$

식 (7)에서의  $a_j(s^{(j+1)}) = \sum_{k=j+1}^{2M} R_{j-1,k} s_k$  항과

$b_j(s^{(j+1)}) = \sum_{k=j+1}^{2M} R_{j-1,k} s_k$  항은 이전 레벨에서 검출된  $s^{(j+1)}$ 에 의해서만 영향을 받는다.  $\Omega$ 가  $Q$ 개이고 레벨  $i-1$ 에서  $K_{i-1}$ 개의 후보군  $s^{(j+1)}$ 을 갖는다면, 이 단계에서 전체 PED 값의 갯수는  $G = K_{i-1} \times Q$ 가 된다.

단계 3) (정렬)  $L_i(s^{(j+1)})$ 을 오름차순으로 정렬하고  $K_i$ 의 최소값을 선택한다. PED 값에 의해 정해진  $K_i$ 개의 심볼쌍 ( $s_j, s_{j-1}$ )를 저장하고 단계 2로 돌아간다. 레벨 1이 트리탐색의 마지막 레벨이기 때문에  $K_1 = 1$ 이 된다.

### 3. 시뮬레이션 결과

그림 2는 4x4 MIMO 시스템에서 16-QAM 변조를 사용했을 때 기존 스피어 디코딩 알고리즘<sup>[8]</sup>과 제안된 알고리즘의 BER 성능을 보여준다. 후보군의 탐색영역을 확장한 제안된 알고리즘이 BER 측면에서 더 우수함을 알 수 있다.

본 논문에서는  $K_i$ 값이 제안된 알고리즘의 시스템 성능에 미치는 영향을 분석하기 위해서 다양한  $K_i$ 값으로 시뮬레이션을 수행하였다. 그림 3은 제안된 MIMO 검출기에 3가지 서로 다른  $K_i$ 값을 초기화( $K_1 = 1, K_2 = 4, K_3 = 4, K_4 = 4$ ), ( $K_1 = 1, K_2 = 5, K_3 = 5, K_4 = 5$ ), ( $K_1 = 1, K_2 = 6, K_3 = 6, K_4 = 6$ ) 할 경우의 BER 변화에 대해서 보여준다. 그림 3과 같이  $K_i$ 를 ( $K_1 = 1, K_2 = 6, K_3 = 6, K_4 = 6$ )로 설정할 때가 가장 좋은 성능을 가

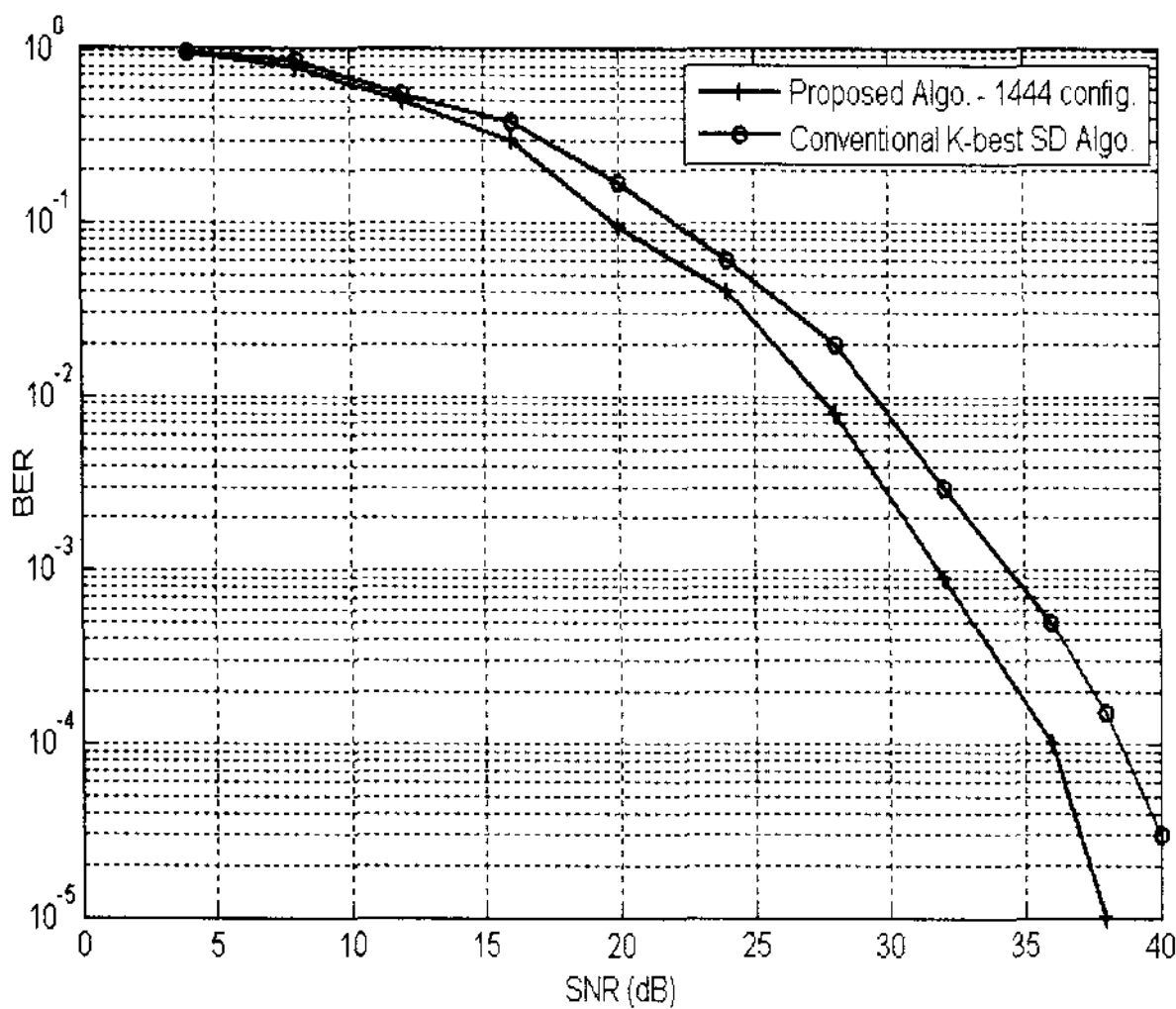


그림 2. 기존 알고리즘과 제안된 알고리즘의 BER 비교  
Fig. 2. BER comparison between conventional K-best sphere decoding algorithm and proposed 2-level search algorithm.

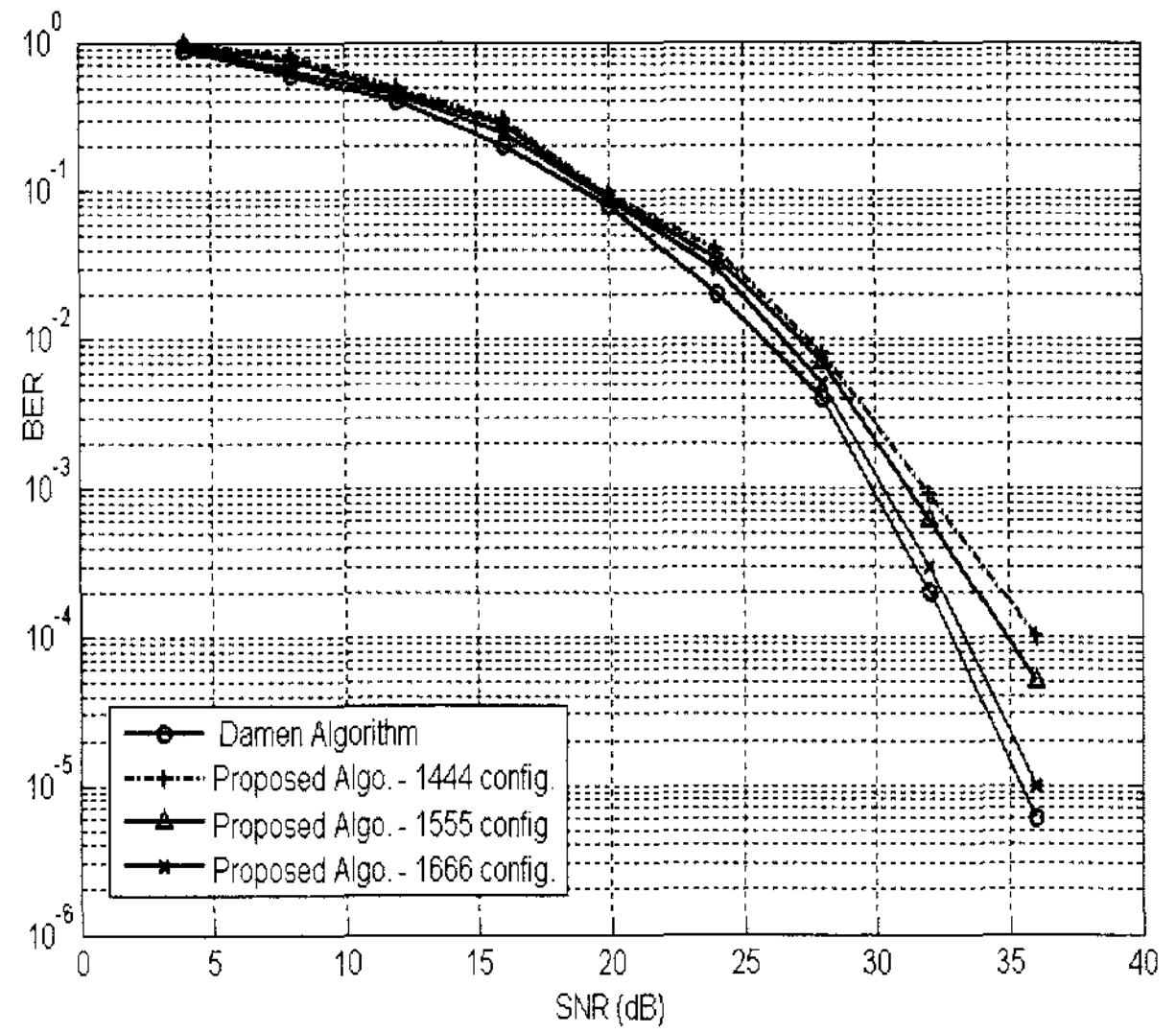


그림 3. 다양한  $K_i$  초기값을 이용한 BER 성능비교  
Fig. 3. BER Performance for different configurations.

지는 것을 알 수 있고, 작은  $K_i$ 값은 성능의 열화를 가져오는 것을 알 수 있다. 제안된 MIMO 검출기가 충분히 큰  $K_i$ 값을 갖는다면 BER 곡선이 Damen등에 의해 제안된 depth-first 알고리즘<sup>[4]</sup>에 근접하는 것을 알 수 있다. [4]에서 Damen등에 의해 제안된 기법은 가장 우수한 성능의 스피어 디코딩 알고리즘이고 제안된 2 레벨 탐색 스피어 디코딩 알고리즘은 표 1에 비교대상이 된 기존 스피어 디코딩 알고리즘보다 우수한 성능을 보인다는 것을 그림 2, 3을 통하여 알 수 있다.

### III. 하드웨어 구조

MIMO 검출기는 IEEE 802.11n 차세대 무선랜 표준과 같은 MIMO-OFDM 기반의 수신기에서 핵심 블록이다. 그러므로 효율적인 하드웨어 구조를 위하여 MIMO 검출기의 면적은 가능하면 최소화 되어야 한다.

그림 4는 제안된 4 x 4 MIMO 검출기의 하드웨어 구조이다( $K_i = 4, i = 2, 3, 4$ ). 이 구조는 최대 4개 (BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM)까지의 다른 변조 방식을 지원할 수 있다. RAM Y와 RAM R은 식 (6)의 변수  $y$ 와  $R$ 을 저장하는데 사용된다. Signal Generator 블록은 PED 연산에서 사용되는 잠재적인 후보군( $s_j, s_{j-1}$ )을 연산한다. sorting 블록의 주목적은 PED 연산블록에서 나온 PED값들을 정렬하고 최적의  $K_i$ 개의 값을 찾고 그에 대응하는 심볼쌍 ( $s_j, s_{j-1}$ )을 찾는 것이다. RAM PED 블록은 정렬 연산 후에 누적된 PED 값들을 저장하고, RAM PE1, RAM PE2, RAM PE3, RAM



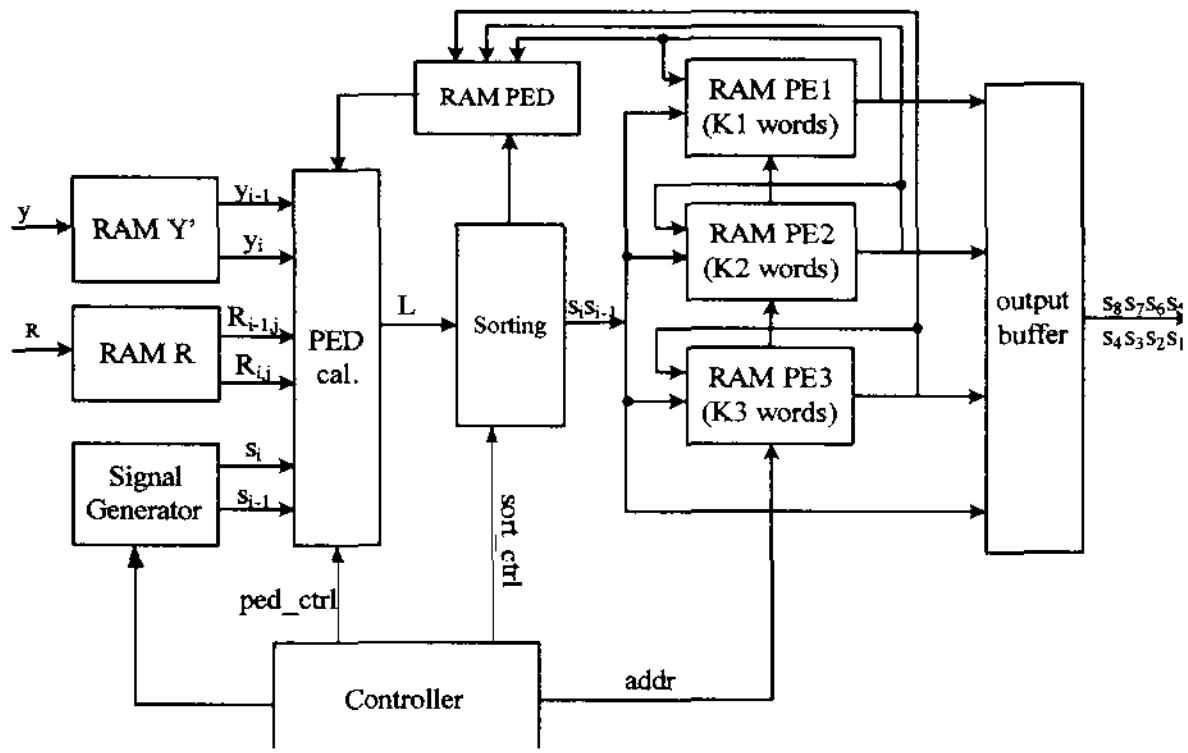


그림 4. 제안된 2레벨 탐색 MIMO검출기의 하드웨어 구조

Fig. 4. The hardware architecture of the proposed 2-level search MIMO detector.

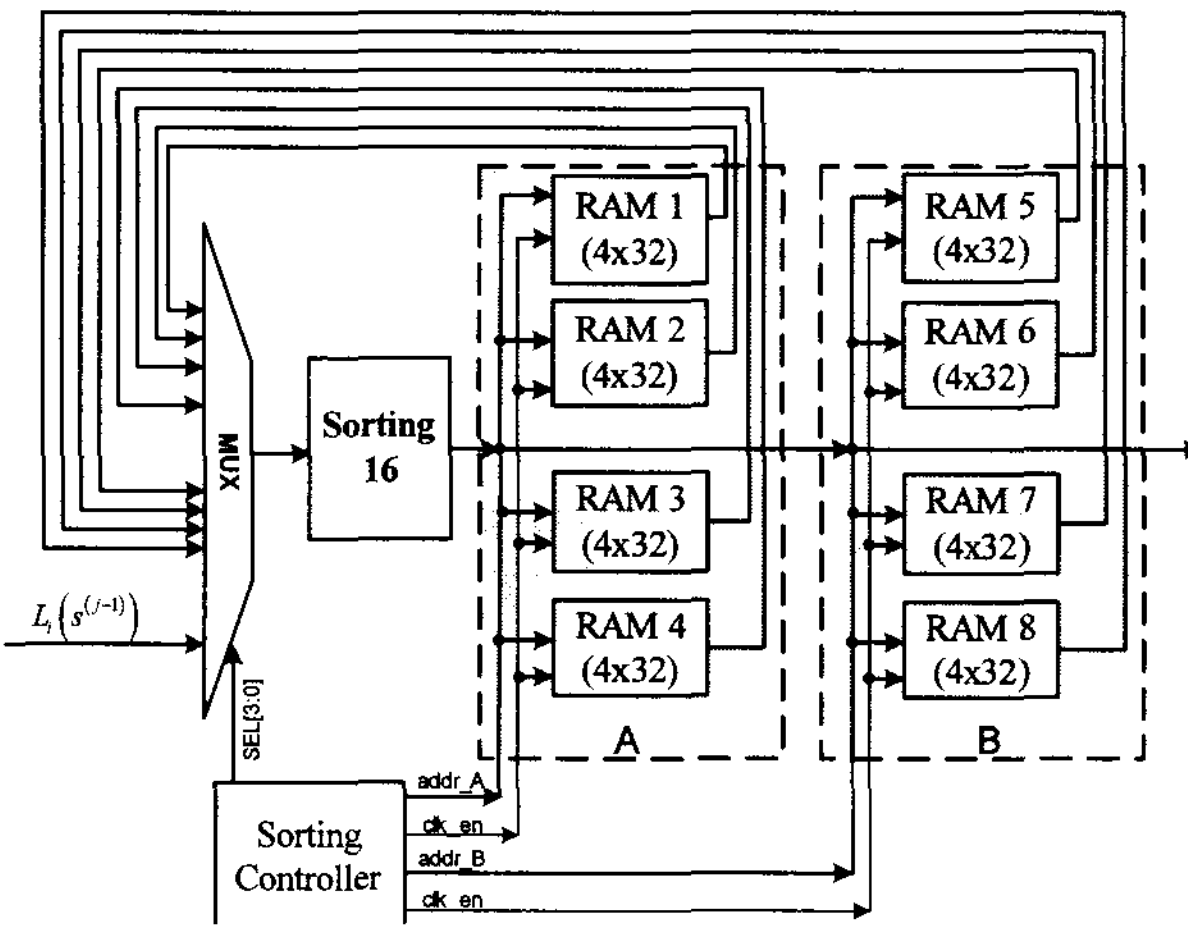


그림 5. 제안된 정렬 블록 구조

Fig. 5. The proposed sorting architecture.

PE4는 각각 심볼쌍  $\{s_8, s_7\}$ ,  $\{s_6, s_5\}$ ,  $\{s_4, s_3\}$ ,  $\{s_2, s_1\}$  을 저장한다. 이 심볼쌍은 정렬연산에 따라 결정된 최적의 후보군이다.

제안된 하드웨어 구조는 4가지 변조방식을 지원하기 때문에 4종류의 정렬기가 필요하고 이는 하드웨어 복잡도가 높아진다는 것을 의미한다. 따라서 본 논문에서는 그림 5와 같이 정렬기를 공유하는 구조로써 하드웨어 복잡도를 감소시켰다. 256, 64개의 입력을 갖는 정렬기는 16개의 입력을 갖는 정렬기로 구현되어 복잡도를 감소시킬 수 있다. 16-QAM과 64-QAM 모드에서는, Sorting-16 블록에서 정렬된 값들이 4-word RAM에 저장되고, BPSK, QPSK 모드에서는 RAM A, B가 clock gating 기법으로 전력소모를 줄일 수 있다. 마찬가지로 16-QAM 모드에서는 RAM B가 같은 방식으로 clock gating된다. 그림 6은 Sorting-16 블록을 나타낸다. 매 클럭 사이클마다 입력포트 p로 새로운 PED 값

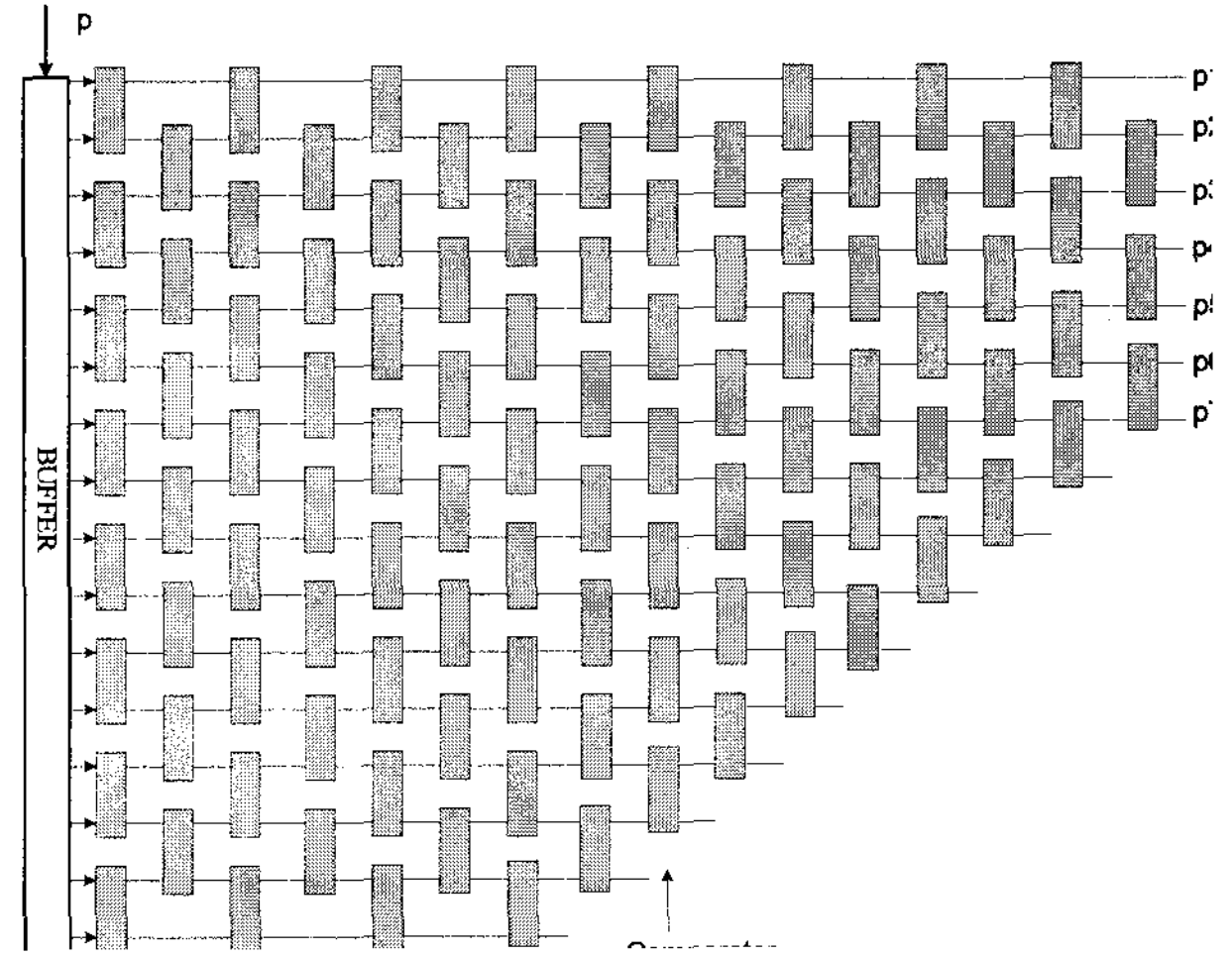


그림 6. Sorting-16 블록 구조

Fig. 6. Sorting-16 architecture.

이 입력되고 p1부터 p7까지 오름차순으로 정렬된 PED 값은 출력포트를 통해서 출력된다. 정렬기는 그림 6과 같이 기본적인 비교기의 집합으로 구성된다. Sorting-16 블록은 PED값을 정렬할 뿐 아니라 정렬된 PED 값에 대응하는 부분 벡터를 추적한다.

#### IV. 구현 결과

제안된 하드웨어 구조는 Verilog HDL로 구현되었고, 합성은 Synopsys Design Vision, P&R은 Synopsys Astro, timing 시뮬레이션은 Modelsim으로 진행되었다.

표 1은 제안된 구조와 기존 구조간의 하드웨어 비교를 보여준다. 게이트 수는 NAND 게이트 수로 정의된다. RAM과 같은 블록역시 게이트 수로 환산되었다. 표

표 1. 하드웨어 구조 비교

Table 1. Silicon Implementation Comparison.

Ref.	[8]	[10]	[5]	제안된 구조
검출 기법	K-best SD	KSE	Sequential SE	2-level search SD
변조방식	16-QAM	16-QAM	16-QAM	BPSK, QPSK, 16-QAM, 64-QAM
공정(μm)	0.35	0.35	0.25	0.18
게이트 수	109,000	91,000	117,000	90,000
최대클럭주파수	100	100	51	120
Throughput (Mb/s)	10	53.3	SNR에 따라 가변	80

1에서 보는 것과 같이 제안된 구조는 [5], [8]의 구조보다 게이트 수와 throughput 측면에서 월등한 성능을 보인다. [10]에서 제안된 구조와 본 논문에서 제안된 2레벨 탐색 스피어 디코딩 알고리즘에 동일한 공정을 적용하여 비교한다고 가정했을 때 제안된 구조의 장점은 기존의 방식보다 게이트 수가 감소하고, 주파수 및 throughput이 높아 고속의 MIMO 디코딩이 가능하며 BER 성능이 우수함을 확인 할 수 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 새로운 2레벨 탐색 스피어 디코딩 MIMO 검출방식과 VLSI 구조가 제안되었다. 제안된 알고리즘은 트리 탐색시 2레벨에 걸쳐 동시 탐색을 실시한다. 시뮬레이션 결과에서 볼 수 있듯이 제안된 기법은 기존의 K-best 스피어 디코딩의 성능을 능가한다. 제안하는 알고리즘을 기반으로 하는 효율적인 4 x 4 MIMO 검출기 VLSI 구조는 다양한 변조방식, 저전력, 높은 throughput, 효율적인 하드웨어 면적을 갖는다. 본 연구결과를 향후 효율적인 soft-output MIMO 검출기 구조의 개발에 적용시킬 예정이다.

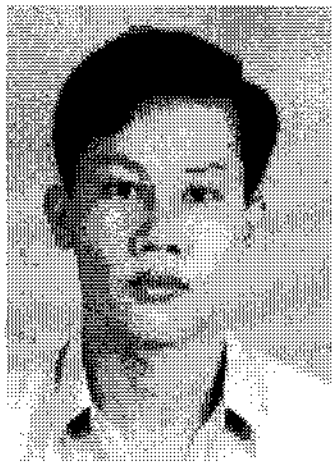
## 참 고 문 헌

- [1] G. J. Foschini Jr. and M. J. Gans, "On limits of wireless communication in a fading environment when using multiple antennas," *Wireless Personal Commun.*, Mar. 1998.
- [2] P. W. Wolniansky., G. J. Foschini, G. D. Golden, and R. A. Valenzuela. "V-BLAST: An architecture for realizing very high data-rates over the rich scattering widess ehannel," *Froc. IEEE ISSSE-98*, Pisa, Italia, 30th September 1998.
- [3] C. P. Schnorr and M. Euchner, "Lattice basis reduction: Improving practical lattice basis reduction and solving subset sum problems," *Math. Programming*, vol. 66, pp.181-199, 1994.
- [4] M. O. Damen, H. El Gamal, and G. Caire, "On maximum-likelihood detection and the search for the closest lattice point," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol.49, no.10, pp.2389-2402, Oct. 2003.
- [5] A. Burg, M. Borgmann, M. Wenk, M. Zellweger, W. Fichtner and H. Bölcskei, "VLSI implementation of MIMO detection using the sphere decoding algorithm," *IEEE Journal of*

*Solid-State Circuits*, vol. 40, Jul. 2005, pp. 1566-1577.

- [6] A. Burg, M. Borgmann, C. Simon, M. Wenk, M. Zellweger and W. Fichtner, "Performance tradeoffs in the VLSI implementation of the sphere decoding algorithm," *Fifth IEE International Conference on 3G Mobile Communication Technologies*, pp.93-97, Oct.2004.
- [7] D. L. Ruyet, T. Bertozzi, and B. Özbek, "Breadth first algorithms for APP detectors over MIMO channels," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun.*, Jun. 2004, pp. 926 - 930.
- [8] K.-W. Wong, C.-Y. Tsui, R. S.-K. Cheng, and W.-H. Mow, "A VLSI architecture of a K-best lattice decoding algorithm for MIMO channels," in *Proc. IEEE Int. Symp. Circuits Syst.*, May 2002, pp.III-273 - III-276.
- [9] Z. Guo and P. Nilsson, "VLSI implementation issues of lattice decoders for MIMO systems," in *Proc. IEEE Int. Symp. Circuits Syst.*, Vancouver, BC, Canada, May 2004, pp.IV-477 - IV-480.
- [10] Z. Guo and P. Nilson, "Algorithm and Implementation of the K-best sphere decoding for MIMO detection," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol.24, pp.491-503, March 2006.

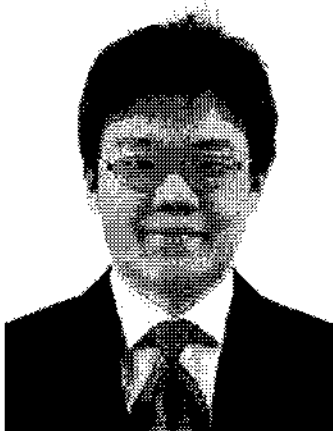
저 자 소 개



현 트롱안(학생회원)  
 2004년 호치민 공대 전기및전자  
 공학과 학사졸업.  
 2007년 경희대학교 전자전파  
 공학과 석사졸업.  
 2007년~현재 경희대학교  
 전자전파공학과 박사과정.  
 <주관심분야 : 이동통신 SoC 설계>



김 진 상(평생회원)  
 2000년 미국 콜로라도 주립대  
 전자공학 박사졸업.  
 1990년 2월~2001년 8월  
 KT 연구소.  
 2001년~현재 경희대학교  
 전자정보학부 부교수.  
 <주관심분야 : 영상처리 및 이동통신용 SoC 설  
 계>



조 종 민(학생회원)  
 2007년 경희대학교 전자정보학부  
 학사졸업.  
 2007년~현재 경희대학교  
 전자전파공학과 석사과정.  
 <주관심분야 : 이동통신 SoC 설  
 계>



조 원 경(정회원)  
 1986년 한양대학교 전자공학과  
 공학박사 졸업.  
 1980년~현재 경희대학교  
 전자정보학부 정교수.  
 <주관심분야 : 컴퓨터 시스템 구  
 조, VLSI 설계>