

# MIMO Iterative 수신기에서 계층적 변조 특성을 이용한 낮은 복잡도를 가지는 후보 리스트 발생 기법

정희원 전은성\*, 양장훈\*, 종신회원 김동구\*

## A Low Complexity Candidate List Generation for MIMO Iterative Receiver via Hierarchically Modulated Property

Eun Sung Jeon\*, Jang Hoon Yang\* *Regular Members*, Dong Ku Kim\* *Lifelong Member*

### 요약

본 논문에서는 QAM 변조의 계층적 변조 특성을 이용하여 Iterative MIMO 수신기에서 LLR(log likelihood ratio)값을 구하기 위한 낮은 복잡도를 가지는 후보 리스트 발생 기법을 소개한다. QAM 변조는 에러에 강인한 HP (high priority) 심볼과 상대적으로 에러에 약한 LP(low priority) 심볼로 분해할 수 있다. 본 논문에서는 HP 심볼에 대해서는 간단한 ZF 수신기의 output 값과 인접 HP 심볼들을 이용하여 먼저 안테나별로 HP 심볼 리스트를 발생하고, 각 HP 심볼 리스트에 대해서 ML(maximum likelihood)의 검파 성능을 가지는 sphere decoder를 사용하여 LP 심볼 리스트를 발생하여 후보 심볼 리스트를 발생하였다. 두 번째 iteration 이후부터는 채널 디코더에서 피드백되는 apriori 값을 이용하여 후보 심볼 리스트를 발생하였다. 실험의 비교군은 MIMO 채널 용량에 근사적으로 접근하는 list sphere decoder (LSD)를 사용하였다. 전산 실험 결과, 제안하는 후보 리스트 발생 기법은 LSD에 비해서 첫 번째 iteration에서는 BER성능이 다소 떨어지나, iteration 이 진행될수록 LSD에 근접하는 성능을 보였으며, 후보 리스트의 발생 시간도 LSD에 비해서 월등히 우수한 성능을 가짐을 볼 수 있었다. 또한 LLR 계산 시 탐색해야 할 후보 리스트의 개수 역시 LSD에 비해서 적은 값을 가지므로, LLR 계산 시 필요한 연산의 복잡도가 낮음을 확인할 수 있었다.

**Key Words** : Candidate List, HP Symbol, LP Symbol, Apriori Value.

### ABSTRACT

In this paper, We present a low complexity candidate list generation scheme in iterative MIMO receiver. Since QAM modulation can be decomposed into HP symbols and LP symbol and HP symbol is robust in error capability, we generate HP symbol list with simple ZF detector output and its corresponding neighbor HP symbols. Then, based on HP symbol list, the LP symbol list is generated by using the sphere decoder. From the second iteration, since apriori value from channel decoder is available, the candidate list is updated based on demodulated apriori value. Through the simulation, we observe that at the first iteration, the BER performance is worse than LSD. However, as the number of iteration is increased, the proposed scheme has almost same performance as LSD. Moreover, the proposed one has reduced candidate list generation time and lower number of candidate list compared with LSD.

\* 연세대학교 전기전자공학과 이동통신 연구실(youngmil2@yonsei.ac.kr)

논문번호 : KICS2009-04-174, 접수일자 : 2009년 4월 24일, 최종논문접수일자 : 2009년 6월 4일

### 1. 서 론

다중 안테나 시스템 (MIMO)는 송수신 안테나의 최소 개수에 따라 채널 용량이 비례적으로 증가함이 잘 알려져 있다<sup>[1]</sup>. 이러한 증가된 채널 용량을 지원하기 위해서 Zero-forcing(ZF), Minimum mean square error(MMSE), Maximum likelihood(ML) 그리고 V-BLAST와 같은 검출 방법이 제안되었다. 만약 채널 디코더를 이용한 iterative MIMO 수신기를 설계하면 채널 용량에 근접하는 BER(bit error rate)를 얻을 수 있다. 여기서 Inner MIMO detector에서 각 비트에 대한 LLR(log likelihood ratio)를 구하기 위해서 MAP를 이용하는데, optimal MAP를 이용하여 LLR 값을 얻기 위해서는 탐색해야 할 심볼 벡터의 개수가 수신 안테나 개수와 변조 지수에 대해서 지수적으로 증가하므로 구현이 사실상 불가능하다.

따라서 optimal MAP 보다는 낮은 복잡도를 가지면서 optimal MAP에 근사하는 BER 성능을 가지는 sub-optimal MAP detector에 대한 연구가 진행되었다.<sup>[2][3][4][5]</sup> 그중에 [2]의 list sphere decoder(LSD)는 수신 심볼 벡터로부터 구면의 반경 이내에 오는 모든 심볼 벡터를 후보 리스트로 정하여서 후보 리스트의 심볼 벡터만을 이용하여 MAP의 해를 구하였다. 그리고 실험을 통해 후보 심볼 리스트의 개수를 충분히 많이 설정할 경우, MIMO 채널 용량에 근사적으로 접근함을 보였다. [3]은 기존의 ML 심볼 벡터를 찾는 문제를 MAP의 해를 찾기 위한 cost function로 재정의하여 sphere decoder를 통해서 해당하는 cost function의 해를 구하였다. [4]와 [5]는 각각 tree 검색 기법과 lattice reduction 기법을 이용하여 후보 리스트를 발생하여 sub-optimal MAP을 구현하였다. [5]의 경우, LSD에 비해서 복잡도는 많이 감소하였으나, LSD의 BER 성능을 가지지 못하였다.

본 논문에서는 QAM 변조가 가지는 계층적 변조 특성을 이용하여 후보 리스트를 발생하는 기법을 소개한다. QAM 변조의 경우, 에러에 강인한 HP 심볼과 상대적으로 약한 LP 심볼로 분해할 수 있는데, HP 심볼에 대해서는 간단한 ZF detector로 HP 심볼 리스트를 발생하고, LP 심볼의 경우는 sphere decoder를 통하여 LP 후보 리스트를 발생하였다. 그리고 두 번째 iteration 부터는 채널 디코더에서 피드백되는 apriori 값을 기준으로 후보 리스트를 발생하였다.

논문의 구성은 다음과 같다. II에서는 시스템 모델을 소개하고, III 장에서는 제안하는 후보 리스트 발생 기법을 소개한다. IV에서 전산 실험의 결과를 보여주고, V에서 결론을 맺는다.

### II. 시스템 모델

시스템 모델은 그림 1과 같다. 먼저 정보 비트열(information bit sequence)이 채널 인코딩과 인터리머 그리고 심볼 mapper 를 거쳐서  $N_r$ 개의 송신 안테나를 통해서 전송된다.  $N_r$ 개의 수신 안테나를 통해서 수신된 신호는 다음과 같이 표현된다.

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

여기서  $H$ 은  $N_r \times N_t$  채널 행렬,  $s$ 는  $N_t \times 1$ 의 송신 신호벡터,  $y$ 은  $N_r \times 1$ 의 수신 신호 벡터를 나타낸다. 채널 행렬  $H$ 의 각 원소는 평균이 0이고 분산이 1인 복소 가우시안 랜덤 변수이다. 그리고  $n$ 은 평균이 0 이고 분산이  $\sigma^2$ 인 복소 가우시안 랜덤 변수로 구성된 벡터이다.

Inner MIMO detector는 수신 심볼 벡터  $y$ 에 대해서 LLR를 다음과 같이 구한다.

$$L(x_k|y) = \log \frac{P[x_k = +1|y]}{P[x_k = -1|y]} = L_a(x_k) + L_e(x_k|y) \tag{2}$$

여기서  $L_a(x_k)$ 와  $L_e(x_k|y)$ 는 각각  $x_k$ 에 대한 apriori 값과 extrinsic 값이며 아래와 같이 정의된다<sup>[2]</sup>.

$$L_a(x_k) = \log \frac{P[x_k = +1]}{P[x_k = -1]}, \tag{3}$$

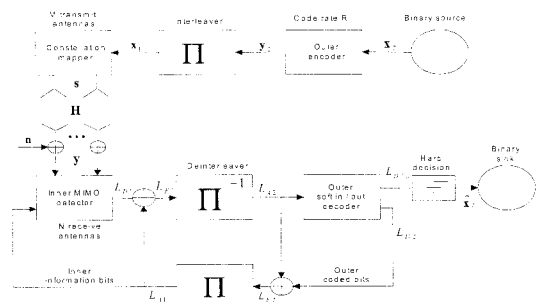


그림 1. 시스템 모델<sup>[2]</sup>

$$L_e(x_k) = \frac{1}{2} \max_{x \in X_{k,+1}} \left\{ -\frac{1}{\sigma^2} \|y - Hs\|^2 + x_{[k]}^T L_{a,k} \right\} - \frac{1}{2} \max_{x \in X_{k,-1}} \left\{ -\frac{1}{\sigma^2} \|y - Hs\|^2 + x_{[k]}^T L_{a,k} \right\} \quad (4)$$

(4)에서  $X_{k,\pm 1}$ 는  $k$  번째 비트가  $+1$  인 모든 비트 벡터의 집합이고,  $x_{[k]}$ 과  $L_{a,k}$ 는 각각  $k$  번째 비트를 제외한  $x$ 와  $L_a$ 의 서브(sub) 벡터이다. 그런데 (4)에서 각 항에서 조건을 만족하는 최대값을 구하는 것은 NP 문제이다. 따라서 가능한 모든  $x$ 를 대입하여 최대값을 구할 수밖에 없다. 하지만 안테나 개수와 변조지수에 비례하여  $x$ 의 크기가 증가하고 이에 따라서 탐색해야 할  $x$ 의 개수는 지수적으로 많아지게 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 (4)의 최대값을 구할 수 있는 신뢰성이 있는 심볼 벡터들을 구하여, 심볼 벡터들 가운데 (4)의 최대값을 찾는다. 이러한 심볼 벡터들을 “후보 리스트”(candidate list)라고 한다. 심볼 벡터 리스트의 집합을  $L$ 이라 하면 결국 (4)는 다음과 표현된다.

$$L_e(x_k) = \frac{1}{2} \max_{x \in X_{k,+1} \cap L} \left\{ -\frac{1}{\sigma^2} \|y - Hs\|^2 + x_{[k]}^T L_{a,k} \right\} - \frac{1}{2} \max_{x \in X_{k,-1} \cap L} \left\{ -\frac{1}{\sigma^2} \|y - Hs\|^2 + x_{[k]}^T L_{a,k} \right\} \quad (5)$$

### III. 제안하는 후보 리스트 발생 기법

#### 3.1 계층 변조 특성을 이용한 후보 리스트 발생

QAM 변조 심볼은 HP 심볼(high priority)과 LP 심볼(low priority) 심볼로 계층화되어 있다. HP 심볼은 HP 심볼 간 (유클리디안) 거리가 크므로 LP 심볼에 비해서 에러에 강인하다. 그림 2는 16QAM의 경우를 보여주고 있다. 이와 같은 계층적 구조를 이용하면 16 QAM의 심볼  $s$ 는 다음과 같이 두 개의 QPSK 심볼로 분해가 가능하다.

$$s = s_1 + \frac{1}{2} s_2 \quad (6)$$

본 논문에서는 16 QAM의 경우에 대해서 설명한다. 64QAM, 128QAM과 같은 경우도 같은 원리로 낮은 변조로 분해가 가능하다<sup>6)</sup>.

Iterative MIMO 수신기에서 초기 iteration에서는 채널 디코더에서 피드백 되는 apriori 값,  $L_a$ 가 0이

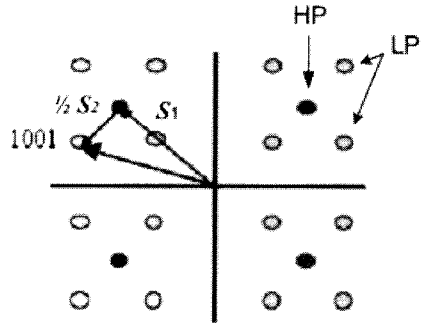


그림 2. 16-QAM의 계층적 변조 구조

므로, 초기 iteration에서는 (5)에서  $\|y - Hs\|$ 을 최소화하는 심볼 벡터  $s$ 를 후보 리스트로 선택하는 것이 합리적이다. 이러한 원리를 계층적 변조 특성을 이용하여 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \min_{s \in Q_{16}} \|y - Hs\| &= \min_{s_1, s_2 \in Q_4} \left\| y - H \left( s_1 + \frac{1}{2} s_2 \right) \right\| \quad (7) \\ &= \min_{s_1, s_2 \in Q_4} \left\| \tilde{y} - \frac{1}{2} Hs_2 \right\| \end{aligned}$$

여기서

$$\tilde{y} = y - Hs_1 \quad (8)$$

이다. 즉 HP 심볼 벡터  $s_1$ 을 먼저 detection 한 후, (8)와 같이 수신 신호  $y$ 에서  $s_1$ 에 의한 간섭을 제거한 후, LP 심볼 벡터  $s_2$ 를 구할 수 있다. 그런데, HP 심볼 벡터는 에러에 대해서 강인하므로 ZF와 같은 간단한 검파기로 검출 한 후, (8)와 같이 HP 심볼 벡터에 의한 간섭을 제거하고, 에러에 약한 나머지 LP 심볼 벡터는 ML의 성능을 가지는 sphere decoder로 검출한다. 이와 같은 원리를 이용해서 제안하는 후보 리스트 발생 방법은 다음과 같다.

(i) 수신 신호  $y$ 를 ZF 한다.

$$\tilde{s} = H^{-1}y \quad (9)$$

(ii) (9)의 값을 기준으로 이웃하는 HP 심볼을 안테나 별로 구한다. 그림 3은  $E_b/N_0=5\text{dB}$ 에서  $s = (1+3i)/\sqrt{10}$ 를 전송했을 때, ZF 후,  $\tilde{s}$ 의 분포를 나타낸 것이다. 대부분  $(1+3i)/\sqrt{10}$  근처에 분포

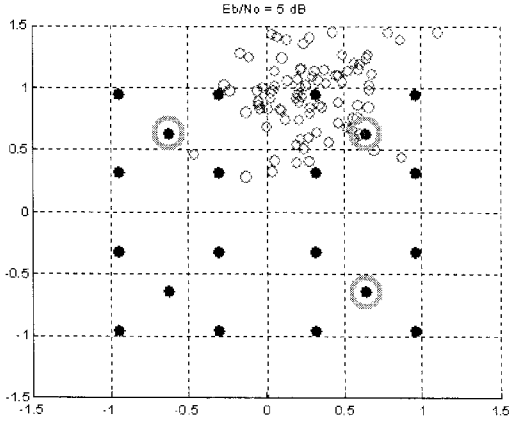


그림 3.  $\tilde{s}$ 의 분포와 이웃 HP 심볼의 예

하고 이웃하는 HP 심볼들은  $(2+2i)/\sqrt{10}, (2-2i)/\sqrt{10}, (-2+2i)/\sqrt{10}$  이다. 이와 같이 각 안테나마다 해당 안테나의 ZF 결과값을 기준으로 이웃하는 HP 심볼들을 구한다. 만약  $N_r = 4$ 인 경우는 안테나 별로 (9)의 값을 기준으로 가장 가까운 HP 심볼을 아래와 같이 구할 수 있다.

$$S = \begin{pmatrix} s_{1.1} & s_{1.2} & s_{1.3} \\ s_{2.1} & s_{2.2} & s_{2.3} \\ s_{3.1} & s_{3.2} & s_{3.3} \\ s_{4.1} & s_{4.2} & s_{4.3} \end{pmatrix} \quad (10)$$

(10)에서  $s_{i,j}$ 에서  $i$ 는 안테나 인덱스 이고  $j$ 는 인접하는 HP 심볼에 대한 인덱스이다.

(iii) 안테나 별로 하나의 HP 심볼을 선택하여 모든 가능한 HP심볼 벡터들을 만든다. (10)과 같이  $N_r = 4$ 인 경우 총  $3^4$ 개의 HP심볼 벡터를 만들 수 있다.

(iv) (iii)에서 발생한 각각의 HP 심볼 벡터에 대하여 (8)와 같이 간섭을 제거한다.

$$\tilde{y}_i = y - Hs_i, \quad i = 1, 2, \dots, A^{N_r} \quad (11)$$

(11)에서  $A$ 는 안테나 별로  $\tilde{s}$ 를 기준으로 이웃하는 심볼의 개수이다.

(v) sphere decoder<sup>[7]</sup>를 이용하여 (11)의  $y_i$ ,  $i = 1, 2, \dots, A^{N_r}$  대해서 LP 심볼 벡터를 구한다.

$$\min \| \tilde{y}_i - Hs_i \| \quad i = 1, 2, \dots, A^{N_r} \quad (12)$$

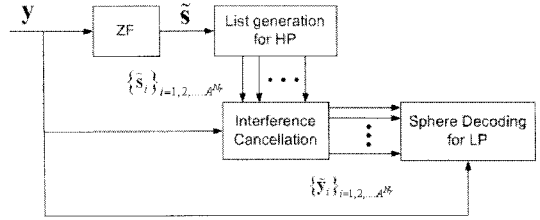


그림 4. 후보 심볼 발생 모식도

(vi) (iii)의 HP 심볼 벡터들과 해당하는 (v)의 LP 심볼 벡터들을 이용하여 최종 후보 리스트를 구한다. 이상의 과정에 대한 후보 리스트 발생 방법을 그림 4에 표시하였다. 결국 첫 번째 iteration에서 발생하는 후보 리스트의 개수는  $A^{N_r}$  이다.

### 3.2 후보 리스트 업데이트

두 번째 iteration 부터는 채널 디코더에서 피드백 되는 apriori 값을 사용할 수 있다. 본 논문에서는 이 apriori 값을 이용해서 후보 리스트를 다음과 같이 업데이트 시킨다. 먼저 apriori 값  $L_o$ 을 다음과 같이 hard mapping 시킨다.

$$Q(L_o) = \begin{cases} +1 & \text{for } L_o > 0 \\ -1 & \text{for } L_o < 0 \end{cases} \quad (13)$$

(13)을 기준으로 하여  $N$ 비트까지 flipping 시킨 벡터를 다음 iteration의 후보 리스트로 한다. 예를 들어, apriori 값을 hard mapping 시킨 후의 값을  $[+1, +1, +1]^T$ 라고 하면  $N=2$ 까지 flipping 시킨 후보 리스트는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} +1 & -1 & +1 & +1 & -1 & -1 & +1 \\ +1 & +1 & -1 & +1 & -1 & +1 & -1 \\ +1 & +1 & +1 & -1 & +1 & -1 & -1 \end{bmatrix}$$

여기서 2번째부터 3번째 칼럼까지는 1비트를 flipping 시킨 것이고, 4번째부터 6번째까지의 칼럼은 2비트를 flipping 시킨 것이다. 따라서 만약  $N$ 까지 flipping 시킨다면 총

$$1 + \sum_{i=1}^N \binom{M_c N_t}{i} \quad (14)$$

개의 후보 리스트가 발생한다. 여기서  $M_c$ 는 변조 지수이다.

#### IV. 전산 실험 결과

송수신 안테나가 각각 4개이고, 채널 인코더는  $R = 1/2$ 인 convolutional 인코더를 사용했다. 해당하는 generating polynomial 은

$$G = \left[ 1, \frac{1 + D^2}{1 + D + D^2} \right]$$

이다. 랜덤 인터리버를 사용했으며, 정보 신호열의 길이는 총 9216 비트이다. 채널 디코더는 Max log MAP 을 사용하였다. 채널은 flat 페이딩 채널 이고, 매 심볼 전송마다 독립적으로 변한다. 또한 두 번째 iteration 이후 hard mapping 된 apriori 값에 대한 flipping 상수는  $N = 2$ 로 설정하였다.

그림 5는 제안하는 후보 리스트 발생 방법을 사용한 것과 LSD를 비교한 것이다. 첫 번째 iteration에서는 BER 성능이 LSD보다 좋지 않으나, iteration이 진행 될수록 LSD의 성능과 거의 비슷하게 나옴을 볼 수 있다. 이와 같은 이유는 LSD의 경우 첫 번째 iteration에서 발생한 후보 리스트를 모든 iteration에서도 업데이트 시키지 않는 반면에 제안하는 방법은 apriori 값을 기준으로 후보 리스트를 매 iteration 마다 업데이트를 시키기 때문이다. 따라서 inner MIMO detector에서 보다 신뢰성이 있는 LLR 값이 발생하기 때문이다.

그림 6은 SNR 별로 수신 신호 벡터당 후보 리스트 발생의 시간을 비교한 것이다. 시간의 비교를 위한 환경으로 Window XP 환경에서 Intel Pentium D, 3Ghz CPU를 사용했으며 Matlab 7.1 을 통해 구현하였다. 그림에서 볼 수 있듯이, 11dB 이상에서는 발생 시간의 차이가 거의 없으나, 낮은 SNR 에서는 상당한 차이가 남을 볼 수 있다. 왜냐하면 낮은 SNR에서는 LSD는 구면 반경을 SNR의 반비례하여 크게 설정하기 때문에, 구면 반경 안에 있는 모든 심볼 벡터를 찾기 위해서는 상당한 시간이 소비되기 때문이다. 반면에 제안하는 방법은 16 QAM 변조 방식을 2개의 QPSK 심볼로 나누었기 때문에 심볼 탐색의 dimension이 반으로 줄었고, HP 심볼에 대해서는 간단한 ZF 수신기를 사용하므로 LSD에 비해서 거의 일정한 후보 리스트 발생 시간을 가진다.

표 1은 발생하는 후보 심볼의 개수를 비교한 것이다. LSD는 [2]에서 권고하는 바와 같이 MIMO capacity 을 달성하기 위해서 16QAM 4X4 시스템

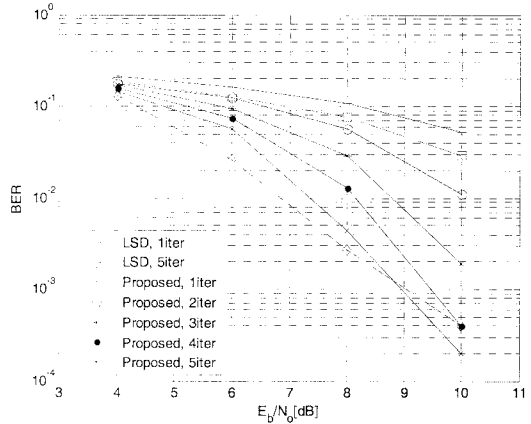


그림 5. BER 성능 비교

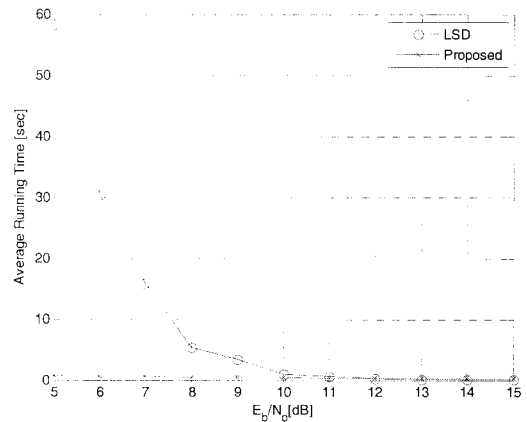


그림 6. 후보 리스트 발생 시간 비교

에서는 512개의 후보 리스트를 갖는다<sup>[2]</sup>. 반면에 제안하는 방식은 첫 번째 iteration에서는  $3^4 = 81$ 개의 후보 리스트를 가지고 2번째 이상에서는 (14)에 따라서 137개의 후보 리스트를 가진다. 따라서 제안하는 후보 리스트 발생 방식은 후보 리스트를 적게 가지므로 inner MIMO detector에서 LLR 값의 계산에서 탐색해야할 심볼의 개수가 적을 뿐만 아니라, 후보 리스트의 발생의 시간도 LSD에 비해서 상당히 빠름을 확인할 수 있다.

#### V. 결론

표 1. 후보 리스트 개수 비교

후보 리스트 갯수	1 iter	≥ 2 iter
LSD	512	512
Proposed	81	137

본 논문은 Iterative MIMO 수신기에서 QAM 변조의 계층적 특징을 이용하여 낮은 복잡도를 가지는 후보 리스트 발생 기법을 제시하였다. 첫 번째 iteration에서는 에러에 강한 HP 심볼 리스트를 간단한 ZF 수신기를 통해 발생하였고, LP 심볼 리스트에 대해서는 기존의 sphere decoder를 통해서 발생하였다. 두 번째 iteration 부터는 채널 디코더에서 피드백 되는 apriori값을 이용하여 후보 리스트를 업데이트 시켰다. 실험 결과 제안하는 방법은 iteration이 진행될수록 LSD의 BER 성능에 근접하며, 모든 SNR 영역에서 일정한 후보 리스트 발생 시간을 가졌으며, 특히 낮은 SNR 영역에서 LSD에 비해서 후보 리스트 발생 시간이 매우 줄었음을 확인할 수 있었다. 또한 후보 리스트의 발생의 개수 역시 LSD보다 적게 발생하므로 LLR 값을 계산하는데 필요한 탐색 심볼의 개수가 LSD보다 적음을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

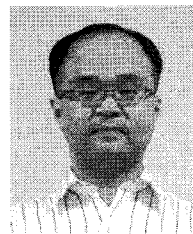
- [1] I.E.Telatar, "Capacity of multiple-antenna Gaussian channel", *European Trans. on Telecommunications*, vol.10, pp.585-595, Nov., 1999.
- [2] B. Hochwald and S. Ten Brink, "Achieving near-capacity on a multiple-antenna channel," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 51, no. 3, pp. 389 - 399, Mar. 2003.
- [3] H. Vikalo, B. Hassibi, and T. Kaiath, "Iterative Decoding for MIMO Channels Via Modified Sphere Decoding," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Vol. 3, No. 6, Nov. 2004.
- [4] Yvo. L. de Jong and Tricia J. Willink "Iterative Tree Search Detection for MIMO Wireless Systems," *IEEE Trans. Commun.* vol. 53, No. 6, Jun. 2005.
- [5] D.L.Milliner and J. R. Barry, "A Lattice Reduction Aided Soft Detector for Multiple Input Multiple Output Channels," *IEEE GLOBECOM*, Nov. 27 2006-Dec. 1 2006.
- [6] Tao Cui and Chintha Tellambura, "Approximate ML Detection for MIMO Systems Using Multistage Sphere Decoding", *Asilomar Conference*, vol 1. pp. 1054-1056, Nov.2004
- [7] E. Viterbo and J. Boutros, "A universal lattice code decoder for fading channels," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 45, no. 5 pp. 1639-1642, July 1999.

전 은 성 (Eun Sung Jeon) 정회원



2005년 2월 연세대학교 전기전자공학부 (학사)  
 2007년 2월 연세대학교 전기전자공학과 (석사)  
 2007년 3월~현재 연세대학교 전기전자공학과 박사과정  
 <관심분야> Sphere decoder, MIMO iterative detection, OFDM based relaying system, W-CDMA.

양 장 훈 (Jang Hoon Yang) 정회원

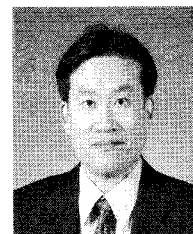


1996년 2월 연세대학교 전과공학과 (학사)  
 2001년 U.S.C. Dept of Electrical Engineering (석사)  
 2001년 U.S.C. Dept of Electrical Engineering (박사)  
 2001년~2006년 삼성전자 책임

연구원

2006년~현재 연세대학교 공과대학 전기전자공학부 연구 교수  
 <관심분야> CDMA, OFDMA, MIMO, Relay, Cross layer optimization, 간섭 채널, 정보이론, neural signal processing

김 동 구 (Dong Ku Kim) 종신회원



1983년 2월 한국항공대학교 통신공학과  
 1985년 U.S.C. Dept. of Electrical Engineering 석사  
 1992년 U.S.C. Dept. of Electrical Engineering 박사  
 1994년~현재 연세대학교 전기

전자공학과 교수

<관심분야> CDMA 이동통신, 다중접속 기술, 변조 및 채널 부호화 기술, 스케줄링/MAC기술, 순방향 링크 빔성형 기술 및 MIMO기술, UWB, Binary CDMA