

다중 사용자 MIMO 시스템을 위한 Seysen 알고리즘 기반 Lattice Reduction Aided 프리코딩

준회원 안 홍 선*, 정회원 마나르모하이센*, 종신회원 장 경 희*

Lattice Reduction Aided Precoding Based on Seysen's Algorithm for Multiuser MIMO Systems

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

요 약

LLL (Lenstra-Lenstra-Lovasz) 알고리즘은 보다 좋은 채널 행렬의 기저를 얻기 위하여 주로 사용되는 격자 감소 기법이다. 본 논문에서는 LRA (lattice reduction aided) 프리코딩 기법에서 채널 행렬의 기저 (basis) 벡터를 격자 감소시키기 위하여 LLL 알고리즘 대신 Seysen 알고리즘 (SA)을 사용하였으며, 기존의 선형 프리코딩 기법을 SA를 통하여 얻어진 변환된 채널 행렬에 적용하였다. SA를 통하여 LLL 알고리즘보다 높은 직교성을 가진 기저를 얻어낼 수 있으므로, SA 기반의 LRA 프리코딩 기법은 기존의 LLL 기반의 LRA 프리코딩 기법보다 우수한 성능을 가진다. 모의실험 결과를 통하여 LRA 프리코딩에서 격자 감소를 위하여 SA를 사용한 경우, LLL 알고리즘을 사용한 경우보다 target BER 10^{-5} 에서 0.5dB 정도의 BER 성능 이득이 얻어짐을 입증한다.

Key Words : Seysen's Algorithm, Lattice Reduction, Multiuser-MIMO, Precoding, LLL Algorithm

ABSTRACT

Lenstra-Lenstra-Lovasz (LLL) algorithm, which is one of the lattice reduction (LR) techniques, has been extensively used to obtain better bases of the channel matrix. In this paper, we jointly apply Seysen's lattice reduction Algorithm (SA), instead of LLL, with the conventional linear precoding algorithms. Since SA obtains more orthogonal lattice bases compared to those obtained by LLL, lattice reduction aided (LRA) precoding based on SA algorithm outperforms the LRA precoding with LLL. Simulation results demonstrate that a gain of 0.5dB at target BER of 10^{-5} is achieved when SA is used instead of LLL or the LR stage.

I. 서 론

MIMO (multiple-input multiple-output) 시스템은 추가적인 주파수 자원이나 송신 전력의 할당 없이도 시스템 throughput을 선형적으로 증가시킬 수 있는 특성으로 인해 고속 전송 및 높은 신뢰도를 필요로 하는 통신 시스템에서 주목 받고 있는 기술

이다^[1]. 채널 정보를 송신단에서 알고 있다면 다양한 프리코딩 기법들은 다중 사용자 MIMO 시스템의 성능 향상을 위하여 사용될 수 있다. DPC (Dirty paper coding) 기법은 다중 사용자 MIMO 하향링크 시스템에서 채널 용량을 최대로 만들 수 있는 전송 방식으로 잘 알려져 있다^[2]. 그러나 DPC는 우수한 성능에 비하여 복잡한 비선형 연산이 요구되

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

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

논문번호 : KICS2009-07-277, 접수일자 : 2009년 7월 6일, 최종논문접수일자 : 2009년 8월 26일

기 때문에 복잡도를 고려한 프리코딩 기법에 대한 연구가 최근 활발히 진행되고 있다.

ZF (zero-forcing)와 MMSE (minimum mean square error) 프리코딩은 대표적인 선형 프리코딩 기법들이다. 이러한 선형 프리코딩 기법들은 낮은 연산 복잡도를 가지지만, 채널 환경이 좋지 않은 경우 (ill-conditioned)에 잡음 증폭으로 인하여 낮은 BER 성능을 가진다.

격자 감소 기법 (LR-lattice reduction)은 채널 행렬의 기저 벡터를 보다 더 직교성을 가지도록 바꾸어 줌으로써 좋은 환경의 채널 행렬을 만들어 내는 기법이다^[3]. LRA (Lattice reduction aided) 프리코딩은 격자 감소 기법을 이용하여 채널 행렬의 기저 벡터들을 보다 직교적인 특성을 가지게 한 후, 낮은 복잡도를 가지는 기존의 선형 프리코딩 기법과 결합하는 기법이다. LRA 프리코딩 기법을 통하여 선형 프리코딩 기법에서 문제점으로 부각되던 좋지 않은 채널 환경에서 잡음 증폭으로 인한 BER 성능 저하 현상을 현저하게 줄임으로써, 상당한 BER 성능 향상을 얻는다.

LLL 알고리즘^[4]은 격자 감소기법 중 가장 널리 사용되며, LRA 프리코딩시에 선형 프리코딩이나 SIC (successive interference cancellation)등의 기법과 결합하여 보다 향상된 BER 성능을 이끌어낸다^{[5],[6]}.

본 논문에서는 LLL 알고리즘을 대신하여, Seysen's 알고리즘 (SA)을 선형 프리코딩 기법에 결합하였다. SA를 통하여 보다 높은 직교성을 가진 기저 벡터로 이루어진 채널 행렬을 구성한 후, 기존의 프리코딩 기법을 적용한다. 즉, 보다 좋은 환경 (well-conditioned)의 채널 행렬에서 선형 프리코딩 기법을 적용한다. SA는 LLL 알고리즘보다 높은 직교성을 가지는 기저벡터를 생성하기 때문에, SA 기반의 LRA 프리코딩은 LLL 기반의 LRA 프리코딩 보다 향상된 BER 성능을 가지며, 이를 모의실험 결과를 통하여 검증한다.

본 논문의 II장에서는 시스템 모델을 간략하게 보이고, III장에서 SA에 대하여 자세히 설명한다. IV장에서는 제안된 SA 기반의 LRA 프리코딩을 설명하며, V장에서 설명한 LR-aided 프리코딩의 모의 실험 결과를 살펴본 후, VI장에서 결론을 맺는다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 N_T 송신 안테나를 가진 기지국과 N_R 개의 단일 안테나를 가진 이동국과의 하향링크

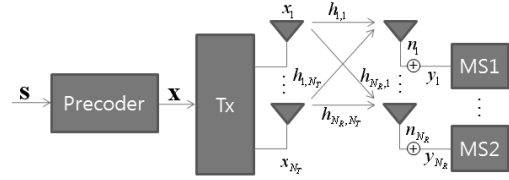


그림 1. MU-MIMO 시스템 모델

다중 사용자 MIMO 시스템(MU-MIMO) 통신 환경을 고려하며, 시스템 모델은 그림 1에 나타난다.

채널 행렬 H 는 flat fading 환경을 가정한다. 즉, 하나의 프레임 동안 $N_R \times N_T$ 채널 행렬 H 의 모든 값들은 일정하며, 매 프레임마다 독립적으로 변화한다. 또한, 본 논문에서 완벽한 채널 추정을 가정하며, 전체의 송신 전력은 N_T 로 제한된다. 벡터 x 를 $N_T \times 1$ 프리코딩된 신호라고 하면, 수신단에서 받은 $N_R \times 1$ 수신 신호벡터는 다음과 같은 행렬 형태로 표현된다.

$$y = Hx + n \quad (1)$$

여기에서, n 은 0의 평균값과 σ^2 의 분산값을 가지는 $N_R \times 1$ 가우시안 잡음 벡터, 벡터 x 는 데이터 벡터를 프리코딩하여 얻어지는 송신벡터이다.

격자 감소 기법을 실수 차원에서 적용하기 때문에, 식 (1)에서 복소 값을 가지는 시스템 모델을 식 (2), (3)과 같이 실수 값을 가지는 등가 모델로 표현한다.

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

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

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

III. Seysen 알고리즘

격자(lattice) $L(H)$ 을 기저 벡터(basis vector) $h_1, h_2, \dots, h_{2N_T}$ 로 정의 한다면, $L(H)^* = (L(H)^{-1})^T$ 의 관계를 가지는 격자 $L(H)$ 의 듀얼격자 $L(H)^*$ 는 $h_1^*, h_2^*, \dots, h_{2N_T}^*$ 의 기저 벡터로 정의 된다. 여기서, h_i 는 채널 행렬 H 의 i -번째 열을 의미하며, 각 격자의 기저 벡터는 다음의 특성을 만족한다.

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

Seysen 알고리즘은 이러한 격자 $L(\mathbf{H})$ 와 듀얼격자 $L(\mathbf{H}^*)$ 를 동시에 줄이기 위한 알고리즘이다^[7]. \mathbf{A} 와 \mathbf{A}^* 를 각각 $L(\mathbf{H})$ 와 $L^*(\mathbf{H})$ 의 이차형식 (quadratic form)이라고 하면, $\mathbf{A} = \mathbf{H}\mathbf{H}^T$ 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.

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

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

행렬 격자 $L(\mathbf{H})$ 의 기저를 채널행렬 \mathbf{H} 로 정의하면, $L(\mathbf{H})$ 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 행렬이다^[8]. 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.

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

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.

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

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 한다^[8].

식(10)에서 정의한 $\mathbf{T}_{ij}^{\lambda_{ij}}$ 를 \mathbf{H} 의 오른쪽에 곱함으로써, $\mathbf{h}'_j = \mathbf{h}_j + \lambda_{ij} \mathbf{h}_i$ 와 같은 격자 감소가 행하여진다. $\mathbf{T}_{ij}^{\lambda_{ij}}$ 변환 행렬을 구하는 과정은 복잡한 과정이 아니므로, 이를 이용한 연속적인 격자 감소 과정을 고려 할 수 있고, 더 이상 Seysen measure 값을 줄일 수 없을 때, 즉, 다음과 같은 조건을 만족할 때,

```

T = eye(2NT)
S(A) = ∑i=12NT ai,j ai,i*
While λij ≠ 0 for all (i, j)
  Choose (i, j) for i ≠ j that minimize Δ
  Calculate
    λij = round { 1/2 * (ai,j*/aj,j* - ai,j/ai,i) }
    Δ(i, j, λ) = S((Tijλ)T A Tijλ) - S(A)
  Update
    A' = ((Tijλij)T A Tijλij)
    A*' = ((Tijλij)-1 A* (Tijλij)T)
  Calculate only for chose (i, j)
    λij = round { 1/2 * (ai,j*/aj,j* - ai,j/ai,i) }
    T = T × Tijλij
End
Return transformation matrix T
    
```

그림 2. Seysen Greedy 알고리즘

$$S(\mathbf{A}) \leq S\left((\mathbf{T}_{ij}^{\lambda_j})^T \mathbf{A} \mathbf{T}_{ij}^{\lambda_j}\right), \quad \text{for } 1 \leq i, j \leq 2N_T \quad (12)$$

$$S(\mathbf{A}) \leq S\left((\mathbf{T}_{ij}^{\lambda_j})^T \mathbf{A} \mathbf{T}_{ij}^{\lambda_j}\right), \quad \text{for } \lambda_j \in \mathbb{Z}$$

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

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

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 이러한 순서쌍을 선택하는 방법에 따라 Lazy 알고리즘과 Greedy 알고리즘으로 구분된다.

Lazy 알고리즘은 $\lambda_{ij} \neq 0$ 인 임의의 순서쌍을 선택하여, 이차형식 A 행렬이 S-reduced될 때까지 반복적으로 SA 기법을 수행하는 것이다. 반면에, Greedy 알고리즘은 Seysen measure 값을 가장 많이 줄일 수 있는 순서쌍 (i, j)를 아래의 식 (14)와 같이 정의되는 Δ 값을 이용하여 선택하는 것이다.

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

여기서, Δ 값은 항상 Δ ≤ 0 조건을 만족하며, 최소의 Δ 값을 가지는 순서쌍 (i, j)는 Seysen measure 값을 가장 많이 줄인다. 이러한 Greedy 알고리즘은 Δ 값을 구하기 위한 연산량의 증가를 가져오지만, SA 기법을 통하여 변환 행렬 T를 구하기 위한 계산 반복수를 줄임으로써, 전체 SA 기법의 연산 복잡도를 감소시킨다^{[8],[9]}.

Seysen Greedy 알고리즘의 실행은 그림 2에 나타내었다.

IV. SA를 이용한 Lattice Reduction-aided 프리코딩

제안된 LRA 프리코딩의 기본적인 개념도는 그림 3에 나타낸다. 격자 감소기법을 기존의 프리코딩 기법에 적용하기 위하여, 식 (15)에서 표현되는바와 같이 전치 채널 행렬인 \mathbf{H}^T 에 격자 감소 기법을 적용한다.

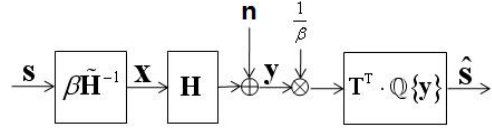


그림 3. LRA 프리코딩 기법

$$\tilde{\mathbf{H}} = \mathbf{T}^T \mathbf{H} \quad (15)$$

여기에서 $\tilde{\mathbf{H}}$ 는 채널 행렬 \mathbf{H} 보다 행 방향(row-wise)으로 보다 높은 직교성을 가지는 행렬이고, T는 식 (4)에서 언급한 unimodular 특성을 가지는 변환 행렬이다. 선형 프리코딩 기법은 채널 상태가 좋지 않은 경우, 잡음 증폭으로 인하여 요구되는 송신 전력이 증가한다. 이러한 잡음 증폭을 방지하기 위하여 LRA 프리코딩 기법은 채널 행렬 \mathbf{H} 가 아닌 격자 감소기법이 적용된 $\tilde{\mathbf{H}}$ 에 기존의 프리코딩 기법을 적용한다. 본 논문에서는 SA 격자 감소기법을 ZF (channel inversion)과 MMSE (regularized channel inversion) 프리코딩 기법에 적용하였다.

4.1 SA 격자 감소기법이 적용된 ZF 프리코딩

Channel inversion 기법은 전송될 신호를 채널 행렬의 의사 역행렬 (pseudo-inverse)을 이용하는 ZF 필터 방식의 대표적인 선형 프리코딩 기법이다. 프리코딩된 신호 벡터는 $\mathbf{x} = \mathbf{W}\mathbf{s}$ 와 같이 정의되며, 여기서 \mathbf{W} 는 다음 식 (16)과 같다.

$$\mathbf{W} = \beta \mathbf{H}^{-1}, \quad \text{where } \beta = \sqrt{\frac{N_T}{\text{trace}(\mathbf{H}^T \cdot \mathbf{H})}} \quad (16)$$

식 (16)에서, scaling 인자 β는 전체의 송신 전력을 정해진 값 N_T로 제한하기 위하여 사용된다. 수신단에서 scaling 인자 β로 수신 신호를 나누어 줌으로써, 신호를 복구 한다. ZF 프리코딩은 다중 사용자 MIMO 시스템의 경우에 사용자간 간섭을 완벽하게 제거할 수 있으나, 채널 환경이 좋지 않은 경우 심각한 잡음 증폭이 일어난다. 따라서 ZF 프리코딩을 적용하기 전에 격자 감소기법을 사용하여 채널 상태를 보다 높은 직교성을 가지게 한다면, scaling 인자 β 값의 큰 감소를 가지고 올 수 있고, 이는 결과적으로 잡음 증폭을 막아, 송신 전력을 감소시킨다. SA 알고리즘은 LLL 알고리즘에 비하여, 보다 높은 직교성을 가지는 기저 벡터를 생성하기 때문에, LLL 알고리즘이 적용된 LRA 프리코딩에

비하여 BER 성능의 증가를 얻어낸다.

4.2 SA 격자 감소기법이 적용된 MMSE 프리코딩

Regularized channel inversion 기법은 송신 전력을 줄이기 위하여 ZF 필터가 아닌 MMSE 필터 방식을 사용하여, 어느 정도의 사용자간 간섭을 허용하는 반면에, ZF에서 발생하는 잡음 증폭을 감소시킴으로써 전체적인 BER 성능을 최적화 하는 선형 프리코딩 기법이다. IV.1에서 설명한 것과 마찬가지로 보다 높은 BER 성능을 얻기 위하여 격자 감소 기법을 적용한다. 먼저, 확장된 채널 행렬을 이용한 MMSE 필터 사용을 위하여 채널 행렬을 다음과 같이 확장한다.

$$\mathbf{H}_{ex} = [\mathbf{H}_{real} \ \sigma \mathbf{I}_M] \quad (17)$$

위 식에서 σ 는 잡음의 표준편차이다. SA 알고리즘은 식 (18)에서처럼 $\tilde{\mathbf{H}}_{ex}$ 에 적용되어 보다 높은 직교성을 가지는 채널 행렬 $\tilde{\mathbf{H}}$ 를 구하며,

$$\tilde{\mathbf{H}} = \mathbf{T}^T \mathbf{H}_{ex} \quad (18)$$

식 (18)로부터 얻어진 $\tilde{\mathbf{H}}$ 채널 행렬에 선형 MMSE 프리코딩 기법이 적용된다. 이 과정은 다음과 같이 표현된다.

$$\left. \begin{aligned} \mathbf{x}' &= \beta \tilde{\mathbf{H}}^\dagger \mathbf{s}, \mathbf{x} = \mathbf{x}'(1:N/2) && \text{at Tx side} \\ \mathbf{y} &= \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{n} = \beta \mathbf{H}\tilde{\mathbf{H}}^\dagger \mathbf{T}^T \mathbf{s} \\ \hat{\mathbf{s}} &= \mathbf{T}^T \mathbf{Q}\{\mathbf{y}\} && \text{at Rx side,} \end{aligned} \right\} \quad (19)$$

여기서, $(\cdot)^\dagger$ 는 의사 역행렬을 의미하며, N 은 $2 \times N_T$ 와 같다. 또한, \mathbf{x} 는 \mathbf{x}' 의 $N/2$ 번째 까지의 요소로 구성된 벡터를 의미한다. 제안된 SA 격자 감소기법의 MMSE 프리코딩 기법은 송신 전력의 상당한 감소를 얻어 내며, 이를 통하여 BER 성능을 향상시킨다.

V. 모의실험 결과

본 장에서, 기존의 LLL 알고리즘과 본 논문에서 설명된 SA의 격자 감소 기법을 ZF, MMSE와 같은 선형 프리코딩 기법에 적용하여, 얻어지는 BER 성능을 비교·분석한다. 모의실험에서는 4개의 송신 안테나를 가진 단일 기지국과 1개의 안테나를 가진

4명의 다중 사용자가 통신하는 다중 사용자 MIMO 시스템을 구성한다. 전송되는 심볼은 4QAM 변조 기법을 사용하며, 기지국은 완벽한 채널 정보를 추정하였다고 가정한다.

그림 4는 원래의 채널 행렬, LLL 알고리즘과 SA 격자 감소기법 적용 후의 채널 행렬의 상태를 비교하기 위한 조건 수 (condition number)의 누적 분포 함수 (cdf: cumulative distributed function)이다. 조건 수는 다음과 같이 정의된다.

$$\kappa(\mathbf{H}) = \frac{\sigma_{\max}(\mathbf{H})}{\sigma_{\min}(\mathbf{H})} \geq 1 \quad (20)$$

여기서, $\sigma_{\max}(\mathbf{H})$ 와 $\sigma_{\min}(\mathbf{H})$ 는 채널 행렬 \mathbf{H} 의 고유치 (singular value) 중 최댓값과 최솟값을 의미한다. 조건 수가 1에 가까울수록 채널은 보다 높은 직교성을 가지며^[10], 이러한 채널 환경에 선형 프리코딩 기법을 적용할 경우, 일반적으로 선형 프리코딩 기법에서 발생하는 잡음 증폭을 상당량 감소시킨다. 반면에, 조건 수가 커질수록 채널 상태는 나빠지며, 이는 심각한 잡음 증폭 문제를 유발한다. 그림 4에서와 같이 SA 격자 감소 기법은 LLL 알고리즘 보다 높은 직교성을 가지는 채널 행렬을 구성할 수 있으며, 원래의 채널에 비하여 매우 좋은 환경의 채널을 구성한다. 이는 SA 격자 감소 기법을 통하여 LLL 알고리즘에 비하여 보다 높은 BER 성능 향상이 가능함을 입증한다.

그림 5는 같은 모의실험 환경에서 LLL 알고리즘이 적용된 LRA 프리코딩 기법과 SA가 적용된

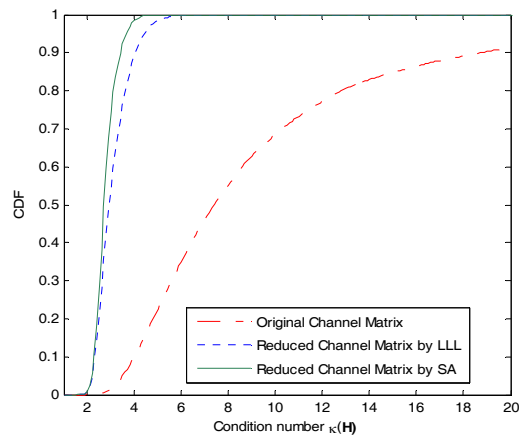


그림 4. SA와 LLL 격자감소 기법에 의하여 감소된 채널 행렬 condition number의 cdf

참고 문헌

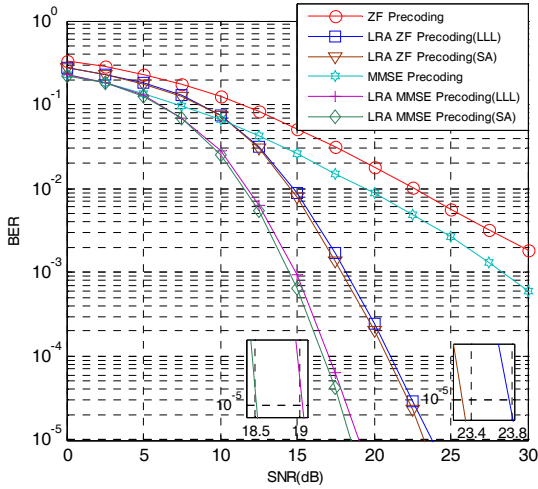


그림 5. LRA 선형 프리코딩 기법의 BER 성능 비교

LRA 프리코딩 기법의 BER 성능을 나타낸다. LLL 기반 LRA 프리코딩 기법의 경우, ZF 프리코딩 기법에 비하여 target BER 10^{-2} 에서 약 7.5dB의 BER 성능 이득을 얻으며, 본 논문에서 제안된 SA 기반 LRA 프리코딩 기법은 4×4 시스템에서 기존의 LLL 기반 LRA 프리코딩 기법의 약 92%에 해당하는 연산 복잡도를 가지고^[9], target BER 10^{-5} 에서 약 0.5dB의 성능을 향상시킨다.

VI. 결론

본 논문에서는, 다중 사용자 MIMO 시스템에서 SA 격자 감소기법을 적용한 LRA 프리코딩을 제안하였다. LLL 알고리즘과 본 논문에서 설명한 SA는 기존의 선형 프리코딩 기법에 적용되어 LRA 선형 프리코딩 기법을 구성한다. 이러한 LRA 선형 프리코딩 기법은 target BER 10^{-2} 에서 기존의 ZF, MMSE와 같은 선형 프리코딩 기법에 비하여 각각 7.5dB, 8dB 정도의 상당한 BER 성능 향상을 얻는다. 또한, SA 격자 감소기법은 LLL 알고리즘에 비하여 보다 높은 직교성을 가지는 채널 행렬을 생성하기 때문에, LLL 알고리즘을 대신하여 LRA 프리코딩 기법에 적용한 경우, BER 성능을 더욱 향상시킨다. 결과적으로, SA 기반의 LRA 프리코딩은 LLL 기반의 LRA 프리코딩보다 적은 연산량으로 높은 성능 향상을 보장하며, 다중 사용자 MIMO 시스템 환경에서 LRA 프리코딩 적용시에 격자 감소기법으로서 SA는 효율적인 알고리즘임을 알 수 있다.

- [1] S. Haykin and M. Moher, *Modern Wireless Communications*. Pearson Prentice Hall, New Jersey, 2005.
- [2] U. Erez and S. ten Brink, "A close to capacity dirty paper coding scheme," *IEEE Trans. on Inform. Theory*, Vol. 51, pp. 3417-3432, Oct. 2005.
- [3] H. Yao and G. W. Wornell, "Lattice-Reduction-Aided Detectors for MIMO Communication Systems," in *Proc. IEEE Globecom*, pp. 424-428, November 2002.
- [4] A. K. Lenstra, H. W. Lenstra, and L. Lovasz, "Factoring Polynomials with Rational Coefficients," *Math. Ann*, Vol. 261, pp. 515-534, 1982.
- [5] C. Windpassinger and R. F. H. Fischer, "Low Complexity Near-Maximum-Likelihood Detection and Pre-coding for MIMO Systems using Lattice Reduction," in *Proc. IEEE ITW*, pp. 345-348, March 2003.
- [6] C. Windpassinger, R. F. H. Fischer and J. B. Huber, "Lattice-Reduction-Aided Broadcast Precoding," *IEEE Trans. on Commun.*, Vol. 52, pp. 2057-2060, Dec. 2004.
- [7] M. Seysen, "Simultaneous Reduction of A Lattice Basis and Its Reciprocal Basis," *Combinatorica*, Vol. 13, pp. 363-376, 1993.
- [8] B. A. Lamacchia, *Basis Reduction Algorithms and Subset Sum Problems*. Master Thesis, MIT, 1991.
- [9] J. Niu and I-Tai Lu, "A New Lattice Reduction Based Receiver for MIMO Systems," in *Proc. IEEE of 41st CISS*, pp. 499-504, March 2007.
- [10] D. Wubben, R. Bohnke, V. Kuhn, and K. D. Kammeyer, "MMSE-Based Lattice Reduction for Near-ML Detection of MIMO systems," *Proc ITG Workshop on Smart Antennas*, March. 2004.

안 흥 선 (HongSun An)

준회원



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

장 경 희 (KyungHi Chang)

중신회원



1985년 2월 연세대학교 전자공
학과 (공학사)
1987년 2월 연세대학교 전자공
학과 (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 무선전
송방식, WMAN 및 DMB 시스템 무선전송기술,
Cognitive Radio, Cross-layer Design, Cooperative
Relaying System, RFID / USN Systems

모하이센 마나르 (Manar Mohaisen)

정회원



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

정보통신대학원 박사과정

2001년~2003년 Palestinian Telecommunication
Company (JAWWAL)

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