

# 페이딩 채널에서 부호화된 MIMO-OFDM 시스템의 심볼 맵핑 다이버시티 성능 분석

준회원 박 원 석\*, 정회원 강 진 환\*, 종신회원 김 상 호\*

## Performance Analysis of Symbol Mapping Diversity in Coded MIMO-OFDM Systems over Fading Channels

Won Seok Park\* Associate Member, Jin Whan Kang\* Regular Member,  
Sang-Hyo Kim\* Lifelong Member

### 요 약

본 논문에서는 3GPP LTE 하향링크 표준에 기반한 BICM 시스템에서 기존의 심볼 맵핑 다이버시티를 이용한 HARQ 기술들(e.g., MDSM, CORE)을 비교 분석한다. 다중경로 페이딩 채널과 오류정정부호가 적용된 보다 실제적인 무선통신 환경을 고려함으로써 기존 기법들의 실제 시스템으로의 구현 적합성을 판단하고, 구현 복잡도 및 저장 공간을 줄이면서 이들에 준하는 프레임 오류 성능을 나타내는 간단한 기법을 제안한다. 그리고 다수의 송·수신 안테나를 이용하는 MIMO-OFDM 시스템에 다양한 심볼 맵핑 다이버시티 기법들을 적용하고, 이들의 오류 성능을 분석한다.

**Key Words** : HARQ, MIMO-OFDM, BICM, Symbol Mapping, MDSM, CORE, BCS

### ABSTRACT

In this paper, we analyse HARQ scheme that utilizes symbol mapping diversity (SMD) techniques such as MDSM and CORE. The exploitation feasibility of MDSM and CORE is evaluated in the perspective of system complexity and storage capacity as we consider a BICM system based on 3GPP LTE standards and multipath fading channels. Also, a simple method which obtains SMD effects by circularly shifting bit-block in a codeword is proposed. The experimental results performed in BICM-OFDM systems with single antenna as well as multiple antennas show that frame error rate of the proposed method is close to that of CORE while having lower complexity.

### I. 서 론

무선 통신 시스템에서 열악한 채널 환경으로 인해 발생하는 데이터의 재전송 요구를 줄이고, 전송 효율을 높이는 HARQ (hybrid automatic repeat request) 기법이 사용된다. HARQ 시스템은 오류가 발생할 경우, 원래의 패킷과 동일한 패킷을 재전송하여 수신측

에서 이를 합하여 복호하는 CC (Chase combining) 방식과 재전송시 마다 추가적인 패리티 비트를 전송하여 부호 이득을 얻을 수 있는 IR (incremental redundancy) 방식이 있다<sup>[1,2]</sup>.

HARQ 시스템에서 패킷을 재전송할 때, 서로 다른 심볼 맵핑으로 전송하여 다이버시티 효과를 얻을 수 있다. 다이버시티는 송신기와 수신기 사이에 전송 채널

\* “본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 수행되었음” (NIPA-2010-(C1090-1011-0005))

\* 성균관대학교 정보통신공학부 통신 및 부호이론 연구실 (ps0808@skku.edu, jinhwan@skku.edu, iamshkim@skku.edu)(<sup>†</sup>: 교신저자)  
논문번호 : KICS2010-02-064, 접수일자 : 2010년 2월 8일, 최종논문접수일자 : 2010년 3월 26일

널의 다양성을 확보하여 페이딩 발생 영향을 적게 해 준다. 심볼 맵핑을 활용하여 다이버시티를 얻는 방법을 심볼 맵핑 다이버시티(symbol mapping diversity)라고 한다. 이러한 심볼 맵핑 다이버시티 효과를 얻기 위한 많은 연구가 진행되었다<sup>3,6)</sup>. 전송 시마다 심볼의 유클리드 거리를 최대화 하여 성능 이득을 얻을 수 있는 심볼 맵핑 방법(MDSM: maximum distance symbol mapping)과 성상 좌표의 비트 신뢰도를 평균화하는 성상 재배열(CORE: constellation rearrangement) 심볼 맵핑 방법 등이 연구되었다<sup>3,4)</sup>.

그런데 기존의 연구에서는 주로 AWGN 채널 환경과 부호화 되지 않은 시스템이 고려되었다. 하지만 HARQ 시스템은 열악한 이동통신 환경에서의 통신 품질을 보장하기 위하여 제안된 기술이고, 고신뢰성을 보장하기 위하여 오류정정부호의 결합을 기본적으로 가정한다. 그러므로, HARQ를 이용한 심볼 맵핑 다이버시티를 평가함에 있어 부호화된 시스템을 고려함이 당연하며, 페이딩 채널에서의 성능이 매우 중요한 요소이다.

본 논문에서는 페이딩 채널이 고려된 부호화된 시스템에서 다양한 심볼 맵핑 다이버시티 기술들의 성능을 분석하고, 실제 이동통신 환경에 적합한 심볼 맵핑 다이버시티 기술을 판별한다. 우선 MDSM 심볼 맵핑 방법은 페이딩 채널에서 다이버시티 이득이 작아지는 경향을 보임을 확인한다. 그리고 부호어의 순환 천이를 통해 심볼 맵핑 다이버시티 효과를 얻을 수 있는 간단한 방법을 제안하고, MIMO (multiple-input multiple-output) 시스템에 심볼 맵핑을 적용하여 성능을 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 본 논문에서 고려하는 시스템의 송·수신기의 구조에 대해서 설명한다. III장에서는 심볼 맵핑 다이버시티 효과를 얻을 수 있는 두 가지 방법에 대해서 설명하고, IV장에서는 심볼 맵핑에 변화를 주지 않고 다이버시티 효과를 얻을 수 있는 방법을 제안한다. V장에서는 모의 실험 결과를 통해 심볼 맵핑 다이버시티 성능을 분석

한다. 마지막으로 VI장에서는 본 논문의 내용을 요약·정리하고, 향후 고려할 연구방향을 제시한다.

## II. 시스템 모형

본 논문에서는 다수의 송수신 안테나를 가지는 MIMO-OFDM(multiple-input multiple-output orthogonal frequency division multiplexing) 구조를 고려하며, BICM (bit-interleaved coded modulation)이 적용된 HARQ 시스템을 사용한다. HARQ 시스템은 CC 방식만을 고려한다. 데이터 전송률을 향상시키기 위하여 다수의 송신 안테나에 독립적인 데이터를 전송하는 공간다중화 방식을 사용하며, 수신기는 각 안테나로부터 전송된 데이터를 결합하여 복조 및 복호를 수행한다.

그림 1은 HARQ 프로토콜이 적용된 MIMO-OFDM 시스템 구조를 나타낸다. 송신기에서는 터보 부호화기를 사용하여 정보를 부호화하고, 부호화된 정보는 인터리버를 통과한 후 변조기를 통하여 심볼로 바뀌게 된다. 변조기는 Gray 레이블로 맵핑된 QAM (quadrature amplitude modulation) 성상도를 사용하며, QAM 성상도의 두 지점 사이의 최소 거리는  $2d$ 로 한다. 심볼의 평균 전력은 1로 가정하므로 16QAM 변조 방식에서  $d$ 는  $1/\sqrt{10}$ 로 정의한다. 변조된 QAM 심볼은 IFFT (inverse fast Fourier transform) 변환 후에 CP (cyclic prefix)를 추가하여 OFDM 심볼로 전송된다. 전송 채널은 다수의 지연 경로에 가중치가 적용된 다중 경로 페이딩 채널을 고려하며, 도플러 주파수( $f_d$ )에 따라 시간 영역에서 상관 관계를 가지도록 한다.

수신기에서는 전송된 OFDM 심볼에서 CP를 제거하고, FFT (fast Fourier transform) 변환을 하여 복조기를 통해 LLR (log-likelihood ratio)을 구하여 디인터리버를 통과시킨 후 터보 복호화기를 거쳐 메시지를 복원한다. 복원된 메시지는 복호 성공 여부를 판단하여 ACK (acknowledgement) 혹은 NAK (negative

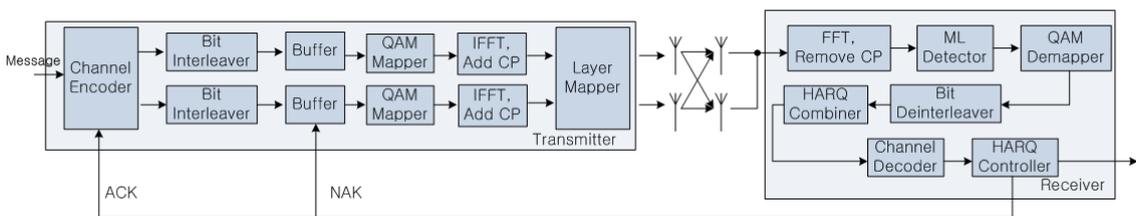


그림 1. HARQ가 적용된 MIMO-OFDM 시스템 구조  
Figure 1. Block diagram of MIMO-OFDM system

acknowledgement) 신호를 송신기에 전송한다. 만약 수신된 심볼이 재전송된 심볼이라면, 이전에 수신된 심볼의 LLR 값과 현재의 LLR 값을 결합하여 복호한다. 송·수신 안테나의 수는 각각  $N_T$ 개,  $N_R$ 개이고, 송신 패킷의 최대 전송 횟수가  $N$ 번 일 때,  $k$ 번째 전송되는 수신 심볼 벡터는 다음과 같은 벡터식으로 표현된다.

$$\mathbf{y}_k^{(i)} = \mathbf{H}_k^{(i)} \mathbf{x}_k^{(i)} + \mathbf{n}_k^{(i)} \quad (k = 1, 2, \dots, N), \quad (1)$$

식 (1)에서  $i$ 는 OFDM 심볼의 부반송파 성분을 나타낸다. 뒤에 나오는 본 논문의 수식에서는 부반송파 성분을 나타내는  $i$ 를 생략하도록 한다.  $\mathbf{x}$ 는 송신 심볼 벡터를 의미하며 ( $N_T \times 1$ ) 크기의 열벡터를 가지고, 수신 심볼 벡터  $\mathbf{y}$ 는 ( $N_R \times 1$ ) 크기의 열벡터를 가진다.  $\mathbf{H}$ 는 ( $N_R \times N_T$ ) 크기의 전송 채널 행렬을 나타내고,  $\mathbf{n}$ 은 평균이 0이고 공분산이  $\sigma_n^2 \mathbf{I}_{N_R}$  인 복소 백색 정규 잡음 벡터를 의미하고 ( $N_R \times 1$ ) 크기의 열벡터를 가진다. 여기서  $\mathbf{I}_{N_R}$ 은  $N_R$  크기의 단위 행렬을 의미한다. 수신된 심볼 벡터를 사용하여 송신 심볼 벡터를 검출하기 위해서 ML (maximum likelihood) 수신기를 사용하며, 식 (2)와 같이 매트릭 값을 최소화 하는 송신 심볼 벡터를 검출하게 된다.  $S$ 는 성상 좌표 심볼들의 집합을 나타낸다.

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \underset{\mathbf{x}_k \in S^{N_T}}{\operatorname{argmin}} \|\mathbf{y}_k - \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k\|^2. \quad (2)$$

### III. 심볼 맵핑 다이버시티 효과를 얻기 위한 재전송 방법

부호화된 패킷을 여러 번 재전송 할 경우, 고정된 Gray 맵핑을 사용하는 것보다 전송 시마다 서로 다른 심볼 맵핑을 사용함으로써 다이버시티 이득을 얻을 수 있다. 본 절에서는 심볼 맵핑 다이버시티 효과를 얻는 두 가지 심볼 맵핑 방법과 심볼 맵핑 방법에 따른 LLR 계산 방식에 대해서 설명하고, 심볼 맵핑 다이버시티를 얻는 간단한 기법을 제안한다. 본 절에서 QAM 성상 좌표의 각 심볼들이 전송될 확률  $p(s)$ 는 모두 동일하다고 가정한다.

#### 3.1 MDSM(maximum distance symbol mapping)

패킷 전송 시 성상 좌표의 근접 심볼들 간에 오류

가 발생할 확률이 가장 높다. 따라서 재전송 시에 이전 성상 좌표의 근접 심볼 간의 거리를 최대화하여 심볼을 맵핑하여 오류 발생 확률을 줄일 수 있다. 즉, QAM 성상 좌표에서 재전송되는 심볼들의 유클리드 거리의 평균이 최대가 되도록 심볼 맵핑을 구성한다. 그림 2는 MDSM 기법을 도식화하였다. H. Samra 등은 AWGN 채널에서 MDSM 기법을 사용하여 BER (bit error rate) 값을 최소화 시키는 맵핑 방법을 도출하였다<sup>41</sup>. 그림 3은 MDSM 기법을 이용한 16QAM 심볼 맵핑 성상도를 나타낸다. 그림 3에서 • 는

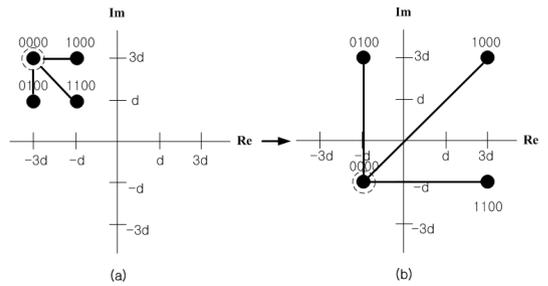


그림 2. MDSM 기법 도식화: (a) 첫 전송, (b) 재전송  
Fig. 2. Schematization of MDSM techniques: (a) First transmission, (b) Retransmission

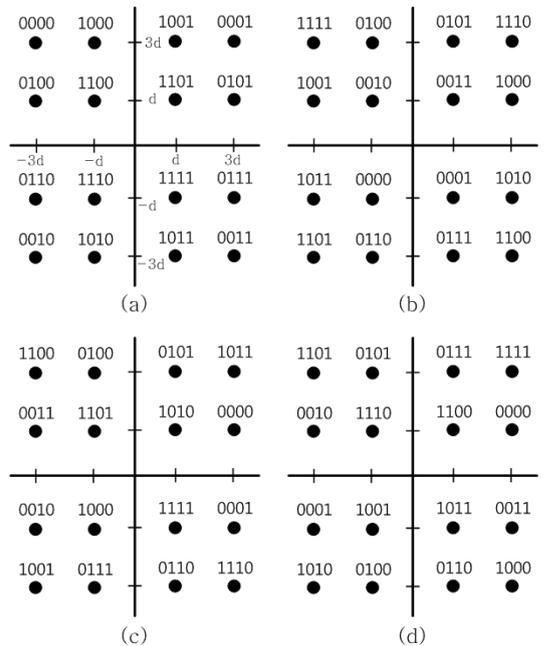


그림 3. 16QAM 변조 방법을 사용하는 경우에 유클리드 거리를 최대화하는 심볼 맵핑: (a)  $k=1$ , (b)  $k=2$ , (c)  $k=3$ , (d)  $k=4$   
Fig. 3. Symbol mapping to maximize the Euclidean distance using 16QAM modulation: (a)  $k=1$ , (b)  $k=2$ , (c)  $k=3$ , (d)  $k=4$

16QAM 성상 좌표를 나타내며, (a)~(d)는 최대 전송 횟수  $N$ 이 4번일 때,  $k$ 번째에 전송되는 심볼 맵핑을 나타낸다. 첫 번째 전송은 Gray 맵핑을 사용하며, 재전송 시에는  $k$ 차원 수신 벡터들의 최소 유클리드 거리를 최대화하기 위한 심볼 맵핑 방법을 사용한다.

16QAM 성상 좌표의 한 심볼을  $s$ 라고 할 때,  $s$ 가 전송된 경우에  $\mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_N$  이 수신될 확률 밀도는 식 (3) 과 같이 구해진다.

$$p(\mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_N | s) = \frac{1}{(\sqrt{\pi\sigma_n^2})^N} \exp\left(-\frac{\sum_{k=1}^N \|\mathbf{y}_k - \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k\|^2}{\sigma_n^2}\right). \quad (3)$$

QAM 성상 좌표의 한 심볼을 구성하는 인터리빙된 비트들을  $\{c_1, c_2, \dots, c_M\}$ 라고 할 때, 식 (3)에서 정의된 확률 밀도를 이용하여 비트의 LLR을 구할 수 있다.  $k$ 번째 전송되는 수신 심볼을 구성하는 각 비트의 LLR 식은 다음과 같다.

$$LLR(c_{i,k}) = \ln \frac{\sum_{s \in S_{i,k}^{(0)}} p(\mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_N | s)}{\sum_{s \in S_{i,k}^{(1)}} p(\mathbf{y}_1, \dots, \mathbf{y}_N | s)} \quad (i = 1, 2, \dots, M), \quad (4)$$

식 (4)에서  $S_{i,k}^{(0)}, S_{i,k}^{(1)}$ 는 각각  $k$ 번째 전송시 사용되는 심볼 맵핑 성상도에서  $s$ 의  $i$ 번째 비트 위치가 0과 1인 성상 심볼들의 집합을 나타내며,  $M$ 은 변조 차수를 의미한다.

3.2 CORE (constellation rearrangement)

QAM 성상 좌표의 각 심볼들은 성상 위치에 따라 다른 전력값을 가지게 된다. 이에 따라 전송비트는 성상도의 심볼 맵핑 위치에 따라 서로 다른 비트 신뢰도를 가지게 된다. 전송 패킷을 재전송 할 경우, 서로 다른 심볼 맵핑으로 전송하여 심볼을 구성하는 비트들의 평균 LLR 크기를 동일하게 유지하여 성능 이득을 가져올 수 있다.

16QAM 변조를 위해서는 한 심볼당 4비트의 입력 비트가 요구된다. 성상 좌표의 각 심볼은  $i_1 q_1 i_2 q_2$ 로 표현하며,  $i_1$ 과  $i_2$ 는 동위상 성분,  $q_1$ 과  $q_2$ 는 직교위상 성분을 나타낸다. 이렇게 구성된 입력 비트 시퀀스는 표 1을 이용하여 재전송 횟수에 따라 신호 성상을 재배열하여 평균 LLR 크기를 동일하게 만들 수 있다. 최대 전송 횟수가 4번인 경우, 16QAM 성상 좌표를

표 1. 재전송 횟수에 따른 성상 재배열 방법  
Table 1. Constellation rearrangement method according to the number of retransmission

전송횟수 (k)	비트 시퀀스	연산
1	$i_1 q_1 i_2 q_2$	변화없음
2	$\overline{i_2 q_2 i_1 q_1}$	$i_1, i_2$ 와 $q_1, q_2$ 의 위치 교환, $i_2, q_2$ 의 비트 반전
3	$i_2 q_2 i_1 q_1$	$i_1, i_2$ 와 $q_1, q_2$ 의 위치 교환
4	$i_1 q_1 \overline{i_2 q_2}$	$i_2, q_2$ 의 비트 반전

맵핑 하는 방법을 그림 4에 도식화하였다. 서로 다른 심볼 맵핑으로 전송된 수신 심볼을 구성하는 각 비트의 LLR 값은 식 (5)와 같이 계산된다.

$$LLR(c_i) = \sum_{k=1}^N \ln \frac{p(s | \mathbf{y}_k)}{p(s | \mathbf{y}_k)} = \sum_{k=1}^N \ln \frac{p(\mathbf{y}_k | s)}{p(\mathbf{y}_k | s)} = \sum_{k=1}^N \ln \frac{\sum_{s \in S_{i,k}^{(0)}} \exp\{-\|\mathbf{y}_k - \mathbf{H}_k s\|^2\}}{\sum_{s \in S_{i,k}^{(1)}} \exp\{-\|\mathbf{y}_k - \mathbf{H}_k s\|^2\}}. \quad (5)$$

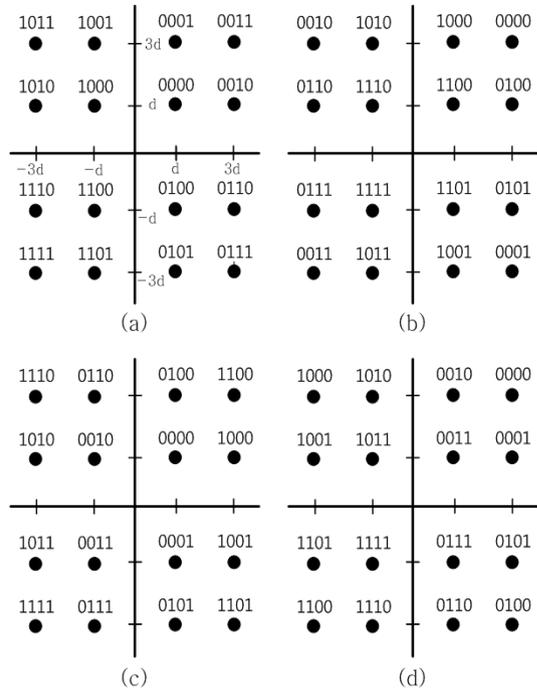


그림 4. CORE 기법을 사용한 16QAM 변조 방식의 심볼 맵핑: (a)  $k=1$ , (b)  $k=2$ , (c)  $k=3$ , (d)  $k=4$   
Fig. 4. Symbol mapping of 16QAM modulation using CORE techniques: (a)  $k=1$ , (b)  $k=2$ , (c)  $k=3$ , (d)  $k=4$

IV. BCS (bit circular shift)

MDSM 기법은 근접 심볼 간의 거리를 최대화하기 위해 복조 전 심볼 수준에서 LLR 결합을 수행하는 DLC (distance level combining) 방식 [7]을 사용한다. 이는 수행 횟수가 많아 복잡도가 커지고, 페이딩 채널에서는 성능 이득을 얻지 못한다는 단점이 있다. CORE 기법은 복조 후 비트 수준에서 LLR 결합을 수행하는 BLC (bit level combining) 방식 [7]을 사용하므로 MDSM 기법보다는 수행 횟수가 적지만 전송 횟수에 따라 다른 심볼 맵핑을 사용하기 때문에 심볼 맵핑 선택에 따른 복잡도가 증가하게 된다. 본 절에서 제안하는 BCS 기법은 전송 횟수에 상관없이 고정된 심볼 맵핑을 사용함으로써 CORE 기법보다 복잡도를 낮추면서 페이딩 채널에서 성능 이득을 가질 수 있다.

BCS 기법은 오류가 발생한 패킷을 재전송 할 때, 심볼 맵핑을 바꾸지 않고 부호화 된 패킷의 비트를 순환 천이 함으로써 심볼 맵핑 다이버시티 효과를 얻는 것이다. 그림 5는 BCS의 구조를 나타낸다.  $L$ 은 전송되는 부호어의 전체 길이,  $L_s$ 는 순환 천이되는 비트 수를 의미하며,  $k$ 는 전송 횟수를 나타낸다. 재전송시 마다 부호어의  $L_s$ 개 비트를 순환 이동시켜 16QAM 성상 좌표 심볼을 구성하는 4개의 비트를 다르게 할 당해 줌으로써 성상 좌표의 위치를 변화시켜 다이버시티 효과를 얻는다. 전송된 수신 심볼을 구성하는 각 비트의 LLR은 식 (6)과 같이 계산된다.

$$LLR(c_i) = \sum_{k=1}^N \ln \frac{\sum_{s \in S_i^{(0)}} \exp\{-\|y_{i,k} - H_{i,k}s\|^2\}}{\sum_{s \in S_i^{(1)}} \exp\{-\|y_{i,k} - H_{i,k}s\|^2\}} \quad (6)$$

$y_{i,k}$ 는  $k$ 번째 전송될 때  $i$ 번째 비트가 속한 수신 심



그림 5.  $L_s=1$  인 BCS 구조  
Fig. 5. Schematization of BCS techniques ( $L_s=1$ )

볼을 의미하며, 이 때 채널 행렬을  $H_{i,k}$ 라고 한다. BCS 방식은 전송 횟수에 상관없이 동일한 심볼 맵핑을 사용하여 전송하므로 고정된 성상도  $S$ 를 사용한다. 수신기의 복조기에서는 LLR을 계산한 후 부호어 비트를 역순환 이동하여 원래의 부호어 순서대로 복원하게 된다.

V. 모의실험 결과

본 절에서는 심볼 맵핑 다이버시티 기법을 적용한 HARQ 시스템에 대한 모의실험을 수행한다. 시스템은 3GPP LTE 표준에 따라 구성되며, 오류 정정 부호는 터보부호<sup>[8]</sup>를 사용한다. 모의실험 환경은 표 2와 같다.

시스템의 프레임 구조는 FDD (frequency division duplexing)를 활용한 타입 1 구조를 사용한다<sup>[9]</sup>. 시간 슬롯에서 첫 번째 OFDM 심볼의 CP는 160개를 사용하고, 나머지 OFDM 심볼은 144개의 CP를 사용한다. 전송 채널은 Jake's model을 사용하여 시간 영역에서 상관 관계를 가지는 채널을 구현하였으며<sup>[12]</sup>, 3GPP LTE 표준으로 채택된 IMT-2000 (international mobile telecommunications-2000)의 ITU-R 모형을 채널 profile로 선정하였다<sup>[10,11]</sup>. 실험에서 사용된 채널 profile은 vehicular A 모형이며, 도플러 주파수는 110 Hz로 설정하였다. 모든 시뮬레이션 결과는 수신기에서 측정된 수신 SNR을 기준으로 측정하였으며, SNR은 심볼 에너지 대 잡음비( $E_s/N_0$ )로 정의하였다.

표 2. 모의실험 환경  
Table 2. Simulation environments

송·수신 안테나 수 (NT×NR)	(1×1), (2×2)	
오류정정 부호	3GPP LTE 터보 부호 - 부호율 : 0.5 - 길이 : 송신 QAM 심볼의 수 528개로 고정	
변조방식	16-QAM	
채널 환경	다중 경로 페이딩 채널	
최대 전송 횟수	4	
검출 방식	ML 수신기	
반송파 주파수	2GHz	
OFDM	부반송파 수	2048
	CP 설정	Normal cyclic prefix

4.1 SISO (single input single output) 시스템

AWGN 채널에서 부호화되지 않은 시스템의 경우, 그림 6과 같이 전송 횟수에 상관없이 MDSM 기법의 BER이 가장 낮음을 알 수 있다. 재전송 횟수가 4회일 때,  $10^{-3}$  BER에서 MDSM 기법이 CORE 기법보다 약 1.4dB의 성능 이득이 있다. 하지만 채널 상에 페이딩이 적용될 경우, 성상 좌표의 크기와 위상 변이로 인하여 오율 성능과 처리량(throughput)이 달라진다. 그림 7과 8은 부호화된 SISO-OFDM 시스템에서 전송 시마다 동일한 Gray 맵핑을 사용한 경우(Fixed)와 그림 3과 그림 4의 심볼 맵핑, 그리고 그림 5의 BCS 기법을 사용했을 때, 페이딩 채널에서 FER (frame error rate)과 처리량(throughput)을 비교한 것이다. 처리량은 전송시마다 발생하는 ACK 신호의 비율을 기준으로 측정하였다. 그림에서 보듯이 페이딩 채널에서 MDSM 기법은 성능 이득이 없는 것을 알 수 있다. 이는 MDSM 기법이 페이딩 채널에서 심볼 크기와 위상

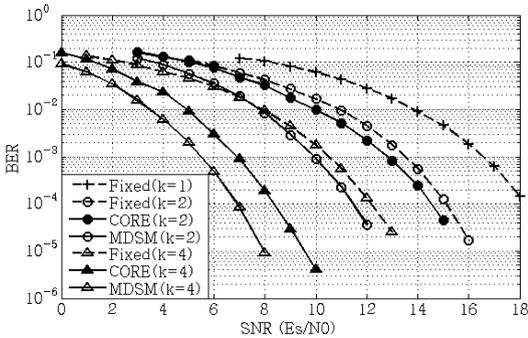


그림 6. AWGN 채널에서 부호화되지 않은 시스템의 비트 오율 성능  
Fig. 6. BER performance of uncoded system in AWGN channel

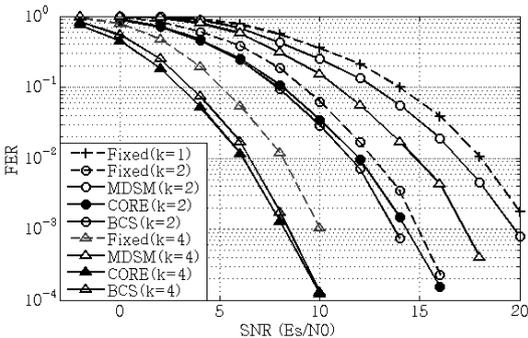


그림 7. 다중 경로 페이딩 채널에서 부호화된 SISO-OFDM 시스템의 프레임 오율 성능  
Fig. 7. FER performance of coded SISO-OFDM system in multipath fading channel

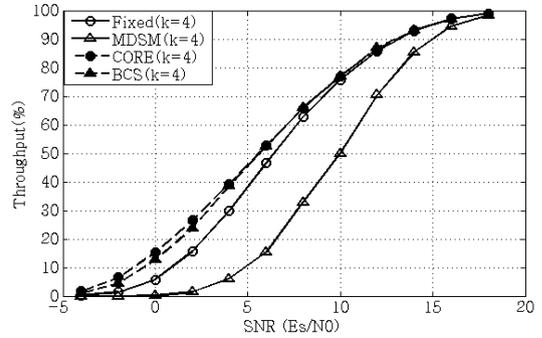


그림 8. 다중 경로 페이딩 채널에서 부호화된 SISO-OFDM 시스템의 처리량  
Fig. 8. Throughput performance of coded SISO-OFDM system in multipath fading channel

변화에 의해 좌표 심볼들 간의 거리가 변하게 되어 오율이 높아졌기 때문이다. 재전송 횟수가 4회인 경우, CORE 기법과 BCS 기법이 고정된 Gray 맵핑을 사용한 경우보다 FER과 처리량 측면에서 뛰어난 성능을 보인다. 오율은  $10^{-3}$  FER에서 약 2dB의 성능 이득을 가지고, 처리량은 0dB SNR에서 약 10%의 성능 차이를 보인다. 즉, 고정된 Gray 맵핑을 사용한 경우, 10개의 부호어를 전송하면 CORE와 BCS 기법보다 1개의 부호어 오류가 더 발생한다는 것을 의미한다. 재전송 횟수가 2회일 경우에는 BCS 기법이 CORE 기법보다  $10^{-3}$  FER에서 약 0.3dB의 성능 이득을 가진다. CORE 기법은 최대 전송 횟수가 4번일 경우, 심볼을 구성하는 모든 비트가 동일한 LLR 값을 가지기 때문이다. BCS 기법은 생성된 입력 시퀀스를 임의로 순환 이동 시키기 때문에 재전송 횟수에 상관없이 임의의 다이버시티 이득을 가지게 된다.

4.2 MIMO 시스템

복수개의 송·수신 안테나를 가진 MIMO 시스템에서 심볼 맵핑 방법에 따른 오율 성능과 처리량을 분석해 본다. 그림 9와 10은 다중 경로 페이딩 채널에서 송·수신 안테나가 각각 2개인 MIMO-OFDM 시스템의 FER과 처리량을 분석한 것이다. 재전송 횟수가 4회인 경우, CORE 기법이 오율과 처리량 측면에서 가장 뛰어난 성능을 나타낸다.  $10^{-3}$  FER에서 고정된 Gray 심볼 맵핑을 사용한 경우보다 약 3dB의 성능 이득을 가지며, 0dB SNR에서 약 10%의 처리량 이득을 가진다. 반면 BCS 기법과는 오율측면에서 약 0.6~0.8dB, 처리량은 약 3~4%의 근소한 차이를 보인다. CORE 기법은 4번 재전송 될 경우, 심볼의 평균 비트 LLR이 동일하게 유지되므로 BCS 기법보다 높은 성능을 보인다. 하지만 재전송 횟수가 2회인 경우

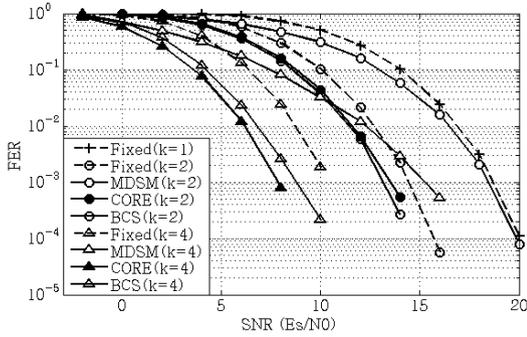


그림 9. 다중 경로 페이딩 채널에서 부호화된 MIMO-OFDM 시스템의 프레임 오류 성능  
 Fig. 9. FER performance of coded MIMO-OFDM system in multipath fading channel

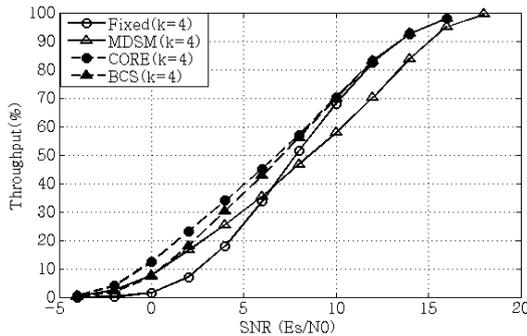


그림 10. 다중 경로 페이딩 채널에서 부호화된 MIMO-OFDM 시스템의 처리량  
 Fig. 10. Throughput performance of coded MIMO-OFDM system in multipath fading channel

는 SISO 시스템과 동일하게 BCS 기법이 CORE 기법보다 오율 성능이 더 뛰어난 것을 알 수 있다.  $10^{-3}$  FER에서 약 0.3dB의 성능 이득이 생긴다. 이는 재전송 횟수가 1~2회로 국한될 경우, BCS 기법이 입력 시퀀스의 랜덤성에 의해 더 큰 성능 이득을 가지게 되지만, 재전송 횟수가 늘어날수록 비트 LLR의 평균화로 인해 CORE 기법의 성능 이득이 더 크다는 걸 보여준다. 하지만 BCS 방식은 고정된 심볼 정상도를 사용하면서 재전송시 부호어를 순환 천이시키는 간단한 방법만을 사용하므로 CORE 기법보다 낮은 복잡도를 가지면서 심볼 맵핑 다이버시티 이득을 얻을 수 있다. 따라서 요구되는 FER 및 처리량에 따라서 복잡도 및 전송 효율성을 고려하여 CORE 기법과 BCS 기법을 적절하게 활용할 수 있다.

### VI. 결론

본 논문에서는 Turbo 부호에 기반한 MIMO

-OFDM 시스템에서 다양한 심볼 맵핑 방법을 HARQ 기술에 적용하여 다이버시티 성능을 비교·분석하였다. 그리고 복잡도를 줄이면서 성능 이득을 가져올 수 있는 간단한 기법을 제안하였다.

향후 페이딩 채널에서 오류 성능을 평가하는 방법으로 심볼 맵핑 방법에 따른 이론적 한계치 (boundary)를 구하는 연구가 필요하다. 또한 64QAM, 256QAM 등의 고차 변조 방식에서 앞에서 언급한 심볼 맵핑 방법을 적용하여 연구를 진행할 필요가 있다.

### 참고 문헌

- [1] D. Chase, "A combined coding and modulation approach for communications over dispersive channels," *IEEE Trans. Commun.*, Vol.21, No.3, pp.159-174, Mar., 1973.
- [2] D. M. Mandelbaum, "An adaptive-feedback coding scheme using incremental redundancy," *IEEE Trans. Inform. Theory*, Vol.20, No.3, pp.388-389, May, 1974.
- [3] H. Sarma, Z. Ding, and P. M. Hahn, "Symbol mapping diversity design for multiple packet transmissions," *IEEE Trans. Commun.*, Vol.53, No.5, pp.810-817, May, 2005.
- [4] C. Wengerter, A. G. E. von Elbwart, E. Seidel, G. Velez, and M. P. Schmitt, "Advanced hybrid ARQ technique employing signal constellation rearrangement," in *Proc. 56th IEEE Vehicular Technology Conf.*, Vol.4, pp.2002-2006, Vancouver, BC, Canada, 2002.
- [5] S. ten Brink, J. Speidel, and R. Yan, "Iterative demapping and decoding for multilevel modulation," in *Proc. IEEE Global Telecommun. Conf.*, pp.579-584, Nov., 1998.
- [6] J. Tan and G. L. Stuber, "Analysis and design of symbol mappers for iteratively decoded BICM," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Vol.4, No.2, pp.662-672, Mar., 2005.
- [7] E. W. Jang, Jungwon Lee, H.-L. Lou, and J.M. Cioffi, "On the combining schemes for MIMO systems with hybrid ARQ," *IEEE Trans. Wireless Commun.*, Vol.8, No.2, pp.836-842, Feb. 2009.
- [8] 3GPP TS 36.212: "3rd Generation Partnership Project; Multiplexing and Channel Coding

(Release 8)".

- [9] 3GPP TS 36.211 V8.8.0: "3rd Generation Partnership Project; Technical Specification Group Radio Access Network; Evolved Universal Terrestrial Radio Access(E-UTRA); Physical Channels and Modulation(Release 8)".
- [10] Sandip Sarkar "The JTC Fader", *QUALCOMM Incorporated*, Nov., 8, 2002.
- [11] Recommendation ITU-R M.1225, "Guidelines for Evaluation of Radio Transmission Technologies for IMT-2000", *ITU-R*, 1997.
- [12] P. Dent, G. E. Bottomley, and T. Croft, "Jakes model revisited," *Electron. Lett.*, Vol.29, pp.1162 -1163, June 1993.

**박 원 석 (Won Seok Park)**

준회원



2009년 2월 성균관대학교 전자  
전기공학과 학사  
2009년 3월~현재 성균관대학  
교 휴대폰학과 석사과정  
<관심분야> 디지털 통신, 다중  
안테나 시스템

**강 진 환 (Jin Whan Kang)**

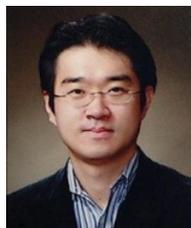
정회원



2008년 2월 성균관대학교 전자  
전기공학과 학사  
2010년 2월 성균관대학교 휴  
대폰 학과 석사  
2010년 3월~현재 성균관대학  
교 휴대폰학과 박사과정  
<관심분야> 다중 안테나 시스  
템, 오류정정부호, 부호이론

**김 상 호 (Sang-Hyo Kim)**

종신회원



1998년 2월 서울대학교 전기공  
학부 학사  
2000년 2월 서울대학교 전기공  
학부 석사  
2004년 2월 : 서울대학교 전기  
· 컴퓨터공학부 박사  
2004년 3월~2006년 7월 삼성  
전자, 책임연구원  
2006년 8월~2007년 8월 박사후 연구원(USC)  
2007년 9월~현재 성균관대학교 정보통신공학부 조  
교수  
<관심분야> 오류정정부호, 다중 안테나 시스템, 시  
퀀스, 협력 통신