

논문 2007-44TC-4-2

# MIMO MC-CDMA시스템에서 MMSE 수신기 출력의 점근적 양상

(Asymptotic Behavior of the output SINR at MMSE receivers in a  
MIMO MC-CDMA system)

김 경 연\*, 심 세 준\*\*, 함 재 상\*, 이 충 용\*\*\*

(Kyeongyeon Kim, Seijoon Shim, Jaesang Ham, and Chungyong Lee)

## 요 약

본 논문은 MMSE 수신기를 가지는 MIMO MC-CDMA시스템에서의 출력 SINR을 분석한다. 단일 안테나에서의 분석을 위한 가정들이 다중안테나에 바로 확장 적용되지 않기 때문에 단일 안테나를 가지는 MC-CDMA시스템에 대한 기존의 성능 분석은 MIMO MC-CDMA 시스템에 바로 적용하지 못한다. 그러므로 본 논문에서는 Marcenko Pastur law와 확장된 Haar 유니타리 행렬의 특성을 이용하여 MIMO system에 대한 성능 분석을 시도한다. 분석을 통해 확산 코드 길이가 무한대로 갈 때 출력 SINR이 특정값으로 접근함을 보이고 그 값을 freeness가정을 통해 구하여 비트 오차확률을 구하고 실험과 비교한다.

## Abstract

This paper analyzes the output signal-to-interference-plus-noise ratio (SINR) for a multiple-input-multiple-output (MIMO) multicarrier code division multiple access (MC-CDMA) system with minimum mean square error receivers. A previous work of a single antenna MC-CDMA system cannot directly applied to a MIMO MC-CDMA system because some assumptions for single antenna do not match the case of multiple antenna. Therefore this paper expands the concept of freeness to MIMO system by using the Marcenko Pastur law. The analysis shows that the output SINR asymptotically converges to a deterministic value and finds the value on the assumption of freeness. From the analysis, it is easy to calculate bit error rate and the calculation is verified by simulations.

**Keywords:** 다중 안테나, 다중 채널 코드 구분 다중 접속(MC-CDMA), MMSE 수신기, 랜덤 행렬 이론, freeness.

## I. 서 론

무선 인터넷과 멀티미디어 서비스 등을 지원하기 위한 광대역 무선 접속 방식 중에서 직교 주파수 분할 다중 송신(OFDM)과 코드분할 다중 접속 방식(CDMA)의 결합 즉 다중 캐리어 CDMA 시스템은 차세대 무선 통신시스템의 후보 중 하나이다<sup>[1][2][3]</sup>. 게다가 다중 안테나의 사용은 대역 제한된 통신 시스템에서 데이터의 전송 용량을 늘리거나 공간 다이버시티(spatial diversity)

를 이용해서 셀 영역을 확장시키는 목적으로 연구되어져 왔다<sup>[4][5]</sup>.

본 논문에서는 MC-CDMA시스템에서 단순한 MIMO 기법의 하나로서 공간 다중화 기법을 고려한다. 최근 공간 다중화 기법을 가지는 다중 안테나 MC-CDMA시스템에서의 수신기에 대한 연구가 이루어져 왔다<sup>[5][6]</sup>. MC-CDMA시스템에서는 일반적으로 알려진 V-BLAST의 성능 보다 선형 수신기가 더 우수한 성능을 나타내고 있다<sup>[6]</sup>. 이는 MC-CDMA 시스템에서는 주파수 선택적 채널에 의한 다른 코드 간섭이 발생하고 연속적으로 안테나 간섭을 제거할 경우 검출 오차가 전파되기 때문이다. 또한 선형 수신기는 복잡도 측면에서 선호되고 있으며 특히 심볼 수준의 MMSE수신

\* 학생회원, \*\*\* 정회원, 연세대학교 전자공학과  
(Yonsei University)

\*\* 정회원, 텍사스 오스틴

(University of Texas at Austin)

접수일자: 2006년9월6일, 수정완료일: 2007년4월16일

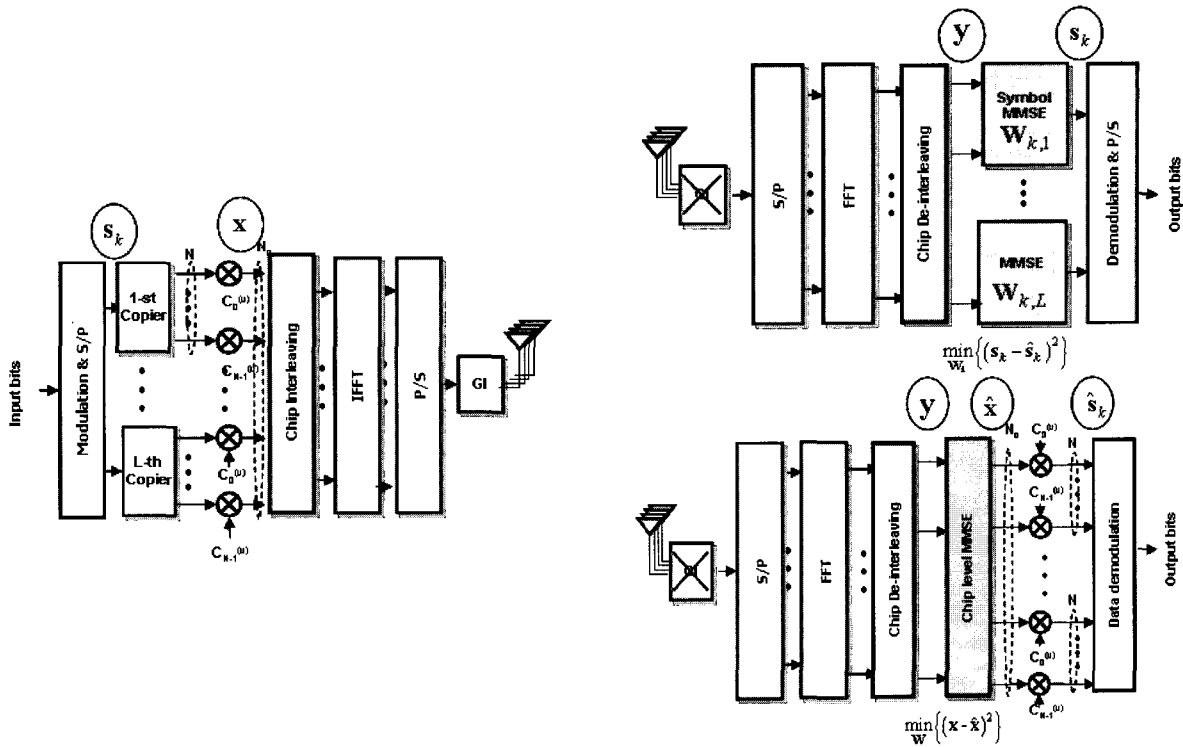


그림 1. MIMO MC-CDMA시스템에서의 송신기와 심볼 수준 수신기와 칩 수준 수신기의 블록도  
 Fig. 1. The block diagram of transmitter and receivers in a MIMO MC-CDMA system.

기는 선형 수신기 중에서 최적으로 알려져 있다<sup>[5]</sup>.

본 논문은 MMSE 수신기를 갖는 MIMO MC-CDMA 시스템에서의 비트 오차 확률을 분석한다. 확산 코드가 직교성을 가진다고 해도 주파수 선택적 채널을 통과한 데이터는 직교성을 유지할 수 없기 때문에 이러한 분석에서는 공간과 주파수 영역에서의 간섭과 다이버시티 이득의 영향이 고려되어야 한다. 이러한 두 가지의 상반된 영향은 할당된 코드 수와 신호 대 잡음비에 따라 다름을 실험적으로 확인할 수 있었다<sup>[7][8]</sup>. 본 논문에서는 확산 코드의 길이가 무한대로 간다고 가정할 때 신호 대 간섭 및 잡음비(SINR)가 할당된 코드수와 신호 대 잡음비의 함수로 확률변수가 아닌 확정 변수로 나타남을 보인다. 이는 기존의 단일 안테나 MC-CDMA 시스템에서의 점근적 성능 분석<sup>[9]</sup>을 확장한 것이나 기존 단일 안테나 시스템에서와는 코드와 채널 행렬이 다르고 다른 안테나로 부터의 간섭 성분의 고려가 필요하다. 채널행렬의 고유치 분포에 대한 가정과 free 확률 이론<sup>[10]</sup>을 이용하여 SINR을 찾는다. 본 논문은 심볼 수준의 MMSE 수신기 뿐 아니라 칩 수준의 MMSE수신기에 대한 점근적 분석을 통해 MIMO MC-CDMA시스템에서의 비트 오차 확률 성능을 평가한다.

## II. MIMO MC-CDMA 시스템에서 신호모델과 MMSE 수신기

### 1. 신호 모델

그림 1에서 보여 지는 바와 같이 송수신에서 각각  $M$ 개의 안테나를 가지는 MIMO MC-CDMA 시스템에서 공간적으로 다중화 된 신호를 검출해 내기 위해서 주파수 축으로 분산된 한 심볼만을 생각할 때  $NM$  길이를 가지는 수신 신호 벡터  $\tilde{y} = [y_1^T, y_2^T, \dots, y_L^T]^T$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\tilde{y} = \sqrt{\rho} \tilde{H} \tilde{C} \tilde{s} + \tilde{n} \quad (1)$$

여기서  $N$ 은 확산 코드의 길이이고,  $\rho$ 는 안테나당 송신 에너지로서  $E_s/M$ 로 주어지고  $K$ 명의 사용자를 고려할 때  $\tilde{s}$ 는  $MK \times 1$  송신 신호 벡터이다.  $\tilde{H}$ 는 부채널마다  $M \times M$  복소 가우시안 확률변수 블록을 대각으로 갖는  $MN \times MN$  블록 대각 행렬이다. 여기서 칩 인터리버를 통과한 후 송신되는 신호에 대한 채널은 거의 독립적이라고 볼 수 있다. 사용자별로 확산 코드가 다르며 동일 사용자의 다른 안테나는 동일 확산코드를 사용하므로 코드 행렬은  $\tilde{C} = [c_1, c_2, \dots, c_L] \otimes I_M$ 로 주어

진다. 여기서  $I_M$  은  $M \times M$  항등행렬이고  $\otimes$  는 크로네곱을 의미한다.

그림 1에서 심볼 수준의 MMSE 수신기를 사용할 경우  $k$ 번째 사용자의 수신기 출력 신호는 다음과 같다.

$$\hat{s}_k = \frac{1}{\sqrt{\rho}} (c_k^H \otimes I_M) \tilde{H}^H \left( \tilde{H} \tilde{C} \tilde{C}^H \tilde{H}^H + \frac{\sigma^2}{\rho} I_{MN} \right)^{-1} \tilde{y} \quad (2)$$

$k$ 번째 사용자의  $m$ 번째 안테나의 코드벡터를  $c_{k,m}$  라고 할 때 (2)로부터 SINR  $\beta_{s,k,m}$  은 다음과 같다.

$$\beta_{s,k,m} = c_{k,m}^H \tilde{H}^H \left( \tilde{H} \tilde{U}_{k,m} \tilde{U}_{k,m}^H \tilde{H}^H + \frac{\sigma^2}{\rho} I_{MN} \right)^{-1} \tilde{H} c_{k,m} \quad (3)$$

여기서  $U_{k,m}$  은 원래의 코드행렬에서  $c_{k,m}$  을 제외한 원치 않는 코드 행렬을 의미한다.

그림 1에서 칩 수준의 MMSE 수신기를 사용할 경우 원치 않는 코드 행렬에 대한 정보가 없으므로  $k$ 번째 사용자의 수신기 출력 후 역확산 후 신호는 다음과 같다.

$$\hat{s}_k = \frac{1}{\sqrt{\rho}} (c_k^H \otimes I_M) \tilde{H}^H \left( \tilde{H} \tilde{H}^H + \frac{\sigma^2}{\alpha \rho} I_{MN} \right)^{-1} \tilde{y} \quad (4)$$

여기서  $\left( \tilde{H} \tilde{H}^H + \frac{\sigma^2}{\alpha \rho} I_{MN} \right)^{-1}$  는 블록 대각행렬이고,

$\alpha$  는 확산 코드의 길이 대 할당된 코드수의 비로서  $K/N$  으로 주어진다. 각각 부채널별로 칩수준의 MMSE 수신 후 역확산 함으로써 원하는 신호를 얻을 수 있다.

SINR 은  $\beta_{c,k,m} = \eta_{c,k,m}^2 / \gamma_{c,k,m}$  이고, 여기서 수신 신호의 크

기는  $\eta_{c,k,m} = c_{k,m}^H \tilde{H}^H \left( \tilde{H} \tilde{H}^H + \frac{\sigma^2}{\alpha \rho} I_{MN} \right)^{-1} \tilde{H} c_{k,m}$  이고

간섭 신호의 전력  $\gamma_{c,k,m}$  는 다음과 같이 주어진다.

$$\gamma_{c,k,m} = c_{k,m}^H \tilde{H}^H \left( \tilde{H} \tilde{H}^H + \frac{\sigma^2}{\alpha \rho} I \right)^{-1} \left( \tilde{H} \tilde{U}_{k,m} \tilde{U}_{k,m}^H \tilde{H}^H + \frac{\sigma^2}{\rho} I \right) \left( \tilde{H} \tilde{H}^H + \frac{\sigma^2}{\alpha \rho} I \right)^{-1} \tilde{H} c_{k,m} \quad (5)$$

각 SINR들  $\beta_{s,k,m}$  과  $\beta_{c,k,m}$  은 MMSE수신기의 성능을 나타내는 지표이다. 그러나 이들은 코드 행렬과 채널 행렬로 표현되는 확률 변수이므로 그 값을 찾기가 어렵다. 그러나 수학적 복잡도를 감소하기 위해서 확산 코드의 길이가 무한대로 갈 때에 대해 분석해 보면 각 SINR들은 정규화 된 대각함수로 표현가능하고 free

probability이론을 이용하여 채널 행렬과 코드 행렬 각각의 고유치의 분포를 안다고 할 때 두 행렬 곱의 고유치의 분포를 알 수 있으므로 그 대각함을 구할 수 있다 [9][11][12][13].

### III. MC-CDMA시스템에서의 점근적 성능 분석

#### 1. 단일안테나 MC-CDMA 시스템의 성능 분석<sup>[9]</sup>

기존의 MC-CDMA 시스템의 점근적 성능분석을 먼저 살펴보면, 단일안테나 MC-CDMA시스템에서 수신 신호가  $y = HC s + n$ 이고, 여기서  $H$ 는 대각 행렬이고  $C$ 는  $N \times K$  코드행렬이라고 할 때, 심볼 수준의 MMSE 수신기의 출력 SINR은 다음 4가지 가정하에 확정 변수값으로 수렴한다. 첫째, 대각행렬인 채널행렬은 각 원소의 크기가 균등하고 모멘트가 유한하다. 둘째, 각 원소는 점근적으로 독립적이다. 이는 칩 수준의 인터리버를 사용하는 경우로 볼 수 있다. 셋째, 코드 행렬은  $N \times N$  Haar 유니터리 랜덤행렬에서의  $K$  개의 열벡터만을 가지는 행렬로 채널 행렬과는 독립적이고, 넷째로 채널의 전력 분포는 유한한 구간을 갖는다는 가정이다.  $N$ 과  $K$ 는 각각 무한대고 그 비  $\alpha$ 는 상수일 때 [12]의 예비정리 2.7에 근거해 수신 신호 전력은 점근적

으로  $\bar{\eta} = \frac{1}{K} \text{tr} \left\{ C^H H^H \left( H C C^H H^H + \frac{\sigma^2}{\rho} I_{MN} \right)^{-1} H C \right\}$ 에 수렴한다. 이때 역행렬의 예비정리에 의해 SINR은  $\bar{\eta} / (1 - \bar{\eta})$ 이다. 또한 [10]의 정리 4.9에 의해 채널 행렬과 코드행렬은 점근적으로 free 관계를 가진다. 코드행렬의 고유치의 분포가  $\mu = \alpha \delta(1) + (1 - \alpha) \delta(0)$  이고 채널 행렬의 분포를  $p(t)$ 라고 할 때 점근적 SINR,  $\bar{\beta}$ 는

$$\int_0^\infty \frac{t}{\alpha t + \sigma^2(1 - \alpha)\bar{\beta} + \sigma^2} p(t) dt = \frac{\bar{\beta}}{1 + \bar{\beta}} \quad (6)$$

의 해이다. 채널이 레일리 분포를 가진다고 할 때  $p(t) = \exp(-t)$ 이고 위 식은 지수 적분 함수  $E_i(x) = \int_{-\infty}^x \exp(-t)/t dt$ 로 표현가능하고 이 함수의 무한대 적분이기 때문에 Mathematica나 Matlab과 같은 수치 계산법으로 그 해를 구할 수 있다.

#### 2. MIMO MC-CDMA시스템의 성능분석

가. 심볼 수준의 수신기를 갖는 시스템

MIMO MC-CDMA시스템에서는 채널 행렬과 코드

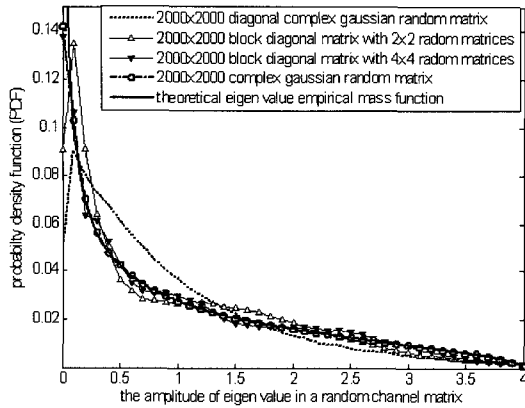


그림 2. 안테나 수에 따라 정규화 된 채널 행렬의 고유치 분포와 이론적 분포의 비교

Fig. 2. Normalized eigen-value distributions of block diagonal channel matrices according to the number of antennas.

행렬이 단일 안테나 시스템에서와 달라서 앞의 분석을 바로 적용할 수는 없다. 새로운 코드 행렬은 직교하지만 Haar 유니터리 행렬은 아니고 채널 행렬은 대각 행렬이 아니라 블록 대각 행렬이라 고유치의 분포는 더 이상 레일리 분포라 할 수 없다. 그러나 안테나 수가 한정되어 있고 사용자수와 확산 코드의 길이가 무한대로 갈 때 다른 안테나로부터의 간섭은 다른 사용자의 간섭에 무시할 수 있다고 가정할 때 다른 사용자로부터의 간섭에 의한 SINR은 [12]의 예비정리 2.7을 새로운 행렬에 대해 확장 적용하면 다음과 같은 값으로 점근적으로 수렴한다.

$$\bar{\beta}_s \rightarrow \frac{1}{(N-K)M} \text{tr} \left\{ \Pi \tilde{H}^H \left( \tilde{H} \tilde{U}_k \tilde{U}_k^H \tilde{H}^H + \frac{\sigma^2}{\rho} I \right)^{-1} \tilde{H} \right\} \quad (7)$$

여기서  $\Pi = I - \tilde{U}_k \tilde{U}_k^H$ 는 투영행렬이고  $\tilde{U}_k$ 는 원치 않는 코드 행렬을 의미한다. 코드 행렬은 항등 행렬의 크로네 곱으로 확장되었으므로 코드 행렬의 분포는 단일 안테나에서와 동일하고, 항등 행렬의 크로네 곱으로 확장된 유니터리 행렬의 집합에서 새 코드행렬은 균일 분포를 가지므로 SINR은 단일 안테나에서와 동일하게 (6)의 식으로 표현가능하다. 안테나수로 정규화 된 채널 행렬의 분포는 정규화 된 무한대 크기의 Wishart 행렬의 분포를 따른다고 가정하며 그 분포는 다음과 같다<sup>[13]</sup>.

$$p(\lambda) = \frac{1}{\pi} \sqrt{\frac{1}{\lambda} - \frac{1}{4}} \quad (8)$$

이러한 가정은 그림 2의 몬테카를로 실험에 의해 뒷받

침된다. 그림에서 보듯이 안테나 수가 증가 할수록 위식에 근접하지만, 4개의 안테나를 가지는 경우에도 정규화 된 무한대 크기의 Wishart 행렬의 분포와 거의 동일함을 알 수 있다. 채널 행렬의 고유치의 분포에 대한 가정하에 심볼 수준의 수신기를 갖는 MIMO MC-CDMA 시스템에서의 SINR은 [14]를 참고로 하여 다음과 같은 닫힌 해로 구할 수 있다.

$$\bar{\beta}_s = \frac{1 - \alpha - \sigma^2 + \sqrt{4\sigma^2 + (\alpha + \sigma^2 - 1)^2}}{2\sigma^2} \quad (9)$$

#### 나. 칩 수준 수신기를 갖는 시스템

칩 수준의 MMSE 수신기를 사용할 경우 SINR은 수신 신호의 전력  $\eta$ 와 간섭 신호의 전력  $\gamma$ 로 구분해서 생각할 수 있다. 수신 신호의 전력은 앞서와 동일한 접근 방식으로  $\bar{\eta}_c = \int_0^4 \frac{\lambda}{\lambda + \sigma^2/\alpha} p(\lambda) d\lambda$ 로 점근적 수렴을 한다. 간섭 신호의 전력은 앞서와 마찬가지로 다른 안테나에 대한 간섭은 무시할 수 있을 정도로 작다고 할 때 다른 사용자에 대한 간섭으로 나타나며 이는 직접적 계산은 어려우나 단일 안테나 CDMA 시스템에서의 점근적 분석을 크로네 곱으로 확장된 Haar 유니터리 행렬로 확장 적용함으로써 다음과 같은 값으로 수렴한다<sup>[11]</sup>.

$$\bar{\gamma}_c = \frac{\alpha}{M} \text{tr} \left( (c_k^H \otimes I_M) \tilde{H}^H \left( \tilde{H} \tilde{H}^H + \frac{\sigma^2}{\alpha\rho} I \right)^{-1} \left( \tilde{H} (I - (c_k c_k^H \otimes I_M)) \tilde{H}^H + \frac{\sigma^2}{\rho} I \right) \left( \tilde{H} \tilde{H}^H + \frac{\sigma^2}{\alpha\rho} I \right)^{-1} \tilde{H} (c_k \otimes I_M) \right) \quad (10)$$

여기서 앞서 구한 점근적 수신 신호 전력을 이용하여 나타내면 다른 안테나로부터의 간섭은 무시할 수 있다고 하였으므로  $\alpha \bar{\eta}_c (1 - \bar{\eta}_c)$ 로 수렴한다. 이때의 칩 수준의 MMSE 수신기의 출력 SINR은 다음의 값으로 수렴한다.

$$\bar{\beta}_c = \frac{\sqrt{\sigma^2 + 4\alpha\sigma^2} + \sigma^2}{2\alpha\sigma^2} - \frac{1}{\alpha} \quad (11)$$

## IV. 실험 결과 및 성능 분석

### 1. 실험 환경

시스템은 그림 1에서 주어진 것과 같고 송수신 안테

나 수는 2개, 4개인 경우를 실험하였다. 채널은 레일리 채널인데 주파수 영역에서 독립적인 복소 가우시안 확률 변수로 모델링하였다. 채널 추정은 완벽하다고 가정한다. 부채널 수는 2048이고 보호구간은 64이다 확산 코드는 16, 32, 64의 길이를 가지는 Haar 유니터리 코드이고 할당된 코드 수는 확산 코드길이의 1/4, 1/2 또는 전체를 할당하였다. 변조기법은 QPSK를 사용하였다.

2. 실험 결과 및 성능 분석

QPSK변조시 SINR이 주어지고 그 값이 확률변수가 아닐 때의 비트 오차 확률은 가산 백색 가우시안 잡음 채널에서의 비트 오차 확률로 주어진다. 이는 잡음의 정도와 할당된 코드수와 확산 길이의 비에 따라 다음과 같이 주어진다<sup>[15]</sup>.

$$Q(\sqrt{SINR(\alpha, \sigma^2)}) \tag{12}$$

여기에서  $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp(-t^2/2)dt$ 이다. 확산 코드의 길이, 할당 코드 수의 비, 안테나 수에 따라 심볼 수준의 수신기와 칩 수준의 수신기의 실험과 점근적 성능분석의 결과를 비교한다. 그림 3은 확산 코드의 길이가 64이고 할당된 코드 수가 32와 64일 때 안테나 수를 변화 시켜가며 실험을 하였다. 실험 결과에서 보듯이 할당된 코드수의 비가 0.5와 1일 때 두 가지의 경우 모두 안테나 수가 4일 때 점근적 성능 분석과 거의 동일함을 알 수 있다. 이는 그림 2의 채널의 고유치의 분포에 대한 가정에서 보듯이 안테나 수가 늘어남에

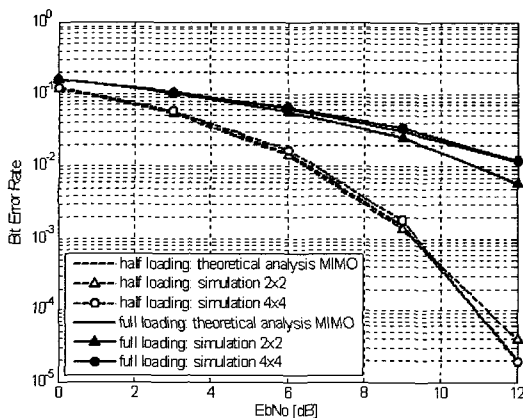


그림 3. 심볼 수준 수신기를 사용하는 경우 안테나수의 변화에 따른 이론적 성능과 실제 실험 비교

Fig. 3. Theoretical bit error rate compared with simulation results according to the number of antennas for the case of a symbol level MMSE receiver.

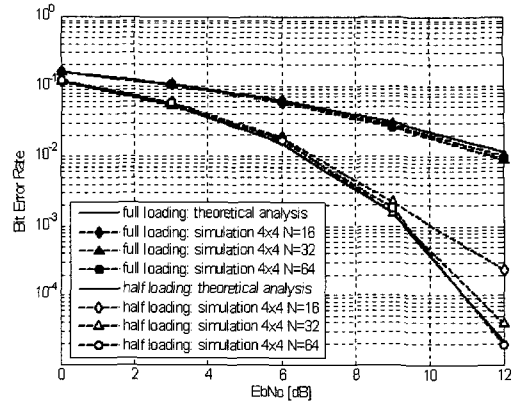


그림 4. 심볼 수준 수신기를 사용하는 경우 확산코드 길이의 변화에 따른 이론적 성능과 실제 실험 비교

Fig. 4. Theoretical bit error rate compared with simulation results according to the length of spreading code for the case of a symbol level MMSE receiver.

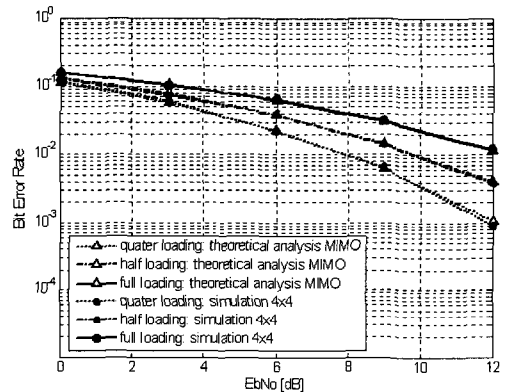


그림 5. 칩 수준 수신기를 사용하는 경우 할당 코드 수에 따른 이론적 성능과 실제 실험 비교

Fig. 5. Theoretical bit error rate compared with simulation results according to the number of loaded codes for the case of a chip level MMSE receiver.

따라 고유치의 분포에 대한 가정이 거의 들어맞음과 일맥상통한다. 그림 4에서는 확산 코드의 길이의 변화에 따른 성능의 변화를 점근적 성능과 비교한다. 점근적 성능은 확산 코드의 길이가 무한대로 감을 가정하고 있지만, 실험결과에서 보듯이 안테나 수가 4일 때는 64의 확산 길이만 가져도 점근적 성능과 거의 동일함을 알 수 있다. 계산상 편의를 위하여 점근적 성능을 구하지만 이러한 점근적 성능으로 실제 시스템의 성능을 평가함이 크게 무리가 없음을 알 수 있다. 앞서 두 그림에서 심볼 수준의 MMSE수신기를 사용하는 경우 안테나 수

는 4이고 확산 코드의 길이가 64일 때 점근적 성능과 실제 실험과의 차이가 거의 없음을 확인하였고 그림 5는 칩수준의 MMSE수신기에서도 거의 같은 결과를 보임을 할당된 코드수의 비에 따른 결과를 보여준다. 예상했던 바와 같이 안테나수가 4개이고 확산코드의 길이가 64에서는 실제 실험이 점근적 성능과 거의 근접함을 확인할 수 있다.

## V. 결 론

본 논문은 두 가지의 MMSE 수신기를 가지는 MIMO MC-CDMA 시스템의 점근적 성능을 분석하였다. 안테나 수는 한정되어 있지만 확산코드의 길이가 무한대로 간다는 가정하에 단일 안테나 MC-CDMA 시스템에서의 성능 분석을 확장하였다. 채널 행렬의 고유치의 분포에 대한 가정아래 SINR을 SNR과 할당된 코드수의 비의 함수로 주어진 닫힌 해를 구하였다. 실험을 통하여 송신안테나 4개 이상 확산 코드의 길이가 64개 이상일 때 점근적 성능과 실험적 성능이 거의 동일함을 확인하였다.

## 참 고 문 헌

- [1] S. Hara and R. Prasad, "Overview of Multicarrier CDMA," *IEEE Communication Magazine*, Vol. 35, No. 12, pp. 126-133, Dec. 1997.
- [2] D. N. Kalofonos, M. Stojanovic, J. G. Proakis, "Performance of Adaptive MC-CDMA Detectors in Rapidly Fading Rayleigh Channels," *IEEE Trans. on Wireless Communication*, Vol. 2, No. 2, pp. 229-239, Mar. 2003.
- [3] H. Atarashi, S. Abeta, M. Sawahashi, "Broadband packet wireless access appropriate for high-speed and high-capacity throughput," *Proc. of IEEE VTC 2001 Spring*, Vol.1, pp. 566-570, May 2001.
- [4] A. Paulraj, R. Nabar and D. Gore, *Introduction to space-time wireless communications*, chapter 8, Cambridge university press, 2003.
- [5] M. Juntti, M. Vehkaperä, J. Leinonen, Z. Li D. Tujkovic, S. Tsumura and S. Hara, "MIMO MC-CDMA Communications for Future Cellular Systems," *IEEE Communications Magazine*, Vol. 43, No.2, pp. 118-124, Feb., 2005.
- [6] S. Lei, X. Peng and F. P.S.Chin, "V-BLAST Receivers for Downlink MC-CDMA Systems," *Proc. of IEEE VTC 2003 fall*, Vol. 2, pp. 866-870, Oct. 2003.
- [7] K. Kim, J. Ham, C. Lee and D. Hong, "Performance Analysis of a Downlink MIMO MC-CDMA system with Turbo Coding and Channel Interleaving," *Proc. of IEEE VTC2004 fall*, Vol. 2, pp. 1439-1442, Sept. 2004.
- [8] J. Ku, K. Kim, S. Shim, M. Kim and C. Lee, "An MMSE Nulling-Partial PIC Receiver for Multiuser Downlink MIMO MC-CDMA Systems," *IEICE Trans. on Communications*, Vol. E88-B, No. 4, pp. 1725-1729, Apr. 2005.
- [9] M. Debbah, W. Hachem, P. Loubaton and M. de Courville, "MMSE Analysis of Certain Large Isometric Random Precoded Systems," *IEEE Trans. on Information Theory*, Vol. 49, No. 5, pp. 1293-1311, May 2003.
- [10] F. Hiai and D. Petz, *The semicircle law, free random variables and entropy*, American Mathematical Society, *Mathematical Surveys and Monographs*, Vol. 77, 2000.
- [11] J. M. Chaufray, W. Hachem and P. Loubaton, "Asymptotic Analysis of Optimum and Suboptimum CDMA Downlink MMSE Receivers," *IEEE Trans. on Information Theory*, Vol. 50, No.11, pp 2620-2638, Nov. 2004.
- [12] Z. Bai and J. W. Silverstein, "No eigenvalues outside the support of the limiting spectral distribution of large dimensional sample covariance matrices," *Ann. Probab.*, Vol. 26, No. 1, pp 316-345, 1998.
- [13] A. M. Tulino and S. Verdu, *Random Matrix Theory and Wireless Communications*, *The essence of knowledge, Fundamental and Trends in Communications and Information Theory*, Vol. 1, No. 1, 2004.
- [14] I. S. Gradshteyn and I.M. Ryzhik, *Table of Integrals, Series, and Products*, 6th ed., Academic Press, pp. 91-101, 2000.
- [15] H. Poor and S. Verdu, "Probability of error in MMSE multiuser detection," *IEEE Trans. on Information Theory*, Vol. 43, No. 3, pp. 858-871, May 1997.

## 저 자 소 개



김 경 연(학생회원)  
2001년 연세대학교 전자공학과  
학사 졸업.  
2003년 연세대학교 전자공학과  
석사 졸업.  
2003년~현재 연세대학교  
전자공학과 박사과정.

<주관심분야 : 통신 신호처리, MIMO 시스템>



함 재 상(학생회원)  
2003년 연세대학교 전자공학과  
학사 졸업.  
2005년 연세대학교 전자공학과  
석사 졸업.  
2005년~현재 연세대학교  
전자공학과 박사과정.

<주관심분야 : 통신 신호처리, MIMO 시스템>



심 세 준(정회원)  
1999년 연세대학교 전자공학과  
학사 졸업.  
2001년 연세대학교 전자공학과  
석사 졸업.  
2005년 8월 연세대학교  
전자공학과 박사 졸업.

현재 University of Texas at Austin 박사후과정.

<주관심분야 : 통신 신호처리, MIMO 시스템>



이 충 용(정회원)  
1995년 Georgia Tech.  
전자공학과 박사 졸업.  
1996년~1997년 삼성전자 연구원  
1997년~2000년 연세대학교  
전자공학과 조교수  
2000년~2005년 연세대학교  
전자공학과 부교수

현재 연세대학교 전자공학과 정교수

<주관심분야 : 통신 신호처리, MIMO 시스템>