

순차적 간섭 제거 기반 신호 검출 기법의 성능분석

양유식* · 김재권**

Performance Analysis of SIC-based Signal Detection Methods in MIMO Systems

Yu-Sik Yang*, Jae-Kwon Kim**

요 약

본 논문에서는 다중입출력 (MIMO : multiple-input multiple-output) 시스템에서 순차적 간섭 제거 기법 (SIC : successive interference cancellation) 신호 검출 기법의 성능을 분석한다. 고려되는 신호검출 기법들은 SIC 기법과 LR-SIC 기법이며, 이러한 신호 검출 기법들의 블록오류확률 (BLER; block error ratio) 성능을 나타내는 식을 유도 하고, 모의실험 결과를 통해 유도된 식과 성공적으로 일치함을 확인한다.

ABSTRACT

In this paper, we analyze the error performance of SIC-based signal detection methods in MIMO systems. Considered detection methods are SIC signal detection and LR-SIC signal detection. We derive BLER performance of the methods and the performance is confirmed by computer simulations.

Key Words : Successive Interference Cancellation (SIC), Multiple-Input Multiple-Output (MIMO), Lattice Reduction, LLL Algorithm, Block Error Rate (BLER)

1. 서 론

최근 다중 안테나를 이용한 데이터 전송이 주목을 받고 있다. 다중안테나를 이용해 전송속도를 향상시키기 위해서는 공간다중화 방식을 사용해야 하며, 이 때 간단한 송신부와는 달리 수신부에서 성공적인 신호검출이 어려운 문제가 된다 [1]. 최근 표준화가 완료된 WiMAX2 시스템에서는 2개, 4개, 8개 송신안테나를 사용하는 공간다중화 방식이 채택 되었다 [2].

공간다중화 MIMO 시스템을 위해 다양한 신호

검출기법들이 제안되었으며, SIC 신호검출기법은 선형검출기법 [3] 보다는 성능이 우수하지만 최적 신호검출기법인 maximum likelihood (ML) 기법보다는 성능이 열화된다 [4]. 복잡도 면에서는 ML 기법보다 매우 간단하며, 선형검출기법보다는 다소 복잡하다.

SIC 기반 신호검출기법의 성능은 검출순서를 통해 향상될 수 있으나 개선의 정도가 일반적으로 제한적이다 [5]. 이러한 SIC 신호검출기법의 성능열화는 lattice reduction (LR) 기법을 사용해 어느 정도 극복이 가능하다[6]. LR 기법은 SIC 기법뿐

* 연세대학교 원주캠퍼스 컴퓨터정보통신공학부 학사과정

** 교신저자 : 연세대학교 원주캠퍼스 컴퓨터정보통신공학부 교수 (jaekwon@yonsei.ac.kr)

접수일자 : 2011년 07월 30일, 수정일자 : 2011년 08월 16일, 심사완료일자 : 2011년 08월 29일

만 아니라 선형검출기법과도 결합이 가능하지만 본 논문에서는 SIC 기법에 집중한다. LR을 수행하기에 앞서 일반적으로는 실수시스템으로 전환하는 과정이 필요했으나 [7]에서는 복소수 시스템에서도 LR이 가능하며 실수시스템으로 변환했을 때와 성능이 거의 동일함을 보였다. LR의 근본적인 성능이득 및 다양한 신호검출기법과의 결합에 대해 [8]에서 잘 요약하고 있다.

본 논문에서는 SIC 신호검출기법과 LR을 적용한 SIC 신호검출기법의 채널이득행렬이 주어졌을 때 BLER 성능을 수식으로 유도한다. 먼저 기존 SIC 신호검출기법의 BLER 성능을 유도한 다음, LR을 적용했을 경우에도 유사한 형태로 BLER 성능을 나타낼 수 있음을 보인다. 다양한 송수신 안테나를 갖는 시스템에 대해 모의실험을 수행하여, 유도한 수식이 실제 성능과 잘 부합한다는 것을 보인다. 본 논문에서 유도한 고정된 채널에 대한 성능은 추후 신호검출기법을 개발하기 위해 효과적으로 사용할 수 있다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 그림 1과 같은 $N_R \times N_T$ MIMO 시스템을 고려한다. Flat Rayleigh fading 채널, Gaussian 잡음, 16-QAM 성상도를 가정한다.

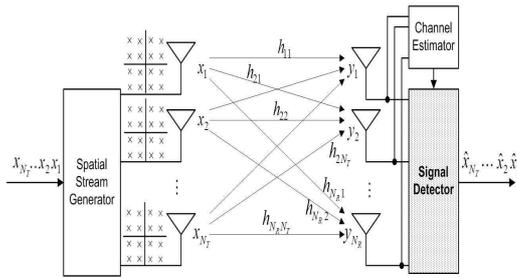


그림 1. 공간 다중화 MIMO 시스템의 블록도
Fig. 1. Block diagram of spatially multiplexed MIMO systems

그림 1로 표현되는 MIMO 시스템의 송수신 관계는 식 (1)과 같이 표현 된다.

$$\mathbf{y}_c = \mathbf{H}_c \mathbf{x}_c + \mathbf{z}_c$$

$$= \mathbf{h}_1 x_1 + \mathbf{h}_2 x_2 + \dots + \mathbf{h}_{N_T} x_{N_T} + \mathbf{z}_c \quad (1)$$

여기서 \mathbf{H}_c 는 $N_R \times N_T$ 채널 이득 행렬이고, \mathbf{x}_c 는 송신 신호 벡터, \mathbf{y}_c 는 수신 신호 벡터를 의미한다. \mathbf{z}_c 는 Gaussian 잡음 벡터이다. 아래첨자 c 는 복소수 시스템을 강조하기 위해 사용하였다. 용이한 설명을 위해 본 논문에서는 아래 식 (2)의 2×2 complex MIMO 시스템을 가정한다.

$$\begin{bmatrix} y_{1R} + jy_{1I} \\ y_{2R} + jy_{2I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11R} + jh_{11I} & h_{12R} + jh_{12I} \\ h_{21R} + jh_{21I} & h_{22R} + jh_{22I} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1R} + jx_{1I} \\ x_{2R} + jx_{2I} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} z_{1R} + jz_{1I} \\ z_{2R} + jz_{2I} \end{bmatrix} \quad (2)$$

신호 y_{jR} 과 y_{jI} 는 j 번째 수신 안테나에서 수신된 신호의 실수부와 허수부를 나타낸다. 즉 $y_{1R} = \text{Re}\{y_i\}$ 이며, $y_{1I} = \text{Im}\{y_i\}$ 이다. 유사한 표현이 송신 신호 \mathbf{x}_c , 채널 \mathbf{H}_c , 잡음 \mathbf{z}_c 에도 적용된다.

식 (2)의 complex 시스템을 실수와 허수부분을 분리해 식 (3)과 같이 등가 형태의 4×4 실수 시스템으로 변환 할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} y_{1R} \\ y_{2R} \\ y_{1I} \\ y_{2I} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11R} & h_{12R} & -h_{11I} & -h_{12I} \\ h_{21R} & h_{22R} & -h_{21I} & -h_{22I} \\ h_{11I} & h_{12I} & h_{11R} & h_{12R} \\ h_{21I} & h_{22I} & h_{21R} & h_{22R} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_{1R} \\ x_{2R} \\ x_{1I} \\ x_{2I} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} z_{1R} \\ z_{2R} \\ z_{1I} \\ z_{2I} \end{bmatrix} \quad (3)$$

III. SIC 기반 BLER 성능 분석

본 절에서는 먼저 가상적인 real 단일입출력 (SISO : single-input single-output) 시스템의 성능을 분석하고, 이를 기반으로 MIMO SIC 신호 검

출 기법의 성능을 분석한 후, 최종적으로 lattice reduction (LR)을 도입한 SIC 신호 검출 기법의 성능을 분석한다.

3.1. Real SISO 시스템의 오류 성능

복소수 16-QAM 신호를 등가형태의 실수 신호로 변환하면, 실수신호의 성상도는 $\Omega = \{-3, -1, 1, 3\}$ 이며, 그림 2와 같다.

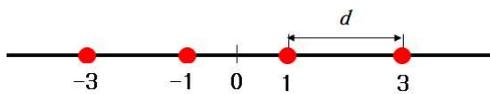


그림 2. 실수 시스템의 성상도
Fig. 2. Constellation of real system

그림 2에 표현한 실수 신호의 평균 전력 \bar{S} 과 최소거리 d 와의 관계는 아래와 같다.

$$\bar{S} = \frac{1}{4} \sum_{i=1}^4 S_i = \frac{5}{4} d^2 \quad (4)$$

여기서 $E_i = |\Omega(i)|^2$, $i = 1, 2, 3, 4$ 이며, $\Omega(i)$ 는 Ω 의 i 번째 원소를 의미한다. 본 절에서는 아래 식으로 표현되는 가상적인 실수SISO 시스템을 고려한다.

$$y = hx + z \quad (5)$$

여기서 z 는 평균값이 0이고, 분산이 σ^2 인 additive white Gaussian noise (AWGN)이다. 위의 식 (5) 시스템의 등가 시스템은 아래와 같이 주어진다.

$$\tilde{y} = \frac{y}{h} = x + \frac{z}{h} = x + \tilde{z} \quad (6)$$

위 식 (6)은 잡음의 전력이 $\sigma^2/|h|^2$ 인 AWGN 채널이라 여길 수 있다.

그림 2의 성상도를 갖는 신호 검출의 오류 확률을 다음과 같이 두 가지 경우로 구분하여 구한다.

경우 1] $x = 1$ 또는 -1 경우
신호를 올바르게 검출 할 확률은 잡음의 수학적

인 확률 분포 특성을 이용하면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} p &= P_c(x = 1 \text{ or } -1) = P\left(-\frac{d}{2} < z < \frac{d}{2}\right) \\ &= \int_{-d/2}^{d/2} \frac{1}{\sqrt{2\pi\sigma^2/|h|^2}} e^{-\frac{z^2}{2\sigma^2/|h|^2}} dz \\ &= \int_{-d/2}^{d/2} \frac{|h|}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{|h|^2 z^2}{2\sigma^2}} dz \\ &= 2 \int_0^{d/2} \frac{|h|}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{|h|^2 z^2}{2\sigma^2}} dz \\ &= 2 \int_0^{\frac{|h|d}{2\sqrt{2}\sigma}} \frac{1}{\sqrt{\pi}} e^{-\alpha^2} d\alpha \\ &= \text{erf}\left(\frac{|h|d}{2\sqrt{2}\sigma}\right) \\ &= \text{erf}\left(\sqrt{\frac{|h|^2 \bar{S}}{10\sigma^2}}\right) \end{aligned} \quad (7)$$

경우 2] $x = 2$ 또는 -2 경우
올바르게 검출 할 확률은 경우 1과 유사하게 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} r &= P_c(x = 2 \text{ or } -2) = P\left(-\frac{d}{2} < z < \infty\right) \\ &= \int_{-d/2}^{\infty} \frac{|h|}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{|h|^2 z^2}{2\sigma^2}} dz \\ &= \int_{-d/2}^0 \frac{|h|}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{|h|^2 z^2}{2\sigma^2}} dz \\ &\quad + \int_0^{\infty} \frac{|h|}{\sqrt{2\pi\sigma^2}} e^{-\frac{|h|^2 z^2}{2\sigma^2}} dz \\ &= 0.5p + 0.5 \end{aligned} \quad (8)$$

두 경우를 종합하여 신호를 올바르게 검출 할 확률은 식 (7) 및 (8)을 이용해 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 P_c &= \sum_{i=1}^4 P_c(x = \Omega(i))P(\Omega(i)) \\
 &= 2\left(\frac{1}{4}p\right) + 2\left(\frac{1}{4}\left(\frac{1}{2}p + \frac{1}{2}\right)\right) \\
 &= \frac{3}{4}p + \frac{1}{4} \tag{9}
 \end{aligned}$$

위의 식 (9)로 부터 심볼 오류 확률은 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 P_e &= 1 - P_c = \frac{3(1-p)}{4} \\
 &= \frac{3}{4} \left[1 - \operatorname{erf}\left(\sqrt{\frac{|h|^2 \bar{S}}{10\sigma^2}}\right) \right] \\
 &= \frac{3}{4} \operatorname{erfc}\left(\sqrt{\frac{|h|^2 \bar{S}}{10\sigma^2}}\right) \\
 &= \frac{3}{8} Q\left(\sqrt{\frac{|h|^2 \bar{S}}{20\sigma^2}}\right) \tag{10}
 \end{aligned}$$

3.2. MIMO SIC 검출 기법의 BLER 성능

4×4 실수 MIMO 시스템에서 SIC 검출 방법의 이론적인 Block Error Ratio (BLER)를 분석할 때, 채널 \mathbf{H} 의 QR 분해 $\mathbf{H} = \mathbf{QR}$ 를 적용한다. 직교 행렬 \mathbf{Q} 의 특성에 의해 채널 \mathbf{H} 의 condition number는 식 (11)과 같다.

$$\begin{aligned}
 k_2(\mathbf{H}) &= \|\mathbf{H}\| \|\mathbf{H}^{-1}\| \\
 &= \|\mathbf{QR}\| \|\mathbf{R}^{-1}\mathbf{Q}^H\| \\
 &= \|\mathbf{R}\| \|\mathbf{R}^{-1}\| = k_2(\mathbf{R}) \tag{11}
 \end{aligned}$$

또한 직교 행렬 \mathbf{Q} 를 이용하여 식 (3)의 양변에 \mathbf{Q}^H 을 곱하면 식 (12) 및 (13)과 같이 표현 할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \tilde{\mathbf{y}} &= \mathbf{Q}^H \mathbf{y} \\
 &= \mathbf{Q}^H \mathbf{QRx} + \mathbf{Q}^H \mathbf{z} = \mathbf{Rx} + \tilde{\mathbf{z}} \tag{12}
 \end{aligned}$$

$$\begin{bmatrix} \tilde{y}_1 \\ \tilde{y}_2 \\ \tilde{y}_3 \\ \tilde{y}_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_{11} & r_{12} & r_{13} & r_{14} \\ 0 & r_{22} & r_{23} & r_{24} \\ 0 & 0 & r_{33} & r_{34} \\ 0 & 0 & 0 & r_{44} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \tilde{z}_1 \\ \tilde{z}_2 \\ \tilde{z}_3 \\ \tilde{z}_4 \end{bmatrix} \tag{13}$$

SIC 신호 검출 방법은 표 1.의 절차로 상 삼각 행렬 \mathbf{R} 을 사용해 신호를 검출 한다.

표 1. SIC 슬라이싱 절차
Table 1. SIC slicing procedure

```

for i = 4 : -1 : 1
     $\hat{x}_i = \operatorname{slicer}\left[\left(\frac{\tilde{y}_i}{r_{ii}} - \sum_{j=i+1}^4 r_{ij} \hat{x}_j\right) / r_{ii}\right]$ 
end
    
```

SIC 신호 검출에서는 가장 먼저 다음의 간계를 이용한다.

$$\tilde{y}_4 = r_{44}x_4 + \tilde{z}_4 \tag{14}$$

식 (14)는 간섭 성분이 없는 식 (5)의 SISO 시스템과 수학적으로 등가 형태가 되므로, 3.1절의 식 (10)으로 표현되는 오류 확률로 x_4 를 검출한다고 할 수 있다. 만약 신호 x_4 를 옳게 검출 했다면, 아래와 같이 신호 \tilde{y}_3 로부터 간섭성분을 제거 할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \tilde{y}_3 &= \tilde{y}_3 - r_{34}x_4 \\
 &= r_{33}x_3 + \tilde{z}_3 \tag{15}
 \end{aligned}$$

간섭 성분이 제거된 식 (15)또한 SISO 시스템이 된다. 이러한 과정을 x_1 을 검출 할 때 까지 반복한다면, 각 간섭 성분이 제거된 수신 신호는 모두 SISO 시스템이 되고, 각 신호 $x_i, i = 1, \dots, 4$ 를 올바르게 검출 할 확률은 식 (10)을 사용하여 다음과 같이 표현 된다.

$$\begin{aligned}
 P_{e, x_i} &= 1 - P_{e, x_i} \\
 &= 1 - \frac{3}{8} Q\left(\sqrt{\frac{|r_{ii}|^2 \bar{S}}{20\sigma^2}}\right) \quad (16)
 \end{aligned}$$

BLER 성능 관점에서는 모든 수신 신호가 올바르게 검출될 경우를 제외한 나머지 모든 경우를 오류로 판별한다. 만약 x_4 의 검출에 오류가 발생했다면, 그 이후 심볼들 x_3, x_2, x_1 의 검출 오류 여부에 관계없이 항상 블록은 오류가 발생한 것으로 판별된다. 따라서 채널 이득 행렬 \mathbf{H} 가 주어졌을 때, 4×4 실수 MIMO 시스템에서 수학적인 BLER는 다음과 같이 표현된다.

$$BLER = 1 - \prod_{i=1}^4 \left\{ 1 - \frac{3}{8} Q\left(\sqrt{\frac{|r_{ii}|^2 \bar{S}}{20\sigma^2}}\right) \right\} \quad (17)$$

식 (17)로부터 OSIC 신호검출기법의 BLER는 채널이득행렬의 QR 분해에 의해 얻어지는 상삼각행렬의 대각성분에 의해 결정됨을 확인할 수 있다.

3.3. MIMO LR-SIC 검출 기법의 BLER 성능

LR 방법은 채널 행렬의 condition number를 줄이는 방법으로 $\tilde{\mathbf{H}} = \mathbf{H}\mathbf{T}$ 와 같이 \mathbf{H} 와 동일한 크기를 갖고, 좋은 basis를 갖는 $\tilde{\mathbf{H}}$ 를 찾는 것이다. 여기서 행렬 \mathbf{T} 는 모든 성분이 정수이며, determinant가 항상 ± 1 인 unimodular 행렬이다. LR을 위해서는 LLL (Lenstra-Lenstra-Lovasz) 알고리즘이 널리 사용된다. 식 (3)에 LLL 알고리즘을 적용하면 다음과 같으며, LLL에 의해 얻어지는 새로운 상삼각행렬 \mathbf{R}_L 의 condition number는 \mathbf{R} 보다 작거나 같게 된다.

$$\begin{aligned}
 \mathbf{y} &= \mathbf{H}\mathbf{x} + \mathbf{z} = \mathbf{Q}\mathbf{R}\mathbf{T}\mathbf{x} + \mathbf{z} \\
 &= \mathbf{Q}_L \mathbf{R}_L \mathbf{T}_L^{-1} \mathbf{x} + \mathbf{z} \quad (18)
 \end{aligned}$$

식 (18)의 양변에 \mathbf{Q}_L^H 를 곱하면 식 (19) 및

(20)과 같이 표현 할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \tilde{\mathbf{y}} &= \mathbf{Q}_L^H \mathbf{y} = \mathbf{Q}_L^H \mathbf{Q}_L \mathbf{R}_L \mathbf{T}_L^{-1} \mathbf{x} + \mathbf{Q}_L^H \mathbf{z} \\
 &= \mathbf{R}_L \tilde{\mathbf{x}} + \tilde{\mathbf{z}} \quad (19)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \begin{bmatrix} \tilde{y}_1 \\ \tilde{y}_2 \\ \tilde{y}_3 \\ \tilde{y}_4 \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} r_{11,L} & r_{12,L} & r_{13,L} & r_{14,L} \\ 0 & r_{22,L} & r_{23,L} & r_{24,L} \\ 0 & 0 & r_{33,L} & r_{34,L} \\ 0 & 0 & 0 & r_{44,L} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \tilde{x}_1 \\ \tilde{x}_2 \\ \tilde{x}_3 \\ \tilde{x}_4 \end{bmatrix} \\
 &+ \begin{bmatrix} \tilde{z}_1 \\ \tilde{z}_2 \\ \tilde{z}_3 \\ \tilde{z}_4 \end{bmatrix} \quad (20)
 \end{aligned}$$

LR 후 생성되는 unimodular 행렬 \mathbf{T}_L^{-1} 가 아래와 같다고 가정해보자.

$$\mathbf{T}_L^{-1} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -3 & -2 \\ -3 & -2 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \quad (21)$$

위의 unimodular 행렬 \mathbf{T}_L^{-1} 에 의해 결정되는 새로운 신호 $\tilde{\mathbf{x}}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 \tilde{\mathbf{x}} &= \mathbf{T}_L^{-1} \mathbf{x} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -3 & -2 \\ -3 & -2 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \\
 &= \begin{bmatrix} -3x_3 - 2x_4 \\ -3x_1 - 2x_2 \\ x_1 + x_2 \\ x_3 + x_4 \end{bmatrix} \quad (22)
 \end{aligned}$$

식 (22)에서 알 수 있는 바와 같이 신호 \mathbf{x} 와 $\tilde{\mathbf{x}}$ 의 성상도는 서로 다르게 된다. 송신 신호 x_i , $i = 1, 2, 3, 4$ 의 성상도는 최소거리가 2인 $\{-3, -1, 1, 3\}$ 로 동일하지만, 해당하는 행 벡터의 원소 절댓값이 최소값 2를 갖는 \tilde{x}_1 과 \tilde{x}_2 의 성상도는

{-15, -11, -9, -7, ..., 7, 9, 11, 15}이며, 최소값이 1인 \tilde{x}_3 과 \tilde{x}_4 의 정상도는 {-6, -4, -2, ..., 2, 4, 6}으로 서로 다르다. 식 (22) 및 새로운 정상도를 관찰하면, 대부분의 경우가 최소거리 값 2를 갖는다는 것을 확인할 수 있다. 행렬 \mathbf{T}_L^{-1} 의 행 벡터의 요소들이 매우 높은 확률로 ± 1 을 포함하고, 이 때 최소거리는 2가 되며, 최소값이 ± 1 이 아닌 경우에도 정상점간의 거리가 대부분 2이다. 또한, 식 (4)를 이용하면 심볼 오류 확률을 최소거리 d 의 함수로 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$P_e = \frac{3}{8} Q\left(\sqrt{\frac{|h|^2 \bar{S}}{20\sigma^2}}\right) = \frac{3}{8} Q\left(\sqrt{\frac{|h|^2 d^2}{16\sigma^2}}\right) \quad (23)$$

그 결과 LR-SIC 기법에서 수학적인 BLER은 상 삼각행렬 \mathbf{R}_L 의 성분들의 함수로 다음과 같이 표현한다.

$$BLER = 1 - \prod_{i=1}^4 \left\{ 1 - \frac{3}{8} Q\left(\sqrt{\frac{|r_{ii,L}|^2 \bar{S}}{20\sigma^2}}\right) \right\} \quad (24)$$

여기서 $r_{ii,L}$ 는 LR에 의해 새롭게 얻어진 상삼각행렬의 대각성분을 나타낸다. 식 (24)로부터 LR의 사용여부와 관계없이 유사한 형태로 BLER 성능이 표현된다는 것과 LR에 의해 $r_{ii,L}$ 가 증가하여야 성공적으로 오류확률이 개선된다는 것을 관찰할 수 있다.

IV. 모의실험

본 절에서는 본 논문의 수학적 성능 분석이 모의실험결과와 부합하는지를 검증한다. 모의실험에서 4×4 와 8×8 복소수 MIMO 시스템을 가정하였고, 이는 각각 8×8 와 16×16 실수 MIMO 시스템에 해당된다. LR-SIC 기법에서는 LLL알고리즘을 적용하였고, 파라미터 δ 의 값은 1을 가정하였다. 모의실험에 적용된 환경은 다음의 표 2와 같

다.

표 2. 모의실험 환경
Table 2. Simulation environment

채널	flat Rayleigh fading
잡음	Gaussian
안테나 수	4×4 or 8×8
정상도	16-QAM

LR-SIC 기법의 신호 검출에는 round가 아닌 unimodular 행렬 \mathbf{T}_L^{-1} 의 요소를 가지고 경계를 결정하고, 최소거리를 2로 가정하여 표 3과 같은 절차로 모의실험을 하였다.

표 3. LR-SIC 슬라이싱 절차
Table 3. LR-SIC slicing procedure

```

for i = 4: -1: 1
    b = 3 * sum_{i=1}^4 |t_i|
    for j = -b: 2: b
        x_tilde_i = j
        if (y_i - sum_{j=i+1}^4 r_ij x_tilde_j) / r_ii < j + 2
            break;
        end
    end
end
x_hat = T_L x_tilde
    
```

그림 3은 4×4 복소수 MIMO 시스템에서 SIC 신호 검출 및 LR-SIC 신호 검출 기법의 BLER 성능을 나타낸다. 그림에서 관찰할 수 있듯이 모의실험 결과와 식 (17) 및 (24)의 수학적 분석 결과가 성공적으로 일치한다. 그림 4는 8×8 complex MIMO 시스템 성능이며, 여기에서도 일치함을 관찰할 수 있다. 또한 LR을 통해 큰 성능이득을 달성할 수 있음을 확인할 수 있다.

구사업입니다. (No. 2010-0003922)

참 고 문 헌

[1] A. G. Naguib, N. Seshadri, and A. R. Calderbank, "Increasing data rate over wireless channel," *IEEE Sigal Process. Mag.*, vol. 17, no. 2, p.p. 744-765, Mar. 1998.

[2] IEEE Standard 802.16m Air interface for fixed and mobile broadband wireless access systems May 2010.

[3] 이규희, 김재권, 윤상균, "MCS 레벨에 따른 적응 선형 수신기," *한국정보전자통신기술학회논문지*, 제 2권, 1호, 페이지 59-64, 2009년 3월.

[4] G. D. Golden, C. J. Foschini, R. A. Valenzuela, and P. W. Wolniansky, "Detection algorithm and initial laboratory result using V-BLAST," *IEE Elec. Lett.*, no. 1, p.p. 14-16, Jan. 1999.

[5] 박상현, 김재권, "다중안테나 시스템의 향상된 간섭제거 순서화를 통한 H.264/AVC 비디오 품질향상," *한국정보전자통신기술학회논문지*, 제 3권, 2호, 페이지 53-59, 2010년 6월.

[6] Xiaoli Ma, Wei Zhang, "Performance analysis for MIMO systems with lattice-reduction aided linear equalization," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 57, no. 7, p.p. 309-318, Feb. 2008.

[7] Ying Hung Gan, Cong Ling, "Complex lattice reduction algorithm for low-complexity full-diversity MIMO detection," *IEEE Trans. Signal Proces.*, vol. 57, no. 7, p.p. 2701-2710, July 2009.

[8] D. Wubben, D. Seethaler, J. Jalden, and G. Matz, "Lattice reduction," *IEEE Sigal Process. Mag.*, p.p. 70-91, May 2011.

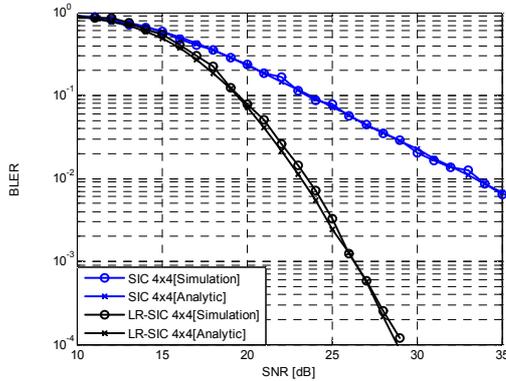


그림 3. 4×4 MIMO Channel에서 BLER
Fig. 3. BLER performance of 4×4 MIMO Channel

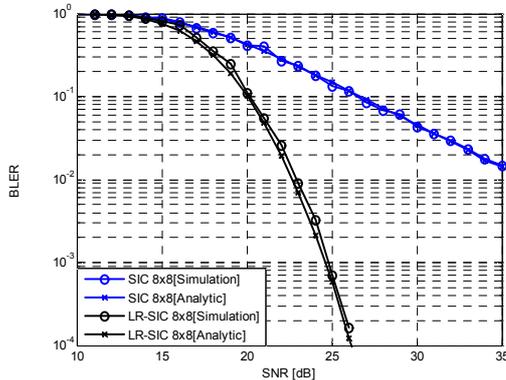


그림 4. 8×8 MIMO Channel에서 BLER
Fig. 4. BLER performance of 8×8 MIMO Channel

V. 결론

본 논문에서는 다중안테나 시스템에 공간다중화 방식이 사용되고 수신부에서는 SIC 기반 신호 검출 기법에 적용되었을 때의 BLER 성능 수식을 유도 하였다. LR을 사용했을 경우에도 유사한 형태의 성능표현이 가능함을 보였다. 또한 모의실험을 통해 분석된 성과와 모의실험 결과로 얻은 성과가 성공적으로 부합함을 보였다.

후 기

본 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연

저자약력

양 유 식(Yu-Sik Yang)

정회원

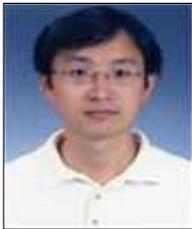


2006년 3월 ~ 현재 :
연세대 학교 원주캠
퍼스 정보통신공학과
학사 과정

<관심분야> MIMO-OFDM, 실용적인 신호검출
기법

김 재 권(Jae-kwon Kim)

정회원



1995년 8월 : 중앙대학교 전
기공학과 졸업
2000년 2월 : 중앙대학교 전
기공학과 석사
2004년 5월 : The University
of Texas at Austin 공학박사
2004년 8월 ~ 2005년 8월 : 삼
성종합기술연구 4G 시
스템 Lab.
2005년 9월 ~ 현재 : 연세대학
교 원주캠퍼스 컴퓨터
정보통신공학부 조교수,
부교수

<관심분야> MIMO-OFDM, 무선 비디오 전송
기법