

논문 2007-44TC-7-9

# 다중셀 환경에서 MIMO-MC-CDMA시스템의 점근적 성능

## ( Asymptotic Performance of MIMO-MC-CDMA Systems in Multi-cell Environments )

김 경 연\*, 함 재 상\*, 이 충 용\*\*

( Kyeongyeon Kim, Jaesang Ham, and Chungyong Lee )

## 요 약

본 논문은 다중 셀 환경에서 MMSE 수신기를 가지는 MIMO MC-CDMA시스템의 출력 SINR을 점근적으로 분석한다. 단일 셀에서의 점근적 성능 분석이 다중셀 환경으로 확장 적용된다. 점근적 분석을 위한 Haar 유니터리 코드의 사용은 다른 셀로부터의 간섭성분이 대각성분들의 값이 다른 대각행렬로 나타나게 한다. 본 논문에서는 다른 셀의 코드 간섭 성분을 mean square측면에서 간섭의 전력으로 수렴함을 보이고, 셀간 간섭 성분이 주어질 때 점근적으로 특정 SINR값을 찾는다. 다중 셀에서의 거리에 따른 느린 페이딩을 로그노말 분포를 가정하여 구한 이론적인 비트오차 확률과 실험을 비교하여 비슷함을 보이고, 점근적 성능에 의한 데이터 전송 수율의 셀 반경에 따른 성능을 보인다.

## 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 in multi-cell environments. A previous work in single cell environments is extended into analysis in multi-cell environments. The use of Haar unitary code matrix for asymptotic analysis causes other cell interferences expressed with a diagonal matrix having different diagonal values. This paper shows that other cell interferences converge to an identity matrix whose gain is expressed by only other cell interference power in mean square sense and finds asymptotic deterministic SINRs for a given other cell interference. Under the assumption that the sum of lognormal fading components is distributed by other lognormal function, we show the comparison between theoretical performances and simulations from the view point of bit error rate and present average throughput performance according to the cell radius.

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

## I. 서 론

다중 반송파 코드 분할 다중 접속(MC-CDMA) 시스템은 간섭을 평균화하면서 다이버시티를 얻을 수 있는 반면 코드간 간섭의 영향을 받는 단점 또한 지니고 있다. 그러나 다중안테나와의 결합으로 충분한 데이터 전송률을 확보 할 수 있으며<sup>[1]</sup>, 특히 확산된 심볼을 가능한 멀리 떨어진 부 반송파에 할당하는 칩 인터리빙을 사용할 때 낮은 변조기법을 사용하여 다이버시티를 얻

을 수 있다<sup>[2]</sup>. 다이버시티 이득과 등화기의 용이성 때문에 주파수 도약 직교 주파수 분할 다중 접속 (FH-OFDMA)시스템과 칩 인터리빙 MC-CDMA 시스템이 다중셀 환경에서 고려될 수 있다<sup>[3-4]</sup>. 그러나 이러한 시스템의 성능은 분석이 용이하지 않다. 밴드 분할 MC-CDMA의 경우, 인접 부 반송파에 확산된 심볼을 할당하므로 밴드당 채널을 동일하게 놓고 신호 대 간섭과 잡음 비(SINR)를 구할 수 있으나<sup>[5-6]</sup> 칩 인터리빙 MC-CDMA 시스템에서는 다른 방법이 필요하다.

본 논문에서는 확산 코드의 길이가 무한대로 갈 때의 점근적 성능을 통해 실질적 성능을 예측해 보고자한다. 단일 셀 환경에서의 MIMO MC-CDMA 시스템의 점근

\* 학생회원, \*\* 정회원, 연세대학교 전기전자공학부  
(School of Electrical & Electronic Engineering,  
Yonsei University)  
접수일자: 2007년6월19일, 수정완료일: 2007년7월2일

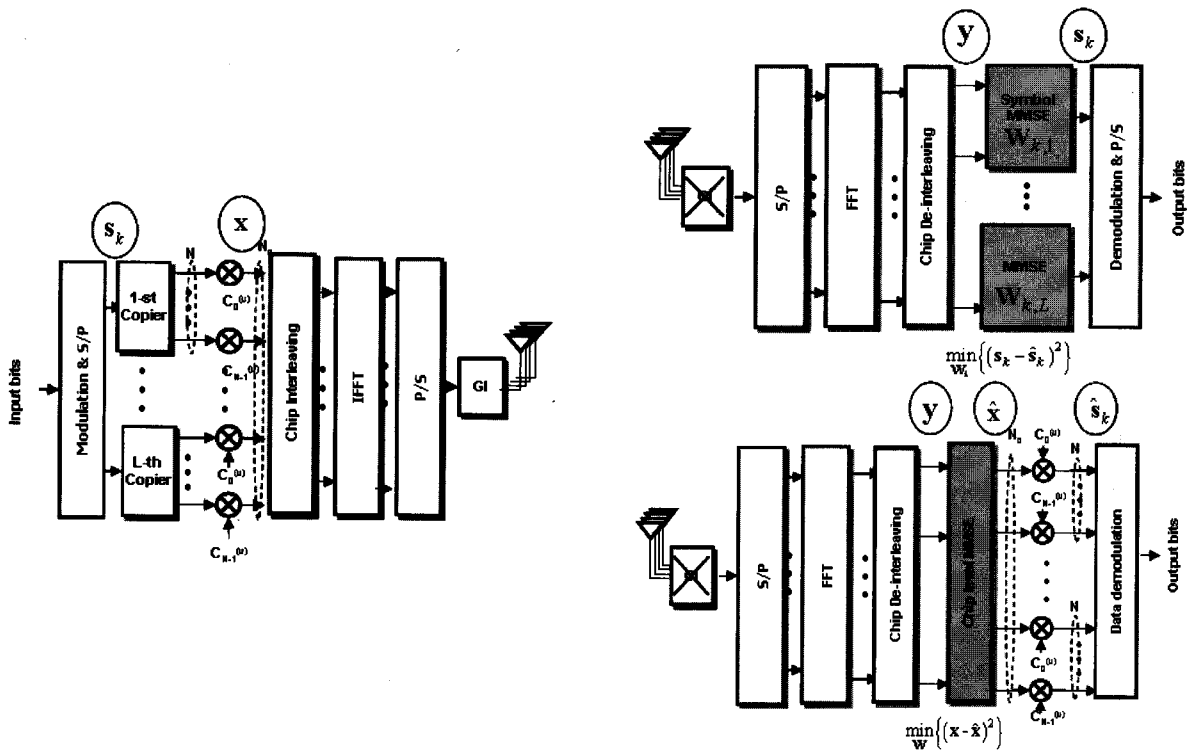


그림 1. MIMO MC-CDMA시스템에서의 송신기와 심볼 수준 수신기와 칩 수준 수신기의 블록도  
 Fig. 1. The block diagram of transmitter and receivers in a MIMO MC-CDMA system.

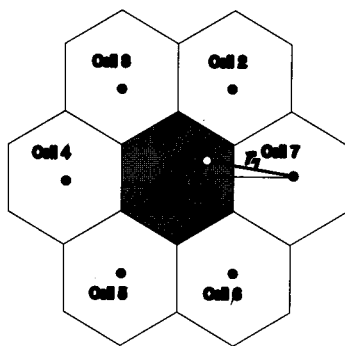


그림 2. 인접셀이 6개인 다중 셀 환경 모델  
 Fig. 2. One tier multi-cell environment.

적 분석<sup>[7-8]</sup>은 다중 셀 환경으로 확장할 수 있다. 그러나 심볼 수준 수신기를 사용할 때의 성능은 다중 셀 간섭 전력만이 아닌 코드행렬에 의하여 대각 성분의 값들이 다른 대각행렬로 나타나게 되고, 이는 더 많은 피드백을 요구하게 된다. 본 논문에서는 이를 제곱평균 측면에서 다른 셀로부터의 간섭 전력으로 수렴함을 보임으로써 다중 셀에서의 점근적 SINR을 할당된 코드수와 다른 셀에서 간섭 전력만으로 구하고자 한다.

## II. 다중셀 환경에서의 MIMO-MC-CDMA 시스템 모델

MIMO MC-CDMA 시스템 모델을 다중셀 간섭이 존재하는 환경에서 고려하자. 그림에서 보여진바와 같이 셀 1을 자신의 셀이라고 할 때, 단말기는 자신 셀 중심에서 정규화된 거리  $r_1$ 만큼 떨어져 있고  $j$ 번째 셀로부터  $r_j$ 만큼의 거리에 떨어져 존재하게 된다. 거리에 의한 평균 경로 손실 전력과 느린 페이딩에 의한 영향은  $L_j = r_j^{-l} \xi_j$ 로 나타난다. 여기서  $\xi_j$ 는 로그노말 분포를 따르며, 전력손실의 지수  $l=4$ 로 놓자. 각 셀 내에서의 MIMO MC-CDMA시스템의 두 수신기는 단일 셀에서의 환경<sup>[8]</sup>과 동일하다.

그림 1에서처럼 송수신에서 각각  $M$ 개의 안테나를 가지는 MIMO MC-CDMA 시스템에서 공간적으로 다중화된 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.

$$\tilde{y} = \sqrt{\rho_1 L_1} \tilde{H}_1 \tilde{C}_1 \tilde{s}_1 + \sum_{j=2}^J \sqrt{\rho_j L_j} \tilde{H}_j \tilde{C}_j \tilde{s}_j + \tilde{n} \quad (1)$$

여기서  $N$ 은 확산 코드의 길이이고,  $\rho_j$ 는  $j$ 번째 셀의 신호 대 잡음비(SNR)이다.  $j$ 번째 셀에  $K_j$ 명의 사용자를 고려할 때  $\tilde{s}_j$ 는  $MK_j \times 1$  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  $\tilde{C} = [c_1, c_2, \dots, c_L] \otimes I_M$ 으로  $N \times K_j$  Haar 유니타리 행렬과  $M \times M$  항등행렬  $I_M$  과의 크로넥 곱으로 이루어진다. 여기서 각 셀의 확산 코드의 집합은 동일하지만 특정 순간에 사용된 확산 코드 자체는 사용자수의 다름에 의해 다를 수 있다고 가정한다. 수신기는 역확산후에 오차를 최소화하는 MMSE를 사용할 경우 심볼수준의 MMSE수신기가 되고, 역확산전의 신호와 확산한 신호의 오차를 최소화하는 MMSE를 사용할 경우 칩수준의 MMSE 수신기를 구성할 수 있다. 심볼 수준의 수신기를 사용할 경우 다른 사용자의 모든 코드 정보를 알아야 하고, 칩수준의 수신기를 사용할 경우는 자신의 코드정보만으로 수신할 수 있다.

### III. 다중 셀 간섭이 존재하는 상황에서 MC-CDMA시스템의 점근적 성능 분석

#### 1. 심볼 수준의 수신기를 갖는 시스템

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

$$\hat{s}_k = \frac{1}{\sqrt{\rho_1 L_1}} (c_k^H \otimes I_M) \tilde{H}_1^H \left( \tilde{H}_1 \tilde{C}_1 \tilde{C}_1^H \tilde{H}_1^H + \sum_{j=2}^J \frac{\rho_j L_j}{\rho_1 L_1} MD_j + \frac{\sigma^2}{\rho_1 L_1} I_{MN} \right)^{-1} \tilde{y} \quad (2)$$

여기서  $D_j = E(\tilde{H}_j \tilde{C}_j \tilde{C}_j^H \tilde{H}_j^H | C) = \tilde{C}_j \tilde{C}_j^H$ 의 대각 성분으로 이루어진  $MN \times MN$  대각 행렬이다. 이 때  $k$ 번째 사용자의  $m$ 번째 안테나의 코드벡터를  $c_{k,m}$  라고 할 때 (2)로부터 SINR  $\beta_{s_{k,m}}$  은 다음과 같다.

$$\beta_{s_{k,m}} = c_{k,m}^H \tilde{H}^H (\tilde{H} \tilde{U}_k \tilde{U}_k^H \tilde{H}^H + \tilde{D})^{-1} \tilde{H} c_{k,m} \quad (3)$$

여기서  $\tilde{D} = \sum_{j=2}^J \frac{\rho_j L_j}{\rho_1 L_1} MD_j + \frac{\sigma^2}{\rho_1 L_1} I_{MN}$ 이고,  $U_{k,m}$ 은 원래의 코드행렬에서  $c_{k,m}$ 을 제외한 원치 않는 코드 행렬을 의

미한다.

다중셀 환경에서도 단일 셀환경<sup>[7~8]</sup>과 동일하게 SINR이 정규화된 대각합의 형태로 거의 확실한 수렴 (almost sure convergence)하게 된다. 다만 단일 셀환경<sup>[6~7]</sup>에서와 달리 셀간 간섭과 잡음에 의한 영향이 전력으로만 나타나지 않고 확산 코드에 의해 대각 성분의 값들이 다른  $\tilde{D}$ 라는 대각 행렬로 나타나게 된다. 이 때문에 단일 셀환경에서처럼 잡음과 다중화된 코드수만으로는 SINR을 구할 수 없고 다른 셀에서 할당된 코드들의 정보에 대한 피드백을 받아야만 한다. 그러므로 본 논문에서는 SINR의 mean square 측면에서의 다른 수렴값을 보이고 단일 셀에서처럼 셀간 간섭과 잡음의 전력의 함수로써 SINR을 구하고자 한다. 즉,  $K_1 < N$ 일 때 다음 식이 성립한다.

$$\beta_{s_{k,m}} \xrightarrow{\beta_s} \frac{\text{tr} \left\{ \Pi \tilde{H}_1^H \left( \tilde{H}_1 \tilde{U}_k \tilde{U}_k^H \tilde{H}_1^H + \frac{\sigma_{I+N}^2}{\rho_1} I \right)^{-1} \tilde{H}_1 \right\}}{(N-K_1)M} \quad (4)$$

여기서 셀간 간섭과 가우시안 잡음은 다음과 같이  $\sigma_{I+N}^2 = \sum_{j=2}^J \frac{\rho_j L_j \alpha_j}{L_1} M + \frac{\sigma^2}{L_1}$ 으로 표현되고 원치 않는 사용자의 코드행렬,  $\tilde{U}_k$ ,로 구성된 투영행렬,  $\Pi = I - \tilde{U}_k \tilde{U}_k^H$ ,로 정사영한 행렬의 정규화 대각합으로 나타난다. 이는 단일 셀의 결과에 근거하여  $\beta_{s_{k,m}} \xrightarrow{\beta_s} \frac{\text{tr}\{\Pi B\}}{(N-K_1)M}$ 과 같이 거의 확실한 수렴 (almost sure convergence)을 보일 수 있다. 다만 여기서 행렬  $B = \tilde{H}_1^H (\tilde{H}_1 \tilde{U}_k \tilde{U}_k^H \tilde{H}_1^H + \tilde{D})^{-1} \tilde{H}_1$ 로 주어진다. 또한 새로운 행렬  $\tilde{B} = \tilde{H}_1^H \left( \tilde{H}_1 \tilde{U}_k \tilde{U}_k^H \tilde{H}_1^H + \frac{\sigma_{I+N}^2}{\rho_1} I \right)^{-1} \tilde{H}_1$ 에 대하여 다음과 같은 관계가 성립한다.

$$\frac{\text{tr}\{\Pi B\} - \text{tr}\{\tilde{\Pi} \tilde{B}\}}{(N-K_1)M} \leq \frac{\rho_1 L_1 \lambda_{\max}(\tilde{H}_1)^2 \text{tr}\{|C|\}}{\sigma_{I+N}^2 (N-K_1)M} \quad (5)$$

여기서도 채널행렬의 분포를 정규화된 무한대 크기의 Wishart 행렬의 분포를 따른다고 가정하였고, 이때 채널의 최대 고유치를 나타내는  $\lambda_{\max}(\tilde{H}_1)$ 는 바운드 되고  $\frac{\text{tr}\{|C|\}}{(N-K_1)M}$ 은 mean square 측면에서 0으로 수렴한다. 자세한 증명은 여기서는 생략하며 [9~10]에 근거하여 증명할 수 있다. 따라서 위 식의 오른쪽 텀이 mean square 측면에서 0으로 수렴하므로 다중 셀에서의

SINR은 확률적으로(in probability) (4)의 값으로 수렴한다.

마지막으로 채널 행렬의 고유치의 분포에 대한 가정 하에 심볼 수준의 수신기를 갖는 MIMO MC-CDMA 시스템에서의 SINR은 다음과 같은 닫힌 해로 구할 수 있다.

$$\bar{\beta}_s = \frac{r + \sqrt{4\sigma_{I+N}^2 + r^2}}{2\sigma_{I+N}^2}, \quad (6)$$

여기서  $r = 1 - \alpha - \sigma_{I+N}^2$ 으로 정의한다. 결과적으로 단일 셀과 비교하여 잡음전력이 셀 간 간섭과 잡음의 전력의 합으로 바뀐 것 외에는 동일한 결과를 얻는다.

## 2. 칩 수준 수신기를 갖는 시스템

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

$$\hat{s}_k = \frac{(c_k^H \otimes I_M) \tilde{H}_1^H \left( \tilde{H}_1 \tilde{H}_1^H + \frac{\sigma_{I+N}^2}{\alpha_1 \rho_1} I_{MN} \right)^{-1} \tilde{y}}{\sqrt{\rho_1 L_1}} \quad (7)$$

여기서 셀간 간섭과 가우시안 잡음은 다음과 같이 앞서 언급한 것과 동일하다. 또한 블록 대각행렬로서

$$\left( \tilde{H}_1 \tilde{H}_1^H + \frac{\sigma_{I+N}^2}{\alpha_1 \rho_1} I_{MN} \right)^{-1}$$

는 주어지고,  $\alpha_j$ 는 확산 코드의 길이 대 할당된 코드수의 비로서  $K_j/N$ 으로 주어진다. 각각 부 채널 별로 칩수준의 MMSE 수신 후 역확산 함으로써 원하는 신호를 얻을 수 있다. SINR은  $\beta_{c_{k,m}} = \eta_{c_{k,m}}^2 / \gamma_{c_{k,m}}$ 이고,

$$\eta_{c_{k,m}} = c_{k,m}^H \tilde{H}^H \left( \tilde{H} \tilde{H}^H + \frac{\sigma_{I+N}^2}{\alpha_1 \rho_1} I_{MN} \right)^{-1} \tilde{H} c_{k,m}$$

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

$$\gamma_{c_{k,m}} = c_{k,m}^H \tilde{H}^H \left( \tilde{H} \tilde{H}^H + \frac{\sigma_{I+N}^2}{\alpha_1 \rho_1} I \right)^{-1} \left( \tilde{H} \tilde{U}_{k,m} \tilde{U}_{k,m}^H \tilde{H}^H + \frac{\sigma_{I+N}^2}{\rho_1} I \right) \left( \tilde{H} \tilde{H}^H + \frac{\sigma_{I+N}^2}{\alpha_1 \rho_1} I \right)^{-1} \tilde{H} c_{k,m} \quad (8)$$

칩 수준의 MMSE 수신기를 사용할 경우 SINR은 수신 신호의 전력  $\eta$ 와 간섭 신호의 전력  $\gamma$ 로 구분해서 생각할 수 있다. 이는 단일 셀에서의 SINR과 비교하여 잡음전력이 셀간 간섭과 잡음전력의 합으로 나타난 것 외에는 동일한 결과를 얻는다<sup>[8]</sup>. 이는 수신기에서는 다른 코드에 대한 정보를 가지고 있지 않으므로 심볼 수준의 수신기에서처럼 다른 셀의 코드간 간섭성분이 나

타나지 않기 때문이다. 따라서 칩 수준의 MMSE 수신기의 출력 SINR은 다음의 값으로 수렴한다.

$$\bar{\beta}_c = \frac{\sqrt{\sigma_{I+N}^4 + 4\alpha_1 \sigma_{I+N}^2 + \sigma_{I+N}^2}}{2\alpha_1 \sigma_{I+N}^2} - \frac{1}{\alpha_1} \quad (9)$$

## IV. 실험

### 1. 실험 환경

시스템은 그림 1에서 주어진 것과 같고 단일 셀 환경에서 송수신 안테나 수는 4개와 확산 코드의 길이가 64인 경우에 점근적 성능과 실제 성능이 거의 동일함에 근거하여<sup>[7~8]</sup> 본 논문에서는 안테나수가 4개이고 64의 확산코드의 길이에 대해서만 고려하여 비트오차확률과 데이터 전송 수율 측면에서 살펴본다. 채널은 레일리 채널인데 주파수 영역에서 독립적인 복소 가우시안 확률 변수로 모델링하였다. 채널 추정은 완벽하다고 가정한다. 확산 코드는 Haar 유니터리 코드이고 변조기법은 QPSK를 사용하였다.

### 2. 실험 결과 및 성능 분석

셀간 간섭 전력이 주어질 때 SINR은 더 이상 확률변수가 아닌 확정변수로 주어지게 된다. 주어진 간섭 전력하에 수신 신호는 가우시안으로 모델링하여 QPSK변조시 비트 오차 확률은 다음과 같다.

$$Q(\sqrt{SINR(\alpha, \sigma_{I+N}^2)} |I|) \quad (10)$$

여기에서  $Q(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_x^\infty \exp(-t^2/2) dt$ 이고  $I$ 는 셀간 간섭 전력을 의미한다. 다중셀 환경에서 가산 잡음에 비하여 셀 간섭 전력이 충분히 크다고 할 때  $\sigma_{I+N}^2 \cong I$ 로 볼 수 있다. 로그노말 분포의 합의 분포 또한 로그노말 분포를 가진다고 가정할 때<sup>[11~12]</sup>, 그때의 평균과 분산을 구하는 여러 가지 방법이 고려되었으나<sup>[11~12]</sup> 본 논문에서는 Schwartz & Yeh의 방법을 고려하였다. 따라서 셀에서의 위치에 따른 평균 비트 오차확률과 평균 데이터 전송 수율은 다음과 같이 나타낼 수 있다<sup>[13~14]</sup>.

$$\int_0^\infty Q(\sqrt{SINR(\alpha_1, I)} |I|) p(I) dI \quad (11)$$

$$\int_0^\infty \alpha \log_2(1 + SINR(\alpha_1, I) |I|) p(I) dI \quad (12)$$

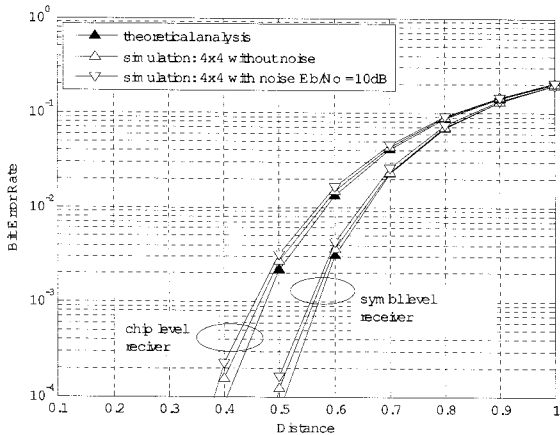


그림 3. 이론적인 비트오차확률과 실험과의 비교: 잡음 존재시 ( $E_b/N_0=10\text{dB}$ )

Fig 3. Theoretical BER compared with simulation results: noisy channel( $E_b/N_0=10\text{dB}$ ).

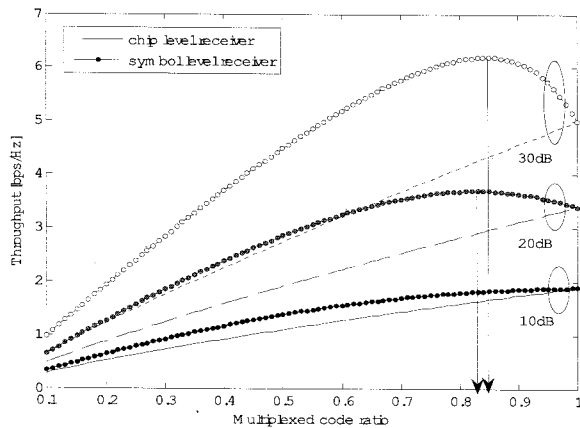


그림 4. SNR과 할당된 코드 비율에 따른 스트림별 데이터 전송 수율

Fig 4. Theoretical throughput per stream according to the multiplexed code ratio and SNR.

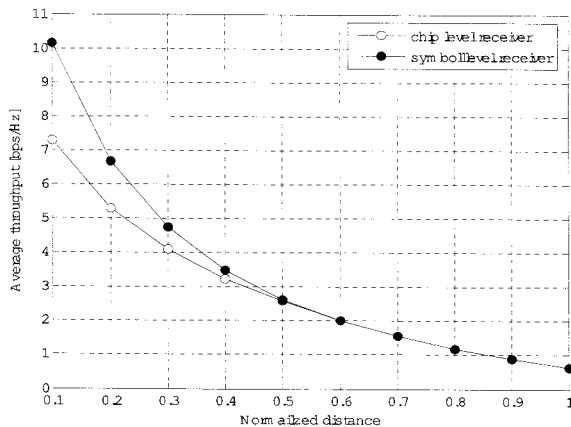


그림 5. SNR과 최적 코드 할당 비율에 따른 스트림별 평균데이터 전송 수율: 잡음 없는 상태

Fig 5. Average theoretical throughput per stream according to the optimal multiplexed code ratio and SNR: no noise condition.

여기서  $p(I)$  는 Schwartz & Yeh의 방법으로 구한 로그 노말 확률분포이다. 먼저 잡음이 있는 경우와 없는 경우에 대하여 심볼 수준의 수신기와 칩 수준의 수신기의 실험과 점근적 성능분석의 결과를 비트오차 확률 측면에서 비교한다. 그림 3은 확산 코드의 길이가 64이고 자신의 셀에 할당된 코드 수가 16이고 다른 셀에 할당된 코드 수가 32인 경우에 셀 반경에 따른 비트오차확률을 보여준다. 그림에서 보듯이 심볼 수준의 수신기와 칩 수준의 수신기 모두 이론과 크게 차이나지 않음을 알 수 있고 예상했던 바와 같이 잡음이 적을수록 셀 중심쪽의 성능이 이론값에 더 가깝게 나타남을 볼 수 있다. 단일 셀의 경우에 비해 약간의 오차가 더 나타나는 데 이는 심볼 수준과 칩 수준 모두 거의 동일한 양만큼 차이나는 것으로 보아 로그노말 분포 가정에 의한 것으로 볼 수 있다.

점근적 분석을 바탕으로 셀 반경에 따른 데이터 전송 수율을 예측해 볼 수 있다. 먼저 그림 4에서와 같이 단일 셀 환경에서 수신기의 종류와 SNR을 바꿔 가면서 확산 코드 길이 대 할당된 코드 비에 따른 데이터 전송 수율을 보면 칩수준의 수신기는 항상 할당된 코드수가 많을수록 전송 수율 또한 증가하지만 심볼 수준의 수신기의 경우는 할당코드 수가 많다고 하여 전송 수율이 증가하는 것이 아님을 볼 수 있다. 또한 SNR이 큰 경우에 심볼 수준의 수신기를 쓸수록 더 이점이 있음을 알 수 있다. 이러한 점을 고려하여 다중 셀에서는 다중 셀 측면에서의 최적의 코드할당 비율을 구하고 그때 채널의 변화에 따른 평균 데이터 전송 수율을 구하였다. 셀 중심에서는 수신기의 종류에 따른 성능 차이가 크게 나타나지만, 셀 외곽으로 갈수록 성능 차이가 없음을 볼 수 있다. 이는 단일 셀의 경우 높은 SNR에서 두 수신기의 성능 차이가 더 많이 나는 것과 일맥상통한다.

## V. 결 론

본 논문은 다중 셀환경에서 두 가지의 MMSE 수신기를 가지는 MIMO MC-CDMA 시스템의 점근적 성능을 분석하였다. 안테나 수는 한정되어 있지만 확산코드의 길이가 무한대로 간다는 가정하에 단일 셀에서의 점근적 분석을 확장하였다. 여기에서 심볼 수준의 수신기의 경우 다른 셀의 코드 간섭 성분이 대각 성분의 값이 다른 대각행렬로 남게 되는데 이를 mean square 측면에서 간섭 전력을 크기로 갖는 항등행렬로 수렴함을 보임으로써 단일 셀에서의 점근적 분석을 다중 셀에서도 적용할 수 있음을 보였다. 칩 수준의 수신기의 경우 셀

간 간섭 성분이 다른 셀 전력의 합으로 표현 되어 단일 셀의 결과를 잡음 전력 부분만을 바꾸어 단순 확장할 수 있었다. 즉 확산 코드 길이가 무한대로 갈 때 셀 간섭 전력이 주어진 경우 출력 SINR이 특정 값으로 접근함을 보이고, 다중 셀에서의 거리에 따른 느린 페이딩을 로그노말 분포를 가정하여 구한 이론적인 비트오차 확률과 실험을 비교하여 비슷함을 보였다. 점근적 성능에 의한 데이터 전송 수율을 셀의 반경에 따른 성능을 예측하였다.

### 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,
- [4] W. Lee, B. G. Lee and K. B. Lee, and S. Bahk, "An OFDMA-Based Next-Generation Wireless Downlink System Design with Hybrid Multiple Access and Frequency Grouping Techniques," Journal of Communicatios and Networks, Vol. 7, No. 2, pp. 115-125, June 2005.
- [5] K. Mori, H. Kobayashi "Frequency Band and Time Slot Selection Scheme for Downlink Packet Communications in Cellular Band Division MC-CDM Systems," IEICE Trans. on Communications, Vol. E87-B, No. 5, pp. 1114-1122, May. 2004.
- [6] H. Son and S. Lee, "Forward-Link Capacity Analysis for MC-CDMA," IEICE Trans. on Communications, Vol. E88-B, No. 2, pp. 1-3, Feb. 2005.
- [7] Kyeongyeon Kim, Seijoon Shim, Jaesang Ham and Chungyong Lee, "Asymptotic Analysis of Downlink MIMO Multicarrier CDMA systems with a Minimum Mean Square Error Receiver," Proc. IEEE VT Conf., May 2006.
- [8] 김경연, 심세준, 함재상, 이충용, "MIMO MC-CDMA 수신기 출력의 점근적 양상" 대한전자 공학회 논문지, 제 44권 TC편 제4호, 10-16쪽, 2007년 4월.
- [9] 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.
- [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] A. Safak, "Statistical Analysis of the Power Sum of Multiple Correlated Log-Normal Components," IEEE Trans. on Vehicular Technology, Vol. 42, No. 1, pp. 58 - 61, Feb. 1993.
- [12] N. C. Beaulieu and Q. Xie, "An Optimal Lognormal Approximation to Lognormal Sum Distributions," IEEE Trans. on Vehicular Technology, Vol. 53, No. 2, pp.479-489, Mar. 2004.
- [13] 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.
- [14] S. Verdu and S. Shamai, "Spectral Efficiency of CDMA with Random Spreading," IEEE Trans. on Information Theory, Vol. 45, No. 2, pp. 622-640, Mar. 1999.

### 저 자 소 개

김 경 연(학생회원)

제 44권 TC편 제4호 참조

함 재 상(학생회원)

제 44권 TC편 제4호 참조

이 충 용(정회원)

제 44권 TC편 제4호 참조