

Seysen 알고리즘을 이용한 Lattice Reduction-aided 다중 안테나 검출기법

준회원 안 홍 선*, 마나르 모하이센*, 종신회원 장 경 희*

Lattice Reduction Aided MIMO Detection using Seysen's Algorithm

HongSun An*, Manar Mohaisen* Associate Members, KyungHi Chang* Lifelong Member

요 약

본 논문에서는 LRA (Lattice Reduction-Aided) 검출 기법에서 격자 감소를 위하여 주로 사용되어 오던 LLL(Lenstra-Lenstra-Lovasz)을 대신하여 SA (Seysen Algorithm)를 이용함으로써, 복잡도의 감소와 함께 성능 향상을 이루었다. 이러한 성능향상에도 불구하고 여전히 존재하는 SA-LRA 검출 기법과 ML 검출과의 성능 차이를 줄이기 위하여 list of candidates 기법을 SA-LRA 검출 기법에 적용하였다. List of candidates 기법은 송신 신호 벡터가 될 수 있는 후보들의 리스트를 구성하여, 이 중 최소의 유클리디안 거리 (Euclidean Distance)를 가지는 후보를 송신 신호 벡터로 추정하는 기법이다. 모의실험 결과는 이 기법을 통하여 SA-LRA 검출 기법이 ML 검출과 유사한 성능을 가질 수 있음을 보이고 또한, SA를 통하여 채널 행렬이 보다 더 직교성을 가지게 되는 것을 보인다.

Key Words : MIMO Detection, Lattice Reduction, LRA Detection, LLL Algorithm, Seysen's Algorithm, List of Candidates

ABSTRACT

In this paper, we use SA (Seysen's Algorithm) instead of LLL (Lenstra-Lenstra-Lovasz) to perform LRA (Lattice Reduction-Aided) detection. By using SA, the complexity of lattice reduction is reduced and the detection performance is improved. Although the performance is improved using SA, there still exists a gap in the performance between SA-LRA and ML detection. To reduce the performance difference, we apply list of candidates scheme to SA-LRA. The list of candidates scheme finds a list of candidates. Then, the candidate with the smallest squared Euclidean distance is considered as the estimate of the transmitted signal. Simulation results show that the SA-LRA detection leads to quasi-ML performance. Moreover, the efficiency of the SA is shown to highly improve the channel matrix conditionality.

I. 서 론

공간 다중화 MIMO(multiple-input multiple-output) 시스템은 추가적인 주파수 자원이나 송신 전력의 할당 없이도 시스템 throughput을 선형적으로 증가

시킬 수 있는 특성으로 인해 고속 전송 및 높은 신뢰도를 필요로 하는 통신 시스템에서 주목 받고 있는 기술이다^[1]. 공간 다중화 MIMO 시스템의 채널 용량은 주로 전송된 신호를 복원하기 위하여 수신단에서 사용하는 검출 기법에 의존한다^[2]. ML(Maximum

* 이 논문은 2008년도 정부(과학기술부)의 재원으로 한국과학 재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. R01-2008-000-20333-0).

* 인하대학교 정보통신대학원 이동통신연구실(ahs3179@gmail.com, lemanar@hotmail.com, khchang@inha.ac.kr)

논문번호 : KICS2009-02-044, 접수일자 : 2009년 2월 3일, 최종논문접수일자 : 2009년 6월 9일

likelihood) 검출은 가장 이상적인 성능을 얻을 수 있는 MIMO 검출 기법으로 알려져 있으나, 송신 안테나 수와 변조 크기가 높아짐에 따라 연산 복잡도가 지수적으로 증가하기 때문에 현실적으로 적용하기에 많은 어려움이 있다. ML 기법의 단점을 보완하고자 낮은 복잡도와 높은 성능을 보이는 LRA 검출기법이 제안 되었다³⁾. LRA 검출기법은 polynomial 한 복잡도를 가지고 높은 성능을 나타내지만, 여전히 ML 검출과 성능 차이는 존재하며, 이러한 차이를 줄이기 위한 노력은 계속 되어 왔다⁴⁻⁶⁾.

LRA 검출기법에서 격자 감소를 위하여 LLL (Len-stra-Lenstra-Lovasz)⁷⁾ 알고리즘이 독점적으로 사용 되어 왔으나, 최근 LLL보다 낮은 복잡도와 보다 좋은 성능을 가지는 SA기⁸⁻⁹⁾ MIMO 시스템을 위한 LRA 검출기법에서 LLL의 대안으로 제안 되었다¹⁰⁾.

본 논문은 SA를 적용함으로써 향상된 SA-LRA 검출기법의 성능을 보이고, SA-LRA 검출기법과 ML 검출의 성능 차이를 줄이기 위하여 list of candidates를 구성한 후, 최소 유클리디안 거리를 가지는 candidate를 선택하는 방법을 SA-LRA 기법에 적용함으로써, ML검출과 근사한 성능을 가지는 것을 보인다.

본 논문의 II장에서는 시스템 모델을 간략하게 설명하고, III장에서 SA와 list of candidates 구성 과정 및 LR-aided 검출 기법에 대하여 설명한다. IV장에서는 III장에서 설명한 LR-aided 검출기법의 모의실험 결과를 살펴본 후, V장에서 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같은 N_T 개의 송신 안테나와 $N_R \geq N_T$ 개의 수신안테나를 구성하는 공간 다중화 MIMO 시스템을 고려하며, 송신 신호 벡터와 수신 신호 벡터 사이의 관계는 다음과 같다.

$$\mathbf{y} = \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} \tag{1}$$

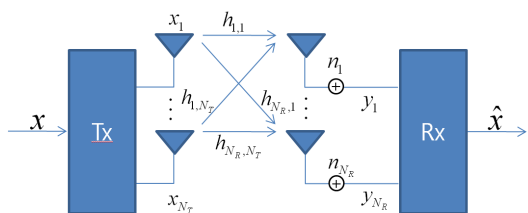


그림 1. N_T 송신안테나, N_R 수신안테나로 구성된 MIMO 시스템 모델

여기에서 \mathbf{y} 는 복소수 값을 가지는 $N_R \times 1$ 수신 신호 벡터, \mathbf{x} 는 $N_T \times 1$ 송신 신호 벡터, \mathbf{n} 은 σ_n^2 의 분산을 가진 $N_R \times 1$ 가우시안 잡음 벡터, \mathbf{H} 는 $N_R \times N_T$ 로 구성된 채널 행렬을 나타낸다.

채널 행렬 \mathbf{H} 는 flat fading 환경을 가정한다. 즉, 하나의 프레임 동안 채널 행렬 \mathbf{H} 는 일정하며, 매 프레임마다 독립적으로 변화한다. 또한, 본 논문에서 완벽한 채널 추정을 가정한다.

수식 (1)을 실수 모델로 다루기 위하여 시스템 모델을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\mathbf{H} = \begin{bmatrix} \Re(\mathbf{H}) & -\Im(\mathbf{H}) \\ \Im(\mathbf{H}) & \Re(\mathbf{H}) \end{bmatrix} \tag{2}$$

$$\mathbf{y} = \begin{bmatrix} \Re(\mathbf{y}) \\ \Im(\mathbf{y}) \end{bmatrix}, \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \Re(\mathbf{x}) \\ \Im(\mathbf{x}) \end{bmatrix}, \mathbf{n} = \begin{bmatrix} \Re(\mathbf{n}) \\ \Im(\mathbf{n}) \end{bmatrix} \tag{3}$$

여기서, $\mathbf{H} \in \mathbb{R}^{2N_R \times 2N_T}$, $\mathbf{y}, \mathbf{n} \in \mathbb{R}^{2N_R}$, $\mathbf{x} \in \mathbb{R}^{2N_T}$ 이다.

III. Lattice Reduction-aided 검출기법

3.1 Seysen 알고리즘

격자(lattice) $L(\mathbf{H})$ 을 기저 벡터(basis vector) $\mathbf{h}_1, \mathbf{h}_2, \dots, \mathbf{h}_{2N_T}$ 로 정의 한다면, $L(\mathbf{H})^* = (L(\mathbf{H})^{-1})^T$ 의 관계를 가지는 격자 $L(\mathbf{H})$ 의 듀얼격자 $L(\mathbf{H})^*$ 는 $\mathbf{h}_1^*, \mathbf{h}_2^*, \dots, \mathbf{h}_{2N_T}^*$ 의 기저 벡터로 정의 된다. 여기서, \mathbf{h}_i 는 채널 행렬 \mathbf{H} 의 i -번째 열을 의미하며, 각 격자의 기저 벡터는 다음의 특성을 만족한다.

$$\left. \begin{aligned} (\mathbf{h}_i, \mathbf{h}_j^*) &= 1, & \text{for } i = j \\ (\mathbf{h}_i, \mathbf{h}_j^*) &= 0, & \text{otherwise} \end{aligned} \right\} \tag{4}$$

Seysen 알고리즘은 이러한 격자 $L(\mathbf{H})$ 와 듀얼격자 $L(\mathbf{H})^*$ 를 동시에 줄이기 위한 알고리즘이다. A 와 A^* 를 각각 $L(\mathbf{H})$ 와 $L^*(\mathbf{H})$ 의 이차형식 (quadratic form)이라고 하면, $\mathbf{A} = \mathbf{H}^T \mathbf{H}$ 의 관계 즉, 식(5)와 같이 \mathbf{A} 의 요소 a_{ij} 는 기저 벡터 \mathbf{h}_i 와 \mathbf{h}_j 의 내적과 같다.

$$\left. \begin{aligned} A &= [a_{ij}] = [(\mathbf{h}_i, \mathbf{h}_j)] \\ A^* &= [a_{ij}^*] = [(\mathbf{h}_i^*, \mathbf{h}_j^*)], \end{aligned} \right\} \tag{5}$$

for $1 \leq i, j \leq 2N_T$

행렬 격자 $L(\mathbf{H})$ 의 기저를 채널행렬 \mathbf{H} 로 정의하면,

L(H)의 다른 기저 $\tilde{\mathbf{H}}$ 는 다음과 같이 표현 된다.

$$\tilde{\mathbf{H}} = \mathbf{H}\mathbf{T} \quad (6)$$

여기서, \mathbf{T} 는 unimodular 특성을 가진 행렬 즉, 행렬식 (determinant)이 ± 1 인 $2N_T \times 2N_T$ 정수 행렬 이다. 식 (5)로부터 $\tilde{\mathbf{H}}$ 의 이차 형식은 다음과 같다.

$$\tilde{\mathbf{A}} = \mathbf{T}^T \mathbf{A} \mathbf{T} \quad (7)$$

이차형식 \mathbf{A} 에 대하여 Seysen measure는 다음과 같이 정의한다.

$$S(\mathbf{\Omega}) = \sum_{i=1}^{2N_T} a_{i,j} a_{i,i}^* = \sum_{i=1}^{2N_T} \|\mathbf{h}_i\|^2 \|\mathbf{h}_i^*\|^2 \quad (8)$$

Seysen measure값은 채널 행렬 \mathbf{H} 의 각 열(column)이 직교(orthogonal)인 경우에 최소값을 가지게 되고 그 값은 $2N_T$ 와 같다. 즉, Seysen measure값이 최소의 값이 되었다면 기저는 직교에 가까운 상태로 바뀌었다는 것을 의미하며, 이는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$S(\mathbf{A}) \leq S(\mathbf{T}^T \mathbf{A} \mathbf{T}) \quad \text{for all } \mathbf{T} \quad (9)$$

이 조건에서 기저 \mathbf{H} 는 S-reduced되었다고 한다. 주어진 기저 \mathbf{H} 동안 최적의 변환행렬 \mathbf{T} 를 구하기 위하여 변환 행렬 \mathbf{T} 를 다음과 같이 정의한다.

$$\begin{aligned} \mathbf{T}_{i,j}^{\lambda_{ij}} &= \mathbf{I}_{2N_T} + \lambda_{ij} \mathbf{U}_{ij} & i \neq j, \lambda \in \mathbb{Q} \\ \mathbf{U}_{ij} &= [u] & u = \begin{cases} 1 & \text{only } (i, j) \text{ pair} \\ 0 & \text{otherwise} \end{cases} \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 \mathbf{I}_{2N_T} 는 $2N_T$ -차원의 단위행렬을 의미하며, \mathbf{U}_{ij} 는 하나의 요소만 0이 아닌 행렬, $\mathbf{T}_{ij}^{\lambda_{ij}}$ 는 단위행렬에 0이 아닌 요소 하나만을 추가로 가진 행렬이 되고, λ_{ij} 는 다음과 같은 값을 가진다.

$$\lambda_{ij} = \text{round} \left\{ \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{a_{i,j}^*}{a_{j,j}^*} - \frac{a_{i,j}}{a_{i,i}} \right) \right\} \quad (11)$$

여기서, λ_{ij} 는 선택된 (i,j)에서 최소의 Seysen measure를 가지게 한다⁹⁾.

식(10)에서 정의한 $\mathbf{T}_{ij}^{\lambda_{ij}}$ 를 \mathbf{H} 의 오른쪽에 곱함으로써

$$\mathbf{T} = \text{eye}(2N_T)$$

$$S(\mathbf{A}) = \sum_{i=1}^{2N_T} a_{i,j} a_{i,i}^*$$

While $\lambda_{ij} \neq 0$ for all (i, j)

Choose (i, j) for $i \neq j$ that minimize Δ

Calculate

$$\lambda_{ij} = \text{round} \left\{ \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{a_{i,j}^*}{a_{j,j}^*} - \frac{a_{i,j}}{a_{i,i}} \right) \right\}$$

$$\Delta(i, j, \lambda) = S\left(\left(\mathbf{T}_{ij}^{\lambda_{ij}}\right)^T \mathbf{A} \mathbf{T}_{ij}^{\lambda_{ij}}\right) - S(\mathbf{A})$$

Update

$$\mathbf{A}' = \left(\left(\mathbf{T}_{ij}^{\lambda_{ij}} \right)^T \mathbf{A} \mathbf{T}_{ij}^{\lambda_{ij}} \right)$$

$$\mathbf{A}^* = \left(\left(\mathbf{T}_{ij}^{\lambda_{ij}} \right)^{-1} \mathbf{A}^* \left(\mathbf{T}_{ij}^{\lambda_{ij}-1} \right)^T \right)$$

Calculate only for chose (i, j)

$$\lambda_{ij} = \text{round} \left\{ \frac{1}{2} \cdot \left(\frac{a_{i,j}^*}{a_{j,j}^*} - \frac{a_{i,j}}{a_{i,i}} \right) \right\}$$

$$\mathbf{T} = \mathbf{T} \times \mathbf{T}_{ij}^{\lambda_{ij}}$$

End

Return transformation matrix \mathbf{T}

그림 2. Seysen Greedy 알고리즘

써, $\mathbf{b}'_j = \mathbf{b}_j + \lambda_{ij} \mathbf{b}_i$ 와 같은 격자 감소가 행하여진다. $\mathbf{T}_{ij}^{\lambda_{ij}}$ 변환 행렬을 구하는 과정은 복잡한 과정이 아니므로, 이를 이용한 연속적인 격자 감소 과정을 고려할 수 있고, 더 이상 Seysen measure 값을 줄일 수 없을 때, 즉, 다음과 같은 조건을 만족할 때,

$$S(\mathbf{A}) \leq S\left(\left(\mathbf{T}_{ij}^{\lambda_{ij}}\right)^T \mathbf{A} \mathbf{T}_{ij}^{\lambda_{ij}}\right), \quad \begin{aligned} & \text{for } 1 \leq i, j \leq 2N_T \\ & \text{for } \lambda_{ij} \in \mathbb{Q} \end{aligned} \quad (12)$$

이차 형식이 S2-reduced되었다고 한다. 이 과정 동안의 모든 $\mathbf{T}_{ij}^{\lambda_{ij}}$ 를 곱함으로써, 구하고자 하는 변환 행렬 \mathbf{T} 가 구해진다.

$$\mathbf{T} = \prod_k \mathbf{T}_{ij}^{\lambda_{ij}}, \quad \text{for } 1 \leq k < \infty \quad (13)$$

지금까지 설명한 SA에서 먼저 계산될 (i,j)를 선택하는 것이 SA의 전체 복잡도에 상당한 영향을 미칠 것이라는 것은 자명하다. 따라서 최적의 순서쌍 (i,j)를 선택하는 방법은 매우 중요하며, SA는 이 순서쌍을 선택하는 방법에 따라 Lazy 알고리즘과 Greedy 알고리즘으로 나뉘어 진다.

Lazy 알고리즘은 $\lambda_{ij} \neq 0$ 인 임의의 순서쌍을 선택하는 것이고, Greedy는 Seysen measure 값을 가장 많이 줄일 수 있는 순서쌍을 먼저 선택하는 것이다. 즉,

$$\Delta(i, j, \lambda) = S\left((\mathbf{T}_{ij}^{\lambda_j})^T \mathbf{A} \mathbf{T}_{ij}^{\lambda_j}\right) - S(\mathbf{A}) \quad (14)$$

를 최소화 시키는 순서쌍 (i,j)를 먼저 선택하는 것이다. 위의 식(14)의 Δ 는 항상 $\Delta \leq 0$ 조건을 만족한다.

Seysen Greedy 알고리즘의 실행은 그림 2에 나타내었다.

3.2 Lattice Reduction-aided 검출기법

LRA 검출 기법의 과정은 그림 3에 나타내고 있다. 주어진 채널 행렬 \mathbf{H} 의 기저를 LLL이나 SA와 같은 격자 감소 기법을 이용하여 줄이는 것은 격자를 변화시키지 않기 때문에 $\tilde{\mathbf{H}} = \mathbf{H}\mathbf{T}$ 로 표현 되는 격자는 보다 더 좋은 특성, 즉, well-conditioned 특성을 가진다^[11]. 이와 같은 채널 행렬 $\tilde{\mathbf{H}}$ 의 특성으로 인해 복잡도는 낮지만, 잡음 증폭 문제로 심각한 성능 저하를 가지는 ZF이나 MMSE와 같은 선형 검출기법, 또는 SIC와 같은 비선형 검출 기법을 사용 하여도 신뢰할 수 있는 송신 벡터가 검출 가능하다.

그림 3에서와 같이 \mathbf{H} 와 $\tilde{\mathbf{H}}$ 가 같은 격자를 나타내기 위해서 식(6)을 만족시키는 동시에 입력 신호가 정수 공간 \square 에 포함되어야 한다. \mathbf{T}^{-1} 는 정수 요소만을 가지고 $\mathbf{T}^{-1} \square^{2N_r} \in \square^{2N_r}$ 와 같이 표현 되므로 양자화(quantization) 과정을 통하여 $\mathbf{z} = \mathbf{T}^{-1} \mathbf{x}$ 를 정수 공간 \square 에 포함 시킬 수 있다.

$$\hat{\mathbf{x}} = \mathbf{T} \cdot \square \{ \hat{\mathbf{z}} \} \quad (15)$$

여기서, $\square \{ \}$ 는 가장 가까운 정수를 나타낸다.

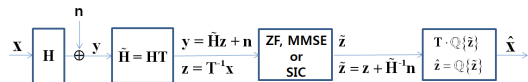


그림 3. LRA 검출기법

일반적으로 사용되는 M-QAM 변조에서, 전송 신호 벡터는 집합 $\Omega = \{\pm 1/2, \pm 3/2, \dots, \pm(\sqrt{M}-1)/2\}$ 에 포함되고, 정수 집합의 평행이동을 통하여 표현할 수 있다. 다음 식은 4QAM의 경우를 나타낸다.

$$\begin{aligned} \mathbf{x} &= \bar{\mathbf{x}} + \left[\frac{1}{2}, \dots, \frac{1}{2} \right]^T & \bar{\mathbf{x}} &\in \square^{2N_r} \\ \mathbf{z} &= \mathbf{T}^{-1} \mathbf{x} = \bar{\mathbf{z}} + \mathbf{T}^{-1} \left[\frac{1}{2}, \dots, \frac{1}{2} \right]^T & \bar{\mathbf{z}} &\in \square^{2N_r} \end{aligned} \quad (16)$$

식 (16)으로부터, 다음의 관계식이 성립되고,

$$\begin{aligned} \tilde{\mathbf{z}} &= \tilde{\mathbf{H}}^{-1} \mathbf{H} \mathbf{x} + \tilde{\mathbf{H}}^{-1} \mathbf{n} = \mathbf{z} + \tilde{\mathbf{H}}^{-1} \mathbf{n} \\ &= \left(\bar{\mathbf{z}} + \mathbf{T}^{-1} \left[\frac{1}{2}, \dots, \frac{1}{2} \right]^T \right) + \tilde{\mathbf{H}}^{-1} \mathbf{n} \\ \hat{\mathbf{z}} &= \bar{\mathbf{z}} + \left[\frac{1}{2}, \dots, \frac{1}{2} \right]^T \end{aligned} \quad (17)$$

그러면, 다음과 같은 송신 신호 추정 값을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{\mathbf{x}} &= \mathbf{T} \cdot \hat{\mathbf{z}} = \mathbf{T} \cdot \square \left\{ \bar{\mathbf{z}} \right\} + \mathbf{T}^{-1} \left[\frac{1}{2}, \dots, \frac{1}{2} \right]^T \\ &= \mathbf{T} \cdot \square \left\{ \tilde{\mathbf{z}} - \mathbf{T}^{-1} \left[\frac{1}{2}, \dots, \frac{1}{2} \right]^T \right\} + \mathbf{T}^{-1} \left[\frac{1}{2}, \dots, \frac{1}{2} \right]^T \end{aligned} \quad (18)$$

3.3 List of Candidates 기법이 적용된 SA-LRA 검출

SA-LRA 검출 기법을 통하여 낮은 복잡도와 성능 향상을 이끌어 냈지만, 여전히 ML과의 성능차이는 존재한다. 기존의 LLL을 사용한 LRA 검출 기법에서 이러한 성능 차이를 줄이기 위한 방법으로 list of candidates을 구성하여 그 중 최소의 유클리디안 거리를 가지는 후보를 송신 벡터로 추정하는 방법이 제안되었다^[12]. 본 논문에서는 이 기법을 LLL-LRA 검출기법이 아닌 SA-LRA에 적용하여 BER 성능을 ML 검출에 보다 더 근접하게 향상 시킨다.

4QAM 변조의 경우 송신되는 신호는 오직 $\pm 1/2$ 값을 가질 수 있다. $2 \times 2N_r$ 개의 후보를 얻기 위하여 각 k 번째 송신 신호를 $1/2, -1/2$ 로 고정시킨 후,

다음의 행렬과 수신 신호를 이용하여 LRA 검출을 시도한다.

$$\mathbf{H}^{(k)} = \mathbf{H} \text{ removed } k\text{-th column}$$

$$\mathbf{y}^{(k)} = \mathbf{y} - \mathbf{h}_k \cdot \frac{1}{2} \quad (19)$$

식 (19)에서 정의한 채널행렬과 수신 신호에 SA 기반의 LRA 검출기법을 적용하여 송신신호 벡터를 추정한 후, 식 (20)의 \mathbf{E} 행렬을 추정된 송신신호에 곱한다. 이를 통하여 k 번째 행의 요소가 0인 $2N_T \times 1$ 의 송신신호 추정 벡터를 얻을 수 있다. 이 벡터의 k 번째 행에 $1/2, -1/2$ 을 차례로 고정하여 하나의 candidate를 얻을 수 있고, 이러한 방식을 $2N_T$ 번 반복 수행함으로써 전체의 list of candidates를 얻는다. $2N_T \times (2N_T - 1)$ 행렬 \mathbf{E} 는 $(2N_T - 1) \times (2N_T - 1)$ 단위 행렬의 k 번째 행에 0으로 구성된 벡터를 넣은 것과 같고, 이는 다음과 같이 정의된다.

$$\mathbf{E}^{(k)} = \begin{cases} 1 & i < k \text{ and } j = i \\ 1 & i > k \text{ and } j = i - 1 \\ 0 & \text{else} \end{cases} \quad (20)$$

이 과정을 SA-LRA 검출기법에 반복적으로 수행하여 $2N_T$ 개의 candidates가 구성되면 각 candidate의 유클리디안 거리를 계산하여 최소의 값을 가지는 candidate을 송신 신호 벡터로 선택한다. 그 결과, list of candidates 기법이 적용된 SA-LRA 검출 기법은 ML 검출에 근접한 BER 성능을 가진다.

IV. 모의실험 결과

본 논문에서는 SA-LRA 선형 검출 기법과 list of candidates 방법을 적용하였을 때의 SA-LRA 검출 기법의 성능을 검증한다. 이를 위하여 4×4 MIMO 시스템에서 4QAM 변조기법을 사용하였고, LRA 검출기법은 SA 격자 감소 기법과 ZF 및 확장된 채널을 사용한 MMSE 선형 검출 기법^[13] 사용하여 모의 실험을 하였다.

그림 4는 SA를 적용함으로써 채널의 직교성이 증가함을 보여준다. 3장에서 설명했던 것처럼, Seysen measure가 작을수록 채널은 보다 더 직교하는 성질을 가지게 된다. 그림 4에서 보여지는 것처럼 격자 감소 후의 Seysen measure는 확연하게 줄어들

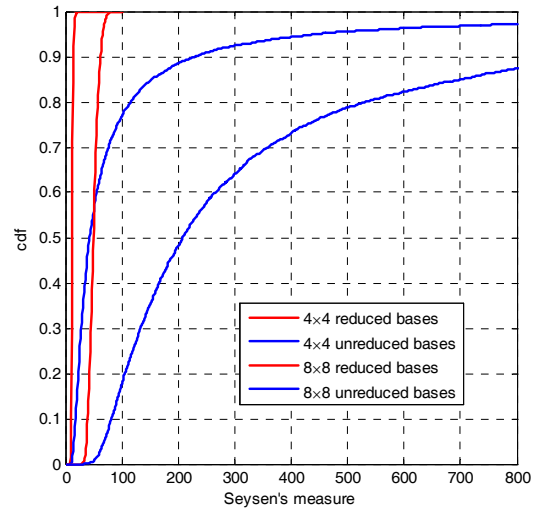


그림 4. SA를 이용한 격자 감소 후의 Seysen measure 변화

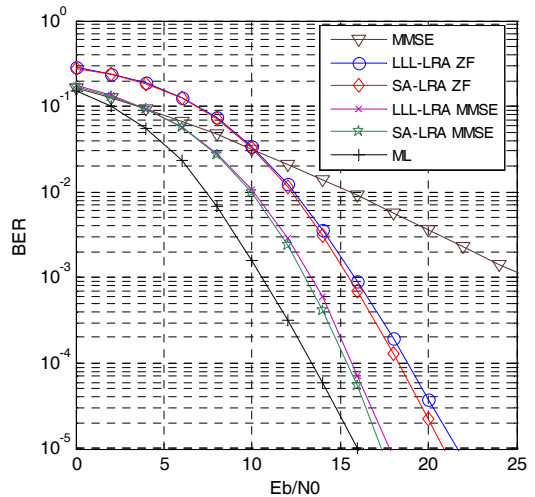


그림 5. SA-LRA 기법 및 LLL-LRA 기법에 선형 검출 기법을 적용한 경우의 성능비교

을 알 수 있다.

그림 5는 SA를 사용한 LRA 검출 기법과 LLL 기반의 LRA 검출기법의 성능 차이를 보여준다. ZF 검출 기법과 결합한 LRA 검출기법의 경우, target BER 10^{-5} 에서 SA를 사용한 LRA 검출 기법이 LLL을 사용한 경우에 비하여 약 0.72dB의 성능 향상을 보인다. 또한, MMSE 검출 기법과 결합하였을 경우는 target BER 10^{-5} 에서 SA-LRA 검출기법을 적용한 경우 LLL-LRA 검출 기법에 비하여 약 0.5dB의 이득을 얻는다. 그러나 아직 ML과의 성능차이가 존재하며, 이를 줄이기 위해 LLL 알고리즘이 아닌 SA를 이용한 LRA MMSE 검출 기법에 list of candidates 기법을

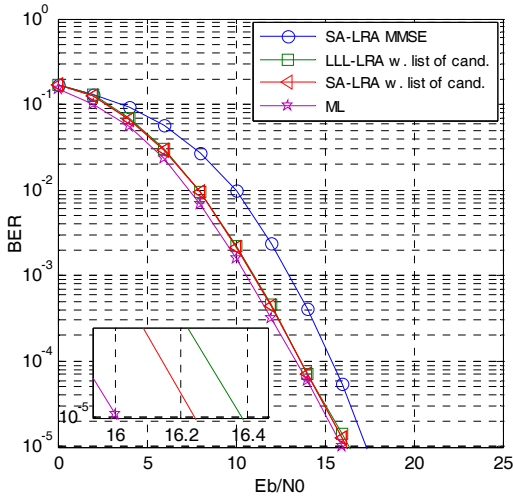


그림 6. SA-LRA 검출 기법과 LLL-LRA 검출 기법에 list of candidates 기법을 적용한 경우의 성능 비교

적용하였다. 그 결과 얻어진 BER 성능을 그림 6에 나타냈으며, 선형 검출 기법과의 결합에서 얻어진 것만큼의 이득은 아니지만, 확대된 결과에서 볼 수 있듯이 SA-LRA 검출 기법의 경우 LLL-LRA 검출 기법의 경우보다 target BER 10^{-5} 에서 약 0.17dB의 이득을 얻을 수 있다. 이는 target BER 10^{-3} 에서 LRA MMSE 검출 기법만 사용했을 경우 보다, 약 2.5dB 정도의 성능이 향상되었고, ML과는 약 0.5dB의 BER 성능 차이를 보인다.

V. 결론

본 논문에서는 그 동안 LRA 검출 기법에서 격자 감소를 위해 독립적으로 사용되어 오던 LLL 알고리즘을 대신하여 보다 낮은 복잡도로 높은 성능을 나타내는 SA를 LRA 검출 기법에 적용하였다. 추가적인 LRA 검출기법의 성능향상을 위하여, SA-LRA 검출 과정에 list of candidates 기법을 결합하였고, 그 결과, 이 알고리즘의 BER 성능이 ML 검출에 근접함을 모의실험을 통하여 입증하였다.

참고 문헌

[1] S. Haykin and M. Moher, *Modern Wireless Communications*. Pearson Prentice Hall, New Jersey, 2005.
 [2] K. Su, *Efficient Maximum Likelihood Detection for Communication over Multiple Input Multiple*

Output Channels. Doctoral Dissertation, University of Cambridge, 2005.
 [3] H. Yao and G. W. Wornell, "Lattice Reduction Aided Detectors for MIMO Communication Systems," in *IEEE Proc. Globecom*, November 2002.
 [4] C. Windpassinger and R. F. H. Fischer, "Low Complexity Near-Maximum-Likelihood Detection and Pre-coding for MIMO Systems using Lattice Reduction," in *IEEE Proc. ITW*, March 2003.
 [5] D. Wubben, R. Bohnke, V. Kuhn, and K. D. Kammeyer, "MMSE-Based Lattice Reduction for Near-ML Detection of MIMO Systems," in *Proc. ITG Workshop on Smart Antennas*, March 2004.
 [6] T. D. Nguyen, T. Fujino, and X. N. Tran, "An Improved Quantization Scheme for Lattice-Reduction Aided MIMO Detection," in *IEEE Proc. ISIT*, October 2007.
 [7] A. K. Lenstra, H. W. Lenstra, and L. Lovasz, "Factoring Polynomials with Rational Coefficients," *Math. Ann*, vol.261, pp.515-534, 1982.
 [8] M. Seysen, "Simultaneous Reduction of A Lattice Basis and Its Reciprocal Basis," *Combinatorica*, vol.13, pp.363-376, 1993.
 [9] B. A. Lamacchia, *Basis Reduction Algorithms and Subset Sum Problems*. Master Thesis, MIT, 1991.
 [10] J. Niu and I-Tai Lu, "A New Lattice Reduction Based Receiver for MIMO Systems," in *Proc. of 41st CISS*, March 2007.
 [11] E. Agrell, T. Eriksson, A. Vardy, K. Zeger, "Closest point search in lattice," *IEEE Trans. on Information Theory*, vol.48, No.8, pp. 2201-2214, August 2002.
 [12] C. Windpassinger, L. H.-J. Lampe, R. F. H. Fischer, "From Lattice-Reduction-Aided Detection Towards Maximum-Likelihood Detection in MIMO Systems," in *Proc. Int. Conf. Wireless Opt. Commun.*, July 2003.
 [13] D. Wubben, R. Bohnke, V. Kuhn, and K. D. Kammeyer, "MMSE Extension of V-BLAST based on Sorted QR Decomposition," in *IEEE Proc. VTC-Fall*, October 2003.

안 흥 선 (HongSun An)

준회원



2007년 2월 인하대학교 전기공학과 공학사
2008년 2월~현재 인하대학교 정보통신대학원 석사과정
<관심분야> MIMO Detection, Interference management, 4G 이동통신

장 경 희 (KyungHi Chang)

중신회원



1985년 2월 연세대학교 전자공학과 공학사
1987년 2월 연세대학교 전자공학과 공학석사
1992년 8월 Texas A & M Univ., EE Dept. (Ph.D.)
1989년~1990년 삼성종합기술원

주임연구원

1992년~2003년 한국전자통신연구원, 이동통신연구소 무선전송방식연구팀장 (책임연구원)
2003년~현재 인하대학교 정보통신대학원 교수
<관심분야> 4세대 이동통신 및 3GPP LTE 무선전송방식, WMAN 및 DMB 시스템 무선전송기술, Cognitive Radio, Cross-layer Design, Cooperative Relaying System, RFID / USN Systems

마나르 모하이센 (Manar Mohaisen)

준회원



2001년 7월 Univ. of Gaza, Gaza, Palestine, 통신 및 제어 공학사
2005년 9월 School Polytechnic of Nice Univ., Sophia-Antipolis, France 공학석사
2006년 2월~현재 인하대학교

정보통신대학원 박사과정

2001년~2003년 Palestinian Telecommunication Company (JAWWAL)

<관심분야> MIMO Detection, Co-Channel Interference Cancellation, Dirty Paper Coding, Antenna Selection