

논문 2009-46TC-4-10

# MIMO-OFDM 시스템을 위한 효율적인 시스템 레벨 시뮬레이션 기법

(Efficient System Level Simulation Method for MIMO-OFDM System)

김민훈\*, 고영채\*\*, 전태현\*\*\*

(Minhoon Kim, Young-Chai Ko, and Taehyun Jeon)

## 요약

본 논문에서는 다중 셀 환경에서 MIMO-OFDM 기반 시스템을 위한 효율적인 시스템 레벨 시뮬레이션 방법을 제안한다. 실제 시스템에서 셀의 구조, 라디오 채널의 특성, 사용자의 이동성이 미치는 영향에 대해 분석하며, 특별히 사용자의 이동성에 따른 시스템 레벨에서의 성능영향을 채널이득과 이동거리, 두 가지 측면에서 모두 고려한다. 다양한 시스템 환경에 따른 영향을 MIMO-OFDM 구조를 가지는 시스템에 적용하여 수신 SINR을 구하는 과정을 제시한다. 링크레벨 시뮬레이션을 통하여 얻은 수신 SNR에 대한 성능곡선을 기초로 하여, 시스템 환경의 변화에 따른 확장이 용이하고 시뮬레이션 복잡도가 낮은 시스템 레벨 시뮬레이션 방법을 제안한다. 다양한 모바일 셀룰러 환경 파라미터에 따른 성능의 변화가 제안된 시뮬레이션을 통하여 얻어지며 그 결과는 셀 중심에 위치한 기지국과 사용자간의 거리에 따른 패킷오류율을 기반으로 분석된다.

## Abstract

This paper proposes an efficient system level simulation method for MIMO-OFDM based system in the multi-cell environment. The proposed method analyzes effects of the cell structure, radio channel characteristics and user mobility. The user mobility effect on the system level performance is considered in both channel gain and distance. The receiver SINR calculation procedure is presented in the system which adopts MIMO-OFDM scheme under various system environments. This method can be flexibly extensible to various system environments and provides computationally efficient system level simulation technique which utilizes link level performance analysis. Extensive computer simulation results are presented to obtain the system performance in the various mobile cellular channels using the proposed method. Also this results are analyzed based on the packet error rate for different distances between the base station located in the center of the cell and the mobile user.

**Keywords:** system-level simulation, channel modeling, link-level simulation, MIMO-OFDM, cellular system

## I. 서론

유비쿼터스 시대의 도래와 더불어 언제 어디서나 사

용자가 원하는 멀티미디어 데이터에 대한 수요가 증가함에 따라 모바일 환경에서 신뢰성 있는 고속 데이터 전송기술에 대한 요구가 증가하고 있다. 이러한 다양한 멀티미디어 데이터 수요를 충족시키기 위한 차세대 이동통신 네트워크를 구축하기 위해서 전 세계적으로 많은 연구가 이루어지고 있다. 현재 논의되고 있는 차세대 이동통신 네트워크는 단일 통신 네트워크가 아닌, 서로 다른 네트워크를 복합적으로 운영하는 것을 목표로 하고 있으며 이동 중에 100Mbps, 정지 중에는 1Gbps급의 전송속도를 제공할 수 있는 전송기술을 요

\* 정회원, 삼성전기

(Samsung Electro-Mechanics)

\*\* 정회원, 고려대학교 전기전자전파공학부

(School of Electrical Eng. Korea University)

\*\*\* 정회원, 서울산업대학교 전기공학과

(Dept. of Electrical Engineering, Seoul National University of Technology)

접수일자: 2009년2월10일, 수정완료일: 2008년4월6일

구하고 있다. 이러한 요구를 충족시킬 수 있는 차세대 무선 통신을 위한 기술로 Orthogonal Frequency Code Division Multiplexing (OFCDM)<sup>[1]</sup>과 OFDM 방식을 채용한 시스템이 검토되고 있다. 또한 주파수 자원이 한정되어 있는 상태에서 전송 속도를 높이기 위해서는 주파수사용 효율을 높여야 하는데 이를 위해 MIMO (Multi-Input Multi-Output) 방식이 결합된 시스템이 제안되고 있다<sup>[2]</sup>. MIMO 채널의 사용을 위해서 Bell Laboratories layered space time (BLAST)와 같은 전송 방식이 제안되었다. MIMO 채널의 수신단에서는 Maximum Likelihood Detection (MLD)<sup>[3~4]</sup>이 BLAST<sup>[2~5]</sup>나 Minimum Mean Squared Error (MMSE)보다 비트 오류 확률 면에서 더 좋은 성능을 나타낸다는 것은 이미 알려진 사실이지만 복잡도가 변조 형태와 안테나의 개수에 따라 지수적으로 증가하기 때문에 실제 통신 시스템에서 구현하기 힘들다. MLD의 문제점인 복잡도를 줄이기 위한 방안으로 M-algorithm과 QR decomposition을 사용한 QRM-MLD가 존재한다<sup>[6]</sup>.

시스템의 성능 분석은 링크레벨의 성능분석과 시스템 레벨의 성능분석으로 나누어 질 수 있다. 링크레벨 성능분석은 하나의 송신기와 하나의 수신기 사이의 연결을 가정하고 주어진 조건에 맞춰 채널과 시스템을 설계한다. 이러한 링크레벨 시뮬레이션 (Link Level Simulation, LLS)을 통하여, 우리는 최대 전송률을 분석하거나 전송률에 따라 요구되는 신호 대 잡음 비 (Signal to Noise Ratio, SNR)를 구하게 된다. 그러나 실제 시스템에서는 다수의 셀과 다수의 사용자가 존재하며, 이에 따라 같은 주파수대의 채널을 함께 사용하는 사용자 간의 간섭인 Co-Channel Interference (CCI)가 존재하게 된다. 또한 전송 시 셀 중앙에 위치한 base-station (BS)와 사용자의 거리에 따른 신호의 전송전력 역시 감소하게 된다. 이러한 실제 환경에서 시스템의 성능을 확인하기 위한 방법이 시스템 레벨 시뮬레이션 (System Level Simulation, SLS)이다. 시스템 레벨 성능분석을 하기 위하여, 다중 셀과 다중 사용자 등 실제 시스템의 환경에 따른 영향을 링크레벨 시뮬레이션 시 고려하는 방법이 가장 정확한 결과를 보여줄 수 있을 것이다. 하지만 이러한 방법은 복잡도가 매우 큰 오늘날의 시스템에 적용하기에는 시뮬레이터의 계산상의 복잡도와 시뮬레이션 시간이 큰 문제가 될 수 있다. 그러므로 그 대체 방법으로, 일반적으로 링크 레벨 시뮬레이션을 통하여 얻은 결과를 이용하여, 시스템 레

벨 시뮬레이션을 진행한다. 여기서 주어진 링크레벨 성능분석 결과를 어떻게 이용하는 것인가가 중요한 문제가 될 수 있다.

본 논문에서는 차세대 이동통신네트워크의 요구사항을 만족시킬 수 있는 기가비트급 전송시스템을 기초로 하여, 다중 셀 환경과 이동성을 가지는 단일 사용자를 고려한 시스템 환경에서의 효율적인 시뮬레이션 방법을 소개하고자 한다.

## II. 물리계층 시스템 모델

주파수 자원이 한정되어 있는 상태에서 높은 전송속도를 얻기 위한 방법으로는 여러 개의 안테나를 이용하여 주파수이용효율을 높일 수 있는 MIMO 기술과 OFDM에서 많은 sub-carrier를 이용하는 방법이 존재한다. 본 논문에서는 기가비트급 전송시스템에 대한 시스템레벨 성능분석을 위하여 최대 각 8개의 송수신 안테나를 이용하며,  $N_{sub}$ 개의 sub-carrier를 이용한 MIMO-OFDM 시스템을 가정한다. 수신단에서는 많은 수의 안테나로부터 수집되는 신호로부터 데이터 복원을 위하여 소요되는 계산상의 높은 복잡도를 해결하기 위하여 QRM-MLD<sup>[7]</sup>와 ZF 기법을 가정한다. 데이터를 고속으로 처리하기 위하여 부호화와 복호화의 병렬처리가 가능한 LDPC<sup>[8]</sup>를 이용한다. 5GHz의 반송 주파수에서 40MHz의 주파수 대역 3개, 총 120MHz를 사용한다. 또한 120MHz의 대역폭을 가지는 신호를 3개의 40MHz 샘플링 주파수로 병렬 처리함을 가정한다. 이러한 시스템을 기반으로 정지상태에서 최대 3.6Gbps의 전송속도를 보장하는 시스템을 가정한다. 하나의 패킷은  $N_{sym}$ 개의 OFDM 심볼로 이루어져 있으며,  $N_{pre}$ 개의 OFDM 심볼로 이루어진 프리앰블 구간과  $N_{data}$ 개의 OFDM 심볼로 이루어진 데이터 구간으로 나뉜다. 각각의 송신안테나에서 전송되는 프리앰블 구간의 심볼은 공간상에서 서로 직교하는 파일럿으로 이루어져 있으며, 이는 MIMO 채널추정에 이용된다. 하나의 OFDM 심볼은  $N_{sub}$  개의 데이터 샘플과  $N_{GI}$  개의 보호구간 샘플로 이루어져 있다. 이러한 시스템에 사용자의 이동에 따른 채널의 영향을 고려하기 위하여 본 논문에서는 시간에 따라 변화하는 채널을 생성하여<sup>[9]</sup>, 실제 링크레벨 시뮬레이션 시 고려해 주었다. 하나의 전송안테나에서 하나의 수신안테나로의 전송을 시간 도메인에서 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$y_n = p_n * x_n + w_n \quad (1)$$

$$= \sum_{l=0}^{K_{path}} p_l \cdot x_{n-l} + w_n.$$

여기서 ‘\*’는 길쌈연산(convolution)을 나타낸다.  $n \in \{0, 1, 2, \dots, N-1\}$  은 시간에 대한 샘플의 인덱스를 의미하며,  $N$ 은 한 패킷의 전체 길이로  $N=N_{sym} \times (N_{sub}+N_{GI})$  값을 가진다.  $y_n$ 은 샘플 인덱스  $n$ 에서의 수신 샘플 데이터이며  $x_n$ 는 샘플 인덱스  $n$ 에서의 전송 샘플 데이터이다.  $K_{path}$ 는 다중 경로의 수를 나타낸다.  $x_{n-l}$ 는  $l$ 번째 다중경로 ( $P$ )를 통해 들어오는 샘플 인덱스  $n-l$ 에서의 전송 신호가 된다.  $w_n$ 은 부가 백색 가우스 잡음(Additive White Gaussian Noise, AWGN) 이를 의미한다. 위의 수식을 전체 샘플 인덱스에 대하여 정리하면 와같이 매트릭스 형태로 나타낼 수 있다.

$$y = p_x + w$$

$$y = [y_{N-1} \ y_{N-2} \ \dots \ y_0]^T$$

$$p = \begin{bmatrix} p_0 & p_1 & \dots & p_{K_{path}} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & p_0 & p_1 & \dots & p_{K_{path}} & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \ddots & \dots & \dots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & p_0 & p_1 & \dots & p_{K_{path}} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$x = [x_{N-1} \ x_{N-2} \ \dots \ x_0 \ \dots \ x_{-K_{path}}]^T$$

$$w = [w_{N-1} \ w_{N-2} \ \dots \ w_0]^T$$

여기서  $[\cdot]^T$ 는 전치행렬을 의미한다.  $y \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 와  $w \in \mathbb{C}^{N \times 1}$ 은 각각 수신신호 벡터와 잡음행렬 벡터를 나타낸다.  $x \in \mathbb{C}^{(N+K_{path}) \times 1}$ 은 전송 데이터 벡터이며  $n < 0$ 일 때  $x_n=0$ 의 값을 가진다.  $P \in \mathbb{C}^{N \times (N+K_{path})}$ 는 다중경로 채널행렬이며, 시간에 따라 변화하는 채널은 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$P = \begin{bmatrix} p_0^{N-1} & p_1^{N-1} & \dots & p_{K_{path}}^{N-1} & 0 & \dots & 0 \\ 0 & p_0^{N-2} & p_1^{N-2} & \dots & p_{K_{path}}^{N-2} & \dots & 0 \\ 0 & \dots & \ddots & \dots & \dots & \ddots & 0 \\ 0 & \dots & 0 & p_0^0 & p_1^0 & \dots & p_{K_{path}}^0 \end{bmatrix} \quad (3)$$

서로 다른 샘플 인덱스를 가지는 다중 경로 채널  $p_k^n$ 과  $p_k^{n'}$ 은 사용자의 이동성에 따라  $J_0(2\pi f_m \tau_{n'-n})$ 의 상관(correlation)값을 가지게 된다 ( $n' > n$ )<sup>[2]</sup>. 최대 도플러 주파수 (doppler frequency)  $f_m$  은,  $f_m=v/\lambda_c=(v \cdot f_c)/c$  (Hz)으로 주어지며,  $v$ 는 사용자의 이동속도(m/s),  $\lambda_c$ 는 반송 파장(m),  $f_c$ 는 반송 주파수(Hz),  $c$ 는 빛의 속도( $3 \times 10^8$  m/s)를 나타낸다.  $\tau_{n'-n}$ 는  $n'$ 과  $n$ 의 샘플 인덱스 차

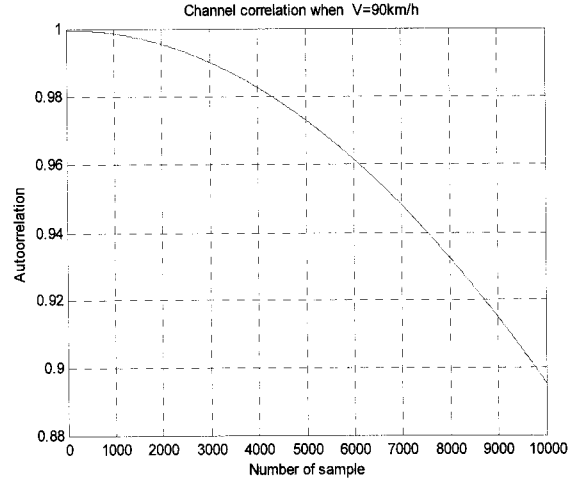


그림 1. 채널의 샘플간격에 따른 자기상관값  
Fig. 1. Autocorrelation for varying sample interval.

표 1. 링크레벨 시뮬레이션 파라미터 값  
Table 1. Parameters for link-level simulation.

Simulation parameter	Value
반송 주파수( $f_c$ )	5GHz
샘플링 주파수( $f_s$ )	40MHz
OFDM 심볼 수( $N_{sym}$ )	10
프리앰블 심볼 수( $N_{pre}$ )	8
데이터 심볼 수( $N_{data}$ )	2
Sub-carrier 수( $N_{sub}$ )	256
보호구간 샘플 수( $N_{GI}$ )	32
다중경로 수( $N_{path}$ )	10

이에 따른 시간 차이를 의미하며,  $\tau_{n'-n}=(n'-n)/f_s$ 로 주어진다.  $f_s$ 는 샘플링 주파수이며 40MHz의 값을 가진다.

그림 1은 본 시스템에서 사용자의 이동속도가  $v=90$ km/h일 때의 시변하는 채널 값의 실수부 (또는 허수부)의 샘플간의 상관 정도를 보여준다. 링크레벨 시뮬레이션에서 사용된 변수의 값들은 표 1과 같다.

그림 2는, 전송률 0.75Gbps에서의 사용자의 이동속도에 따른 패킷오류율 (Packet Error Rate, PER) 성능곡선을 보여준다. 0.75Gbps의 경우 두 개의 독립된 데이터 그룹에 속한 모든 데이터 스트림들을 QPSK 변조방법과 부호화 비율 1/2을 통하여 얻을 수 있다. 사용자가  $v=90$ km/h로 이동할 때, 이동성이 없을 때에 비하여 0.3dB정도 성능이 열화 됨을 확인할 수 있다. 낮은 변조 단계로 인하여 성능 열화가 상대적으로 적게 나타나게 된다. 하지만 높은 단계의 변조방법을 필요로 하는 높은 전송률에서는, 속도에 의한 성능저하는 점차 증가할 것이다.

그림 3은 전송률 2.64Gbps에서의 PER 성능곡선이다.

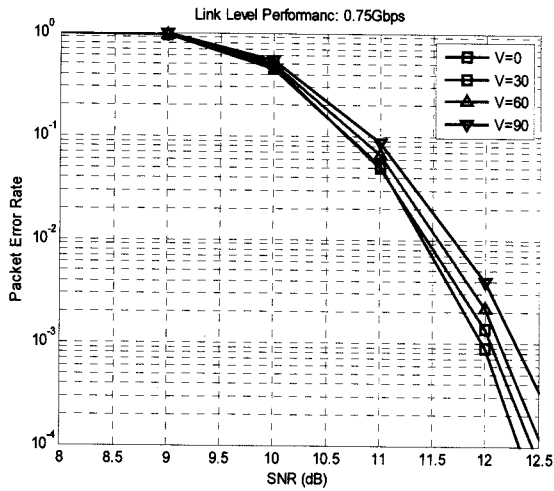


그림 2. 0.75Gbps에서의 이동성에 대한 LLS 성능  
Fig. 2. LLS for user velocity (0.75Gbps).

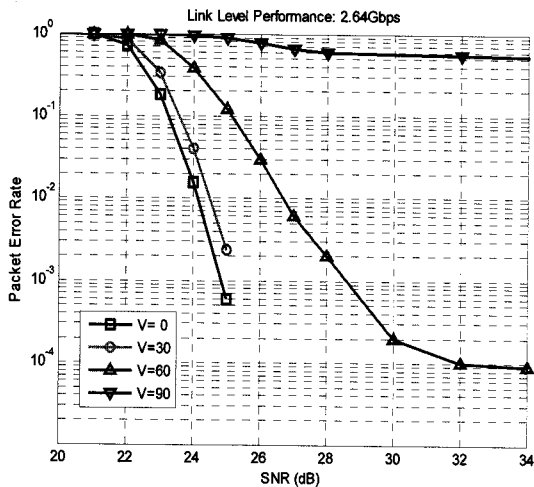


그림 3. 2.64Gbps에서의 이동성에 대한 LLS 성능  
Fig. 3. LLS for user velocity (2.64Gbps).

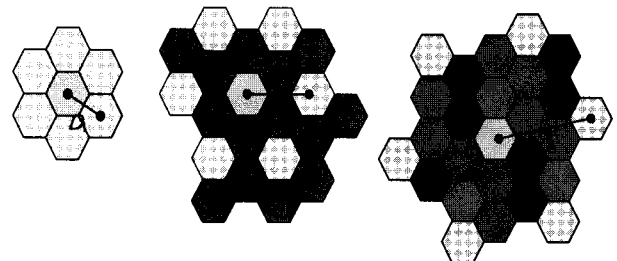
2.64Gbps의 경우, 각 데이터 그룹의 스트림들은 16QAM과 1/2, 64QAM 과 2/3의 변조방법과 부호화 비율을 가진다. 전송률 0.75Gbps의 경우와는 달리, 사용자의 속력에 따라 큰 성능저하를 보이고 있으며, 60km/h속력에서는  $PER=10^{-4}$  근처에서 error floor가 발생함을 알 수 있다. 이러한 성능열화의 원인은 64QAM의 높은 변조단계의 이용으로 인한 채널추정오류의 영향의 증대이다. 높은 변조단계에서는 채널의 정확도가 매우 중요하다. 속도의 증가로 인하여 채널 추정 오류가 커졌으며 이러한 채널 추정 오류 값들이 낮은 변조레벨을 가지는 0.75Gbps비해 성능에 매우 큰 영향을 미치기 때문이다. 다음 절에서는 위 방법으로 얻은 성능 곡선을 기초로 하여 실제 시스템에 적용하기 위한 시스템 레벨 시뮬레이션 방법에 대해 논의한다.

### III. 다중 셀 환경에서의 시스템 모델

본 절에서는 셀 구조, 채널환경, 사용자의 이동성 등의 시스템 레벨 환경에 대하여 논의한다. 또한 이러한 환경에서의 수신 SINR을 얻는 과정을 설명하며, 이를 통하여 시스템 레벨 성능분석 방법을 논의한다. 본 절에서는 효율적인 시스템 레벨 시뮬레이션을 위하여 다중 셀 환경에서 단일 사용자를 고려하고, 현재 속한 셀 안에서의 사용자의 이동성과 연속적인 패킷 전송을 가정한다. 통화 채널 전환 (hand-off)은 고려하지 않았다.

#### 1. 셀의 구조

주파수 재사용률 (reuse factor) 에 따른 co-channel interference (CCI) 의 영향을 확인하기 위하여, 3 그리고 7의 재사용률의 다중 셀 환경을 고려한다. 각각의 재사용률에 따른 셀의 구조는 그림 4와 같다. 재사용률에 따라 같은 채널을 사용하는 셀 중앙 BS간의 거리가  $D_1, D_2, D_3$ 가 되며, 한 사용자는 주변 6개의 셀에 의한 간섭



(a) 재사용률=1 (b) 재사용률=3 (c) 재사용률=7

그림 4. 주파수 재사용률에 따른 셀 구조  
Fig. 4. Cell structure for various frequency.

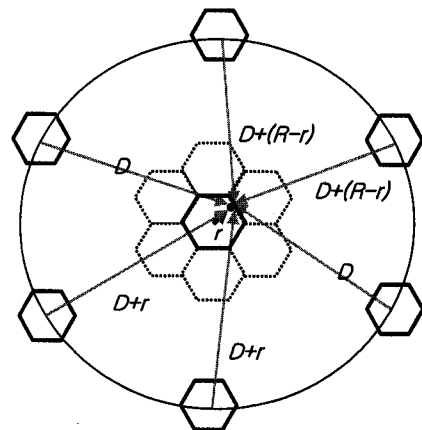


그림 5. 동일 주파수 채널을 사용하는 셀간의 대략적인 거리  
Fig. 5. Approximated distances between cells using the same channel.

을 받게 된다. 셀의 반경  $R$ 은 100m, 300m, 500m인 경우를 고려하며, 모든 경우에 대하여  $D_1=2R, D_2=3R, D_3=5R$ 을 가정한다. 셀의 재사용률이 증가함에 따라 주변 동 채널 셀 간의 거리가 증가함을 알 수 있다. 그러므로 재사용률이 증가함에 따라 수신 SINR (signal to interference and noise ratio) 값이 증가함을 예상할 수 있다. 하지만 셀의 재사용률의 증가는 사용 가능한 주파수 대역폭을 감소시키며 보다 많은 BS를 필요로 한다는 단점을 가지고 있다. 시뮬레이터 구현의 단순화를 위하여, 사용자가 통신 중인 BS 와  $r$ 의 거리에 있을 때 나머지 6개의 동 채널의 BS와의 거리는 그림 5와 같이 근사화될 수 있다.

2. 무선 채널 환경

무선 주파수 채널은 Rayleigh 분포를 따르며 전파감쇠(propagation loss), shadow fading 의 영향을 고려해 주었다. BS 에서  $r$ 만큼 떨어진 사용자의 무선주파수 채널의 수신신호 전력은 다음과 같이 나타낼 수 있다<sup>[10]</sup>.

$$\Omega_{P(dBm)}(r) = \mu_{\Omega(dBm)}(r_0) - 10 \cdot \beta \log_{10}(r/r_0) + \varepsilon_{(dB)}(dBm) \quad (4)$$

$\mu_{\Omega(dBm)}(r_0)$ 는 기준거리  $r_0$ 에서 수신된 신호의 평균 전력을 의미하며, 변수  $\beta$ 는 전파감쇠(propagation loss) 지수이다.  $\beta$ 값은 실제 실험을 통하여 그 값을 얻을 수 있으며, 도시에서는 4.0 정도의 값을 가진다.  $\varepsilon_{(dB)}$ 는 dB영역에서 평균값 0을 가지는 가우시안 분포 (Gaussian distribution) 를 따르는 임의의 변수로서 shadow fading 영향을 나타내어 준다.  $\Omega_{p(dBm)}(r)$ 는 다음의 가우시안 분포를 가진다.

$$P_{\Omega_p(dBm)}(r)(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_{\Omega}} \exp\left\{-\frac{(x - \mu_{\Omega_p(dBm)}(r))^2}{2\sigma_{\Omega}^2}\right\} \quad (5)$$

여기서  $\mu_{\Omega_p(dBm)}(r)$ 는 전파감쇠에 의한 거리  $r$ 에서의 수신 신호의 평균 전력을 의미하며, 다음 값을 가진다.

$$\mu_{\Omega_p(dBm)}(r) = \mu_{\Omega_p(dBm)}(r_0) - 10\beta \log_{10}(r/r_0) \quad (dBm) \quad (6)$$

일반적으로 마이크로셀 환경에서는 shadow fading 표준편차  $\sigma_{\Omega}$ 는 10dB값을 가지며 BS 와 사용자 사이의 거리와는 상관없이, 주변 환경에 영향을 받는 것으로 알려져 있다. 마이크로셀에서의  $r_0$ 은 100m로 가정한다<sup>[10]</sup>.

3. 사용자의 이동성

사용자의 이동성은 시간에 따른 채널의 변화를 발생시키며 이로 인한 채널 추정 오류 증가 등으로 인하여 시스템 성능에 많은 영향을 미친다. 본 절에서는 이동성에 의한 채널 추정 오류의 영향뿐만 아니라, 추가적으로 시스템 레벨 시뮬레이션 시 중요한 변수인, 거리의 변화에 대한 영향을 논의한다. 거리는 전파감쇠의 정도를 결정하는 변수이며, 나아가 수신 SINR 값에도 영향을 준다. 사용자와 BS사이의 거리는 사용자의 이동성에 의해 달라진다. 이동속도와 이동 방향, 그리고 연속된 데이터 패킷의 수에 따라 거리 변화의 정도가 달라진다.

여기서는 한 명의 사용자에게 연속적인 데이터 패킷 전송을 가정하였으며, 전송 중에는 속도가 일정함을 가정하였다. 연속적으로 전송되는 패킷간 전송시간 차이에 의한 거리 변화를 고려하였으며, 하나의 패킷 전송 시간 동안의 거리변화는 무시하였다.

그림 6과 같이 사용자가 BS와의 일직선에 대하여  $\theta$ 의 방향을 가지고(접선방향)  $v$ 의 속도로 이동할 경우,  $l$ 번째 데이터 패킷의 수신 위치의 변화는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$l \times \tau_N[s] \times v[m/s] \times \cos\theta \quad (7)$$

여기서,  $\tau_N$ 은 하나의 패킷을 전송하는데 소요되는 시간을 나타낸다. 같은 원주상의 거리 변화는 전파감쇠에 영향을 거의 주지 못하므로 고려하지 않는다. 그러므로  $l$ 번째 패킷전송 시 사용자와 BS 간의 거리는 다음과 같이 표현된다.

$$r' = r - l \times v[m/s] \times \tau_N[s] \times \cos\theta \quad (8)$$

여기서  $r$ 은 BS와 사용자의 처음 위치 사이의 거리이며,  $r'$ 는  $l$ 번째 패킷전송 후의 거리를 나타낸다.

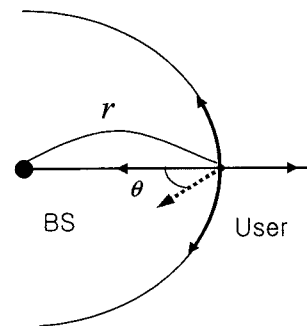


그림 6. 사용자의 이동방향에 따른 거리변화  
Fig. 6. Distance variation for moving direction.

#### 4. SINR 계산

시스템 레벨 시뮬레이션은 링크레벨 시뮬레이션 결과와 앞에서 살펴본 다양한 시스템 레벨 시뮬레이션 효과들을 결합하여 얻을 수 있다. 시스템 레벨 시뮬레이션 효과들을 고려하여 수신 SINR을 얻으며 이 수신 SINR을 링크레벨 시뮬레이션 결과와 비교하여 적합한 PER값을 얻는다. 이제 MIMO-OFDM 시스템에서 수신 SINR 값을 얻는 과정을 논의한다.

BS는  $N_t$ 개의 안테나를 가지며, 사용자는  $N_r$ 개의 안테나를 가지고 있다고 가정한다.  $N_{cell}$  개의 주변 동 채널 셀을 가지는 경우를 가정한다. 셀의 구분을 위하여  $c \in 0, 1, 2, \dots, N_{cell}$  사용되는 새로운 변수는 동 채널을 가지는 셀의 인덱스를 의미하며, 사용자가 속해 있는 셀을  $c=0$  의 경우로 가정한다. BS 가  $N_t$ 개의 안테나를 모두 이용하여 데이터를 전송하는 경우, 한 개의 수신 안테나에서의 수신된 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$y = \mathbf{h}_0^T \mathbf{x}_0 + \sum_{c=1}^{N_{cell}} \mathbf{h}_c^T \mathbf{x}_c + w_0 \quad (9)$$

여기서  $\mathbf{h}_c \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$ 는  $c$ 번째 셀의 BS에서 사용자의 단일 수신안테나 사이의 채널을 의미하며,  $\mathbf{h}_c = [h_{c,1}, h_{c,2}, \dots, h_{c,N_t}]^T$ 로 구성된다.  $\mathbf{x}_c \in \mathbb{C}^{N_t \times 1}$ 는  $c$ 번째 셀의 BS에서 전송된 데이터 벡터를 의미하며,  $w_0$ 은 평균값 0과 분산값  $N_0/2$ 을 가지는 AWGN을 의미한다. 각 채널 값은 III-2에서 정의한 무선채널환경을 따른다. 이런 경우  $\mathbf{h}_0^T \mathbf{x}_0$ 은 사용자가 속해있는 BS로부터 수신된 신호를,  $\sum_{c=1}^{N_{cell}} \mathbf{h}_c^T \mathbf{x}_c$ 은 간섭을 의미한다. 이 경우 하나의 수신 안테나에서의 SINR 값은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{SINR} = \frac{|\mathbf{h}_0^T \mathbf{x}_0|^2}{\sum_{c=1}^{N_{cell}} |\mathbf{h}_c^T \mathbf{x}_c|^2 + N_0} \quad (10)$$

이제 식(10)의 SINR값을 시스템 레벨 시뮬레이션과 연결시키기 위한 과정을 설명한다.  $\|\mathbf{x}_c\|^2$ 의 값을 전체 전송 전력  $P_t$ 라고 한다면, 하나의 전송 안테나에서 기준거리  $r_0$ 에서의 평균 전력은

$$\mu_{\Omega(\text{dBm})}(r_0) = \frac{P_t}{N_t} + G_{ch} \quad (11)$$

값을 가지게 된다. 여기서  $G_{ch}$ 는 채널이득을 의미하며, 하나의 수신 안테나로의 채널이득의 평균값이  $E[\sum_{j=1}^{N_t} G_{ch,j}] \approx 1$ 임을 가정한다. 연산자  $E[\cdot]$ 은 통계적 평균값을 나타낸다. 평균 수신전력  $\mu_{\Omega(\text{dBm})}(r_0)$ 는 전파감쇠나 shadow fading의 영향을 받지 않는 값이다. 그러므로  $c$ 번째 셀 BS의  $j$ 번째 안테나에서 사용자의 하나의 수신 안테나까지의 채널( $h_{c,j}$ )을 통한 신호의 전력은 식 (4)에 따라 다음과 같이 dBm 단위로 나타낼 수 있다.

$$\Omega_{P(\text{dBm})}(d_c) = \mu_{\Omega(\text{dBm})}(r_0) - 10\beta \log_{10}\left(\frac{d_c}{r_0}\right) + \epsilon_{(\text{dB})} \quad (12)$$

여기서  $d_c$ 는  $c$ 번째 셀의 BS에서 사용자까지의 거리를 의미한다. 수신 신호 전력  $\Omega_{P(\text{dBm})}(d_c)$ 는 평균값  $\mu_{\Omega(\text{dBm})}(d_c)$ 을 가지며 표준편차  $\sigma_{\Omega}$ 을 가지는 로그 정규분포를 따른다. 그러므로 시스템 레벨 시뮬레이션에서의 수신된 신호의 SINR은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{SINR} = \frac{\sum_{j=1}^{N_t} 10^{\Omega_{p(\text{dBm})}(d_0)/10}}{\sum_{c=1}^{N_{cell}} \sum_{j=1}^{N_t} 10^{\Omega_{p(\text{dBm})}(d_c)/10}} + N_0 \quad (13)$$

위와 같은 과정을 통하여, 얻은 하나의 수신 안테나에서의 SINR 값을 전체 수신 안테나에 대하여 모두 구한 후 그 평균값을 최종 수신 SINR 값으로 취한다. 연속적인 데이터 패킷전송에 대하여 이동성에 의한 거리변화의 영향 외에, 전송 패킷 단위로 시변하는 채널이득( $G_{ch}$ )을 얻을 수 있으며 이 경우 연속된 패킷들 간 채널 상관 값은  $J_0(2\pi f_m \tau_N)$ 이 된다<sup>[9]</sup>. 연속적인 데이터 전송의 경우 전송 패킷별로 얻어진 채널이득과 거리차이에 의하여 SINR 값이 변하게 된다. 이렇게 얻은 패킷별 수신 SINR 값을 링크레벨 시뮬레이션을 통하여 얻은 성능곡선에 대응시켜, 주어진 SINR에서의 PER값을 얻는다. 그 후 0과 1 사이의 임의의 수를 생성하여 주어진 PER값 보다 작은 값이 나오면 시스템레벨 시뮬레이션에서 수신 패킷 오류가 발생했다고 결정한다.

#### IV. 시뮬레이션 결과

이 절에서는 제안된 시뮬레이션 방법에 따른 시뮬레이

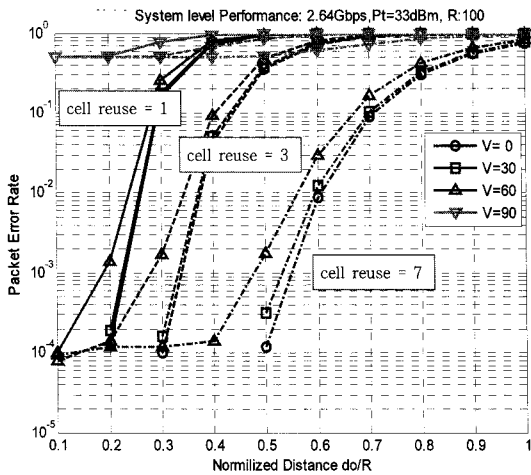


그림 7. 재사용률에 따른 SLS 성능(2.64Gbps)  
Fig. 7. SLS for reuse factor (2.64Gbps).

선 결과를 보여준다. 그 결과는 셀 중심에 위치한 지구국과 사용자간 거리를 셀의 반경으로 정규화된 거리 ( $d_0/R$ )에 따른 패킷오류 확률 값으로 나타내 주었다. 그림 2와 그림 3의 링크레벨 시뮬레이션 결과를 이용하였으며, III-4에서 살펴본 방법에 의하여 수신 SINR을 구해주었다. 기본적인 변수들의 값은 표 1의 값을 가지며 시스템레벨 환경변수  $\beta = 4.0, r_0 = 100m, \sigma_{\Omega} = 10dBm$ 을 가정하였다<sup>[11]</sup>. 그림 7은 2.64Gbps에서의 링크레벨 시뮬레이션 결과 (그림 3)를 기반으로  $R=100m, P_t=33dBm$ 의 경우에 대한 시스템레벨 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 사용자의 이동속도는 0, 30, 60 및 90km/h의 4가지 경우를 고려하였으며 셀 재사용률 1, 3, 7에 대한 PER 값을 보여준다. 그림 7에서 셀 재사용률이 커짐에 따라  $PER=10^{-4}$ 값을 만족하는 셀 커버리지가 증가함을 알 수 있다. 셀 커버리지는 일정 성능을 유지하면서 운영 가능한 셀 중심에서 사용자까지의 거리를 말한다. 이는 셀의 재사용률이 증가함에 따라 주변 동 채널 셀간의 거리가 증가하기 때문이며, 이는 CCI를 감소시키는 결과를 가져온다. 사용자의 이동속도 60km/h인 경우, 그림 3에서와 마찬가지로  $PER=10^{-4}$ 에서 error floor가 발생하는 것을 볼 수 있다. 우리는 그림 7의 시스템 레벨 시뮬레이션 결과를 통하여 셀의 재사용률에 따라 지원 가능한 사용자의 거리( $d_0$ )와 이동속도( $v$ )를 파악할 수 있다.

그림 8은 셀의 재사용률이 3인 경우의 0.75 Gbps에 대한 시스템 레벨 시뮬레이션 결과이다.  $R=300m, 500m$ 인 경우에 대한 결과이며 사용자의 이동 속도는 0,90km/h를 가정한다. 전송파워는  $P_t=33dBm$ 로 제한한

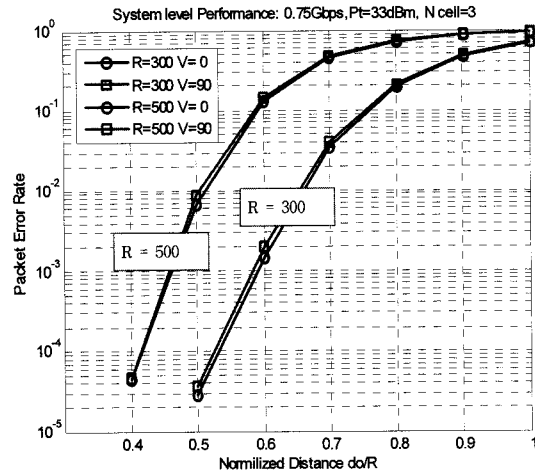


그림 8. 셀반경(R)에 따른 SLS 성능(0.75Gbps)  
Fig. 8. SLS for cell radius (0.75Gbps).

경우를 고려한다. 셀의 반경이 300m 인 경우  $PER=10^{-4}$ 을 만족시키기 위한 최대한의 사용자 거리는 150m 임을 알 수 있다. 반면 셀의 반경이 500m 인 경우  $PER=10^{-4}$ 을 만족시키기 위한 최대한의 사용자 거리가 200m임을 알 수 있다. 일반적으로 셀의 반경이 큰 경우 일정 PER 이상을 만족시키기 위한 셀반경에 대한 사용자의 정규화된 거리 ( $d_0/R$ )가 작아지는 현상을 보인다.

그림 8에서 셀의 반경이 500m 인 경우  $PER=10^{-4}$ 을 만족시키는 부분이 전체 셀의 절반이 안 된다는 것을 알 수 있다. 이런 경우 전송전력을 증가 시켜 줌으로서 성능을 향상 시킬 수가 있다. 동 채널을 사용하는 모든 BS의 전송 전력이 커지지만, CCI를 발생시키는 셀에서의 전파감쇠가 현재 통신중인 셀에서의 전파감쇠보다 상대적으로 크기 때문에 수신 SINR이 증가되게 된다.

마지막으로 그림 9에서 사용자의 이동성에 대한 영향을 알아보려고 한다. 0.75Gbps에서 셀의 재사용률이 3,  $R=100m$ 인 경우에 대하여 시스템 레벨 시뮬레이션을 수행하였다. 사용자의 이동속도는 90km/h이며 500개의 데이터 패킷의 연속적인 전송에 대한 결과를 사용자의 이동방향 ( $\theta$ )에 대하여 비교하였다.  $\theta = 180^\circ$ 는 사용자가 셀 중앙의 BS방향으로 이동하는 것을 의미하며  $\theta = 0^\circ$ 는 그 반대 방향으로의 이동을 나타낸다.  $\theta = 0^\circ$ 와  $\theta = 180^\circ$ 인 경우에 대하여 정규화된 거리 0.07정도가 차이가 남을 알 수 있으며, 이는 실제 시스템 상에서 거리 7m에 해당하는 거리이다. 시뮬레이션 결과 사용자의 이동 방향에 따라 성능의 차이가 발생함을 확인할 수 있으며 이 결과는 시스템 레벨 시뮬레이

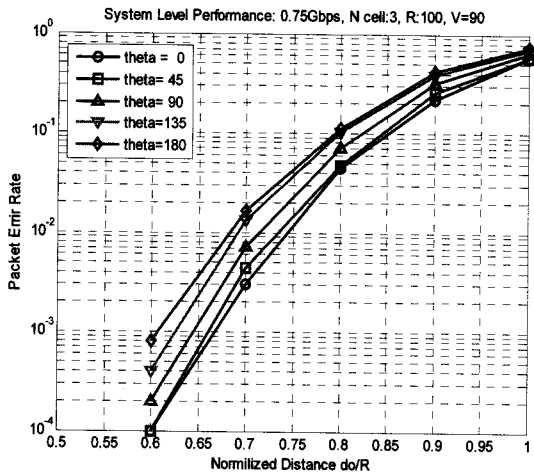


그림 9. 이동방향에 따른 SLS 성능(0.75Gbps)  
Fig. 9. SLS for moving direction (0.75Gbps).

션에서 사용자의 이동성에 의한 거리 변화에 대한 고려가 필요함을 알려준다.  $f_s$ 가 상대적으로 작은 경우나 또는 전송 패킷의 크기가 큰 경우, 많은 수의 패킷의 연속 전송이 필요한 시스템의 경우에 대해서는 이동방향에 의한 성능의 변화가 더욱 커질 것이다.

## V. 결 론

본 논문에서는 링크레벨 성능과 다양한 이동 셀룰러 채널환경을 결합한 시스템레벨 시뮬레이션을 통한 성능 분석방법을 논의하였다. 먼저 신호대 잡음비, 다중경로 확산으로 인한 지연확산, 사용자의 이동으로 인한 채널의 변화 등을 포함한 링크레벨의 성능을 MIMO-OFDM 시스템을 채택한 기가비트급 무선전송시스템을 대상으로 분석하였다. 링크레벨 시뮬레이션 결과와 실제 셀룰러 환경에서 성능에 주요한 요소로 작용하는 파라미터들을 효율적인 결합 기법을 설명하였다. 이를 위하여 멀티 셀의 셀 재사용률에 따른 시뮬레이션 환경을 보였으며, 일반적으로 시뮬레이션 시 고려해야 할 무선 채널의 특징을 분석적 방법으로 논의하였다. 또한 현재 까지 알려진 시스템 레벨 시뮬레이션 방법을 확장하여 이동성을 가지는 MIMO-OFDM 시스템에 적용하기 위한 방법을 제시하였다. MIMO-OFDM 환경에 의한 수신 SINR값을 구하는 방법을 상세히 제시하였으며, 사용자의 이동성에 따른 거리의 변화와 채널 이득의 변화를 통하여, 이동성에 의한 시스템 성능 변화를 확인하는 방법을 제안하였다. 소개된 시스템 레벨 시뮬레이션 방법들은 주어진 링크레벨 시뮬레이션 결과를 활용함으

로서, 전체 시스템 레벨 시뮬레이션 복잡도를 감소시킬 수 있으며 기존의 시스템 레벨 시뮬레이션 관련 연구에서 언급되지 않았던, 사용자의 이동성을 고려한 시뮬레이션 방법을 제안하였으며 기가비트 무선전송시스템의 성능분석에 적용하였다. 제안된 방법은 높은 데이터 전송속도와 큰 이동성을 필요로 하는 차세대 이동통신 시스템의 성능을 분석하는데 큰 도움이 될 것으로 예상된다. 또한 본 논문에서 제안된 시뮬레이션 방법은 실제 시스템 설계시 필요한 전송 전력, 셀의 반경, 셀 재사용률, 지원 가능한 이동성 등의 다양한 시스템 환경을 효율적으로 최적화하기 위한 하나의 도구로서 유용하게 활용될 수 있을 것으로 기대된다.

## 참 고 문 헌

- [1] H. Atarashi, S. Abeta, and M. Sawahashi, "Variable spreading factor orthogonal frequency and code division multiplexing (VSF-OFCDM) broadband packet wireless access," *IEICE Trans. Commun.*, vol. E86-B, no. 1, pp. 291 - 299, Jan. 2003.
- [2] G. J. Foschini, Jr., "Layered space-time architecture for wireless communication in a fading environment when using multi-element antennas," *Bell Labs Tech. J.*, pp. 41 - 59, 1996.
- [3] A. van Zelst, R. van Nee, and G. A. Awater, "Space division multiplexing (SDM) for OFDM systems," in *Proc. IEEE Veh. Technol. Conf.-Spring May 2000*, pp. 1070 - 1074.
- [4] X. Zhu and R. D. Murch, "Performance analysis of maximum likelihood detection in a MIMO antenna system," *IEEE Trans. Commun.*, vol. 50, no. 2, pp. 187 - 191, Feb. 2002.
- [5] P. W. Wolniansky, G. J. Foschini, G. D. Golden, and R. A. Valenzuela, "V-BLAST: An architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel," in *Proc. URSI Int. Symp. Signals, Syst., Electron.*, Sep. 1998, pp. 295 - 300.
- [6] K. J. Kim and J. Yue, "Joint channel estimation and data detection algorithms for MIMO-OFDM systems," in *Proc. 36th Asilomar Conf. Signals, Syst., Compute.*, Nov. 2002, pp. 1857 - 1861.
- [7] H. Kawai, K. Higuchi, N. Maeda, and M. Sawahashi, "Adaptive Control of Surviving Symbol Replica Candidates in QRM-MLD for OFDM MIMO Multiplexing," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 24, no. 6, pp. 1130-1140, Jun. 2006.



- [8] R. G. Gallager, "Low-density parity-check codes," IRE Trans. Inform. Theory, vol. IT-8, pp. 21 - 28, Jan. 1962.
- [9] D. J. Young and N. C. Beaulieu, "The Generation of Correlated Rayleigh Random Variates by Inverse Discrete Fourier Transform", IEEE Trans. Commun. vol. 48, no. 7, pp. 1114-1127, July 2000.
- [10] G.. Stuber, Principles of Mobile Communication 2nd. Boston, MA: Kluwer, 2001.
- [11] Sung Ho Moon, Jae Hoon Chung, Jae Kyun Kwon, Suwon Park, Dan Keng Sung, Sungoh Hwang, and Jung gon Kim, "System-Level Simulator for the W-CDMA Low Chip Rate TDD System" in IEEE 56th Vehicular Technology Conference, pp. 321 - 325, vol. 1, Sept. 2000.

— 저 자 소 개 —



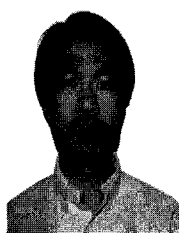
김민훈(정회원)  
 2006년 고려대학교 전자공학과  
 학사 졸업.  
 2008년 고려대학교 전자공학과  
 석사 졸업  
 2008년~현재 삼성전기

<주관심분야 : 무선통신시스템 설계 및 분석>



고영채(정회원)  
 1997년 한양대학교 전자통신  
 공학과 학사 졸업.  
 1999년 미네소타대학교  
 전기공학과 석사 졸업.  
 2001년 미네소타대학교  
 전기공학과 박사 졸업.

2001년 Research Scientist, Novatel Wireless  
 Center, San Diego, CA, USA  
 2001년~2004년 Senior Engineer, Wireless  
 Center, Texas Instruments, San Diego,  
 CA, USA  
 2004년~현재 고려대학교 전기전자전파공학과  
 부교수  
 <주관심분야 : 무선통신시스템 설계 및 분석>



전태현(정회원)-교신저자  
 1989년 연세대학교 전기공학과  
 공학사  
 1993년 University of Minnesota,  
 MS in Electrical  
 Engineering  
 1997년 University of Minnesota,  
 Ph.D. in Electrical  
 Engineering

1997년~1998년 Staff Engineer, Motorola,  
 San Jose, CA, USA  
 1998년~2001년 Member of Technical Staff,  
 Texas Instruments, San Jose, CA,  
 USA  
 2002년~2005년 한국전자통신연구원(ETRI)  
 선임연구원  
 2005년~현재 서울산업대학교 전기공학과 교수  
 <주관심분야: 유무선통신시스템, 디지털통신신호  
 처리>