

논문 2011-48TC-6-3

64QAM 변조 방식의 HARQ 전송을 위한 효율적인 성상 재배열 방법

(An Efficient Constellation Rearrangement
for HARQ with 64QAM)

박 원 석*, 조 충 기*, 김 중 환*, 김 상 효**

(Won-Seok Park, Chung-ki Cho, Jong-hwan Kim, and Sang-Hyo Kim)

요 약

본 논문은 64QAM 변조 방식에서 기존의 성상 재배열 방법보다 다이버시티 효과를 늘려 오류를 줄이고 처리량을 향상시킬 수 있는 발전된 성상 재배열 방법을 제시하고 성능향상에 대한 근거를 제시한다. 제한된 전송횟수 내에서 제안된 방법을 사용하여 재전송에 따른 성상 좌표를 결정하고, 결정된 성상 좌표들의 전송 순서를 고려함으로써 전송 심볼 간의 성능 편차를 줄여서 시스템의 성능을 향상시킨다. 모의 시뮬레이션을 통해 페이딩 채널과 다중 안테나 시스템에서 제안된 방법의 성능을 비교·분석하고, 실제적인 무선통신 환경에서의 적용 가능성을 확인한다.

Abstract

In this paper, we propose an efficient symbol mapping method based on LLR (log-likelihood ratio) statistic for HARQ employing CoRe (constellation rearrangement) with 64QAM. The signal constellations for 64QAM with limited number of retransmissions are selected by the proposed mapping rule. Then we determine the transmission order of selected constellations. The proposed scheme reduces the performance deviation between transmit symbols so as to improve the system performance. Through simulation results, the proposed and existing CoRe mapping methods are compared with respect to error rate and throughput in MIMO-OFDM system over fading channel and we confirm the applicability of the proposed scheme in practical wireless communications environment.

Keywords : multiple-input multiple-output (MIMO), orthogonal frequency division multiplexing (OFDM), hybrid-ARQ (HARQ), constellation rearrangement (CoRe), symbol mapping

I. 서 론

무선 통신 시스템의 열악한 채널 환경으로 인해 발생하는 데이터의 재전송 요구를 줄이고, 전송 효율을 높

이는 방법으로 HARQ (hybrid ARQ) 시스템이 사용된다. HARQ 시스템은 ARQ (automatic repeat request) 와 FEC (forward error correction)의 장점을 혼합한 기법으로, 오류가 발생한 패킷을 재전송시키고 수신기에서 기수신된 정보와의 결합을 통하여 채널 적응적 고신뢰도 통신을 실현한다^[1~2].

패킷을 재전송 할 때, 서로 다른 심볼 맵핑을 사용하여 전송하면 다이버시티 효과로 인해 성능 이득을 얻을 수 있다. 재전송시에 다른 심볼 맵핑을 전송하여 다이버시티를 얻는 방법을 심볼 맵핑 다이버시티(symbol mapping diversity)라고 하며, 다이버시티 효과를 얻기

* 학생회원, ** 평생회원-교신저자, 성균관대학교 (Sungkyunkwan University)

※ 본 연구는 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 육성지원 사업의 연구결과로 수행되었음(NIPA-2011-(C1090-1111-0005))

접수일자: 2010년12월31일, 수정완료일: 2011년6월15일

위한 많은 연구가 진행되었다^[3~6]. 그 중에서 CoRe (constellation rearrangement) 기법은 재전송시마다 심볼 매핑을 변경하여 심볼을 구성하는 비트 간의 LLR (log-likelihood ratio) 값을 평균화하는 방법이다. 이로 인해 특정 비트로 전력이 집중되는 것을 방지하여 다이버시티 이득을 높임으로써 HARQ 시스템의 성능을 향상시킨다^[6~7]. 하지만 64QAM 변조 방식에서 CoRe를 위한 최적화된 심볼 매핑을 사용하기 위해서는 과도한 재전송횟수가 요구된다. 이는 HARQ 시스템의 전송 성능을 악화시킨다. 따라서 제한된 전송 횟수 내에서 성능 이득을 얻을 수 있는 매핑 방법이 필요하다. 기존의 연구에서는 4번의 제한된 전송 횟수에서 심볼을 구성하는 각 비트의 평균 LLR 값에 표준편차가 최소가 되는 심볼 매핑 방법을 제안하였다^[10]. 그러나 이 방법은 심볼 간의 성능 편차를 고려하지 않아서 특정 심볼의 지속적인 복호 실패가 발생할 수 있으므로 새로운 매핑 방법에 대한 연구가 필요하다.

본 논문에서는 64QAM 변조 방식에서 CoRe 기법 적용을 위한 효율적인 심볼 매핑 방법을 제안한다. 제안된 방법은 페이딩 채널과 MIMO 채널에 적용하여 실제 이동통신 환경의 적용 가능성을 타진한다.

본 논문은 다음과 같이 구성된다. II장에서는 본 논문에서 고려하는 시스템의 송·수신기 구조에 대해서 설명한다. III장에서는 64QAM 변조 방식의 비트 신뢰도와 기존의 제안된 CoRe 기법을 설명하고, 새로운 방법을 제안한다. IV장에서는 모의실험 결과를 통해 심볼 매핑 방법에 따른 성능을 분석하고, 마지막 V장에서는 본 논문의 내용을 요약·정리하고 결론을 내린다.

II. 시스템 모델

본 논문에서는 BICM (bit-interleaved coded modulation)이 적용된 HARQ 시스템을 사용하며, 다수

의 송·수신 안테나를 가지는 MIMO-OFDM (multiple-input multiple-output orthogonal frequency division multiplexing) 구조를 고려한다. MIMO 시스템은 공간 다중화 전송 방식을 사용하며, HARQ 시스템은 Type I CC (chase-combining) 방식을 고려한다^[8]. 또한 수신기는 각 안테나로부터 전송된 데이터를 결합하여 복조 및 복호를 수행한다. 그림 1은 본 논문에서 사용된 송·수신기 구조를 나타낸다.

송신기는 터보 부호를 사용하여 입력 시퀀스를 인코딩하고, 인터리빙 과정을 거친 후, CoRe 기법에 따라 재전송 횟수에 따른 다른 성상도를 사용하여 변조 과정을 거친다. 각 성상도는 Gray 레이블로 매핑된 QAM (quadrature amplitude modulation) 심볼 매핑을 사용하며, 심볼 간 최소 간격은 $2d$ 로 가정한다. d 는 64QAM 변조 방식에서 각 심볼의 평균 전력을 1로 가정하여 $1/\sqrt{42}$ 로 놓는다. 변조된 심볼은 OFDM 과정을 통해 OFDM 심볼로 전송된다. 전송되는 MIMO 채널은 송·수신 안테나가 각각 N_T 개, N_R 개이며, 도플러 주파수(f_d)에 따라 시간 영역에서 상관 관계를 가지고, 한 프레임이 전송되는 동안 채널은 일정하다고 가정하는 블록 페이딩 채널을 고려한다.

최대 전송 횟수가 M 번 일 때, k 번째 전송되는 수신 심볼 벡터는 다음과 같다.

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

식 (1)에서 i 는 OFDM 심볼의 부반송파 성분을 나타내며, 편의를 위해 생략하도록 한다. \mathbf{x} 는 $(N_T \times 1)$ 크기의 송신 심볼 벡터, \mathbf{y} 는 $(N_R \times 1)$ 크기의 수신 심볼 벡터를 의미하며, \mathbf{H} 는 $(N_R \times N_T)$ 크기의 MIMO 채널 행렬을 나타낸다. \mathbf{n} 은 $(N_R \times 1)$ 크기를 가지는 평균이 0이고 공분산이 $\sigma_n^2 \mathbf{I}_{N_R}$ 인 복소 백색 정규 잡음 벡터를 나타낸다. 수신된 심볼 벡터는 ML (maximum likelihood) 검출기

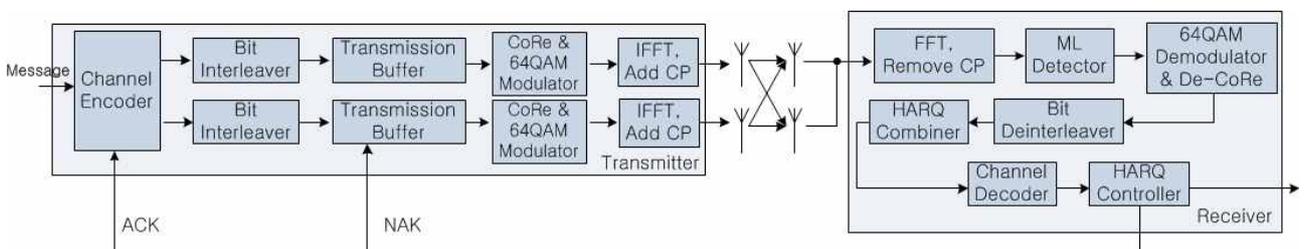


그림 1. CoRe 기법이 적용된 MIMO-OFDM 시스템 구조
Fig. 1. MIMO-OFDM system with CoRe technique.

를 이용하여, 식 (2)와 같이 매트릭 값을 최소로 하는 송신 심볼 벡터를 검출한다.

$$\hat{\mathbf{x}}_k = \arg \min_{\mathbf{x}_k \in \mathcal{S}^{N_T}} \|\mathbf{y}_k - \mathbf{H}_k \mathbf{x}_k\|^2, \quad (2)$$

검출된 심볼 벡터는 복조기를 통해 LLR (log-likelihood ratio) 값을 구한 후 디인터리버를 거친다. 재전송 여부에 따라 이전에 수신된 심볼의 LLR 값과 현재의 LLR 값을 결합하여 주고, 디코딩 과정을 거쳐 메시지를 복원한다. 복원된 메시지는 복호 성공 여부를 판단하여 ACK (acknowledgement) 혹은 NAK (negative acknowledgement) 신호를 송신기에 전송한다.

III. CoRe 기법

QAM 성상 좌표의 각 성상점들은 맵핑 위치에 따라 다른 전력값을 가진다. 따라서 각 심볼을 구성하는 전송 비트는 심볼 맵핑의 위치에 따라 전력값이 달라지며, 이에 따라 서로 다른 비트 신뢰도를 가지게 된다. HARQ 시스템에서 복호 실패로 인해 패킷을 재전송할 경우, 각 전송마다 다른 성상 좌표를 사용하여 이전과 다른 심볼을 전송함으로써 각 비트들의 평균 LLR 값을 동일하게 유지하여 성능 이득을 가질 수 있다. 이러한 방법을 CoRe 기법이라고 한다.

1. 64QAM 변조 방식의 비트 신뢰도

64QAM 복조기의 연관성 정보는 로그우도율(LLR)로 나타낸다. QAM 심볼 c_k 에 속한 비트를 b_1, \dots, b_N 라고 하면 b_i 의 LLR 값은 다음 식과 같이 주어진다. 여기서 N 은 변조 차수를 의미한다.

$$\begin{aligned} LLR(b_i) &= \log \frac{\sum_{c_k, b_i=0} P(c_k | \mathbf{y}_k)}{\sum_{c_k, b_i=1} P(c_k | \mathbf{y}_k)} = \log \frac{\sum_{c_k, b_i=0} P(\mathbf{y}_k | c_k)}{\sum_{c_k, b_i=1} P(\mathbf{y}_k | c_k)} \\ &= \log \frac{\sum_{c_k, b_i=0} \exp\{-\|\mathbf{y}_k - \mathbf{H}_k c_k\|^2\}}{\sum_{c_k, b_i=1} \exp\{-\|\mathbf{y}_k - \mathbf{H}_k c_k\|^2\}}. \end{aligned} \quad (3)$$

64QAM 성상 좌표는 그림 2와 같은 Gray 맵핑을 사용한다. 각 심볼은 6비트로 구성되며, $i_1 i_2 i_3 q_1 q_2 q_3$ 로 표시한다. 여기서 i_1, i_2, i_3 는 동위상 성분을 나타내며, q_1, q_2, q_3 는 직교위상 성분을 나타낸다. 두 성분은 서로 직교 관계에 있으므로 한 성분의 LLR 값을 비교하여

| | | i_1 | | | | | | | |
|-------|-------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|--------|
| | | i_2 | | | i_3 | | | i_2 | |
| | | i_3 | | | | i_3 | | i_3 | |
| q_3 | q_2 | 101111 | 101101 | 100101 | 100111 | 000111 | 000101 | 001101 | 001111 |
| | | × | × | × | × | × | × | × | × |
| | | 101110 | 101100 | 100100 | 100110 | 000110 | 000100 | 001100 | 001110 |
| | | × | × | × | × | × | × | × | |
| | | 101010 | 101000 | 100000 | 100010 | 000010 | 000000 | 001000 | 001010 |
| | | × | × | × | × | × | × | × | × |
| q_3 | q_1 | 101011 | 101001 | 100001 | 100011 | 000011 | 000001 | 001001 | 001011 |
| | | × | × | × | × | × | × | × | × |
| | | 111011 | 111001 | 110001 | 110011 | 010011 | 010001 | 011001 | 011011 |
| | | × | × | × | × | × | × | × | |
| | | 111010 | 111000 | 110000 | 110010 | 010010 | 010000 | 011000 | 011010 |
| | | × | × | × | × | × | × | × | × |
| q_2 | q_3 | 111110 | 111100 | 110100 | 110110 | 010110 | 010100 | 011100 | 011110 |
| | | × | × | × | × | × | × | × | × |
| | | 111111 | 111101 | 110101 | 110111 | 010111 | 010101 | 011101 | 011111 |
| | | × | × | × | × | × | × | × | |

그림 2. 64QAM 변조 방식의 Gray 심볼 맵핑
Fig. 2. Gray symbol mapping of 64 QAM.

비트 신뢰도를 비교하는 것이 효율적이다.

동위상 성분을 고려할 경우, 최상위 비트 i_1 는 가장 높은 신뢰도를 가지고, 최하위 비트 i_3 는 가장 낮은 신뢰도, 그리고 i_2 는 중간 신뢰도를 가진다. 각 비트의 LLR 값은 다음과 같은 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} LLR(i_1) &= \log \frac{e^{-K(x+d)^2} + e^{-K(x+3d)^2} + e^{-K(x+5d)^2} + e^{-K(x+7d)^2}}{e^{-K(x-d)^2} + e^{-K(x-3d)^2} + e^{-K(x-5d)^2} + e^{-K(x-7d)^2}} \\ LLR(i_2) &= \log \frac{e^{-K(x-5d)^2} + e^{-K(x-7d)^2} + e^{-K(x+5d)^2} + e^{-K(x+7d)^2}}{e^{-K(x-d)^2} + e^{-K(x-3d)^2} + e^{-K(x+d)^2} + e^{-K(x+3d)^2}} \\ LLR(i_3) &= \log \frac{e^{-K(x-d)^2} + e^{-K(x-7d)^2} + e^{-K(x+d)^2} + e^{-K(x+7d)^2}}{e^{-K(x-3d)^2} + e^{-K(x-5d)^2} + e^{-K(x+3d)^2} + e^{-K(x+5d)^2}}, \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)에서 x 는 정규화된 수신 심볼의 동위상 성분, K 는 SNR (signal-to-noise ratio) 대비 비례 상수를 의미한다. 성상 좌표의 모든 심볼이 동일한 확률로 수신된다고 가정할 경우, 식 (4)는 다음과 같이 간략화 할 수 있다^[9].

$$\begin{aligned} LLR(i_1) &\cong -4Kx \\ LLR(i_2) &\cong -4K(4d - |x|) \\ LLR(i_3) &\cong -4K(2d - |4d - |x||) \end{aligned} \quad (5)$$

근사식 (5)를 이용하여 그림 2에서 제시된 심볼 맵핑의 LLR 값을 구하면 표 1과 같다. 표 1의 표준 편차는 각 행의 LLR의 크기에 대한 편차를 구한 것으로서 절에서 심볼 맵핑을 결정하기 위한 성능 평가에 사용한다.

2. 64QAM 변조 방식의 심볼 맵핑 방법

2^N -QAM 변조 방식의 HARQ 시스템에서 심볼을 구성하는 각 비트의 평균 LLR값을 동일하게 유지하기 위해서는 $N/2 \times (2^{(N/2-1)})$ 의 전송횟수가 요구된다. 따라서 64QAM 변조 방식에서는 최대 12번의 재전송이 필요하다. 이 경우에 과도한 재전송으로 인해 성능을 악화시키며, 시스템 복잡도의 증가로 인해 실제 시스템의 적용에 어려움이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 재전송 횟수를 줄이면서 성능 이득을 얻을 수 있는 방법들이 연구되었다.

기존의 연구된 심볼 맵핑 방법은 심볼을 구성하는 각 비트 간의 평균 LLR값의 편차를 최소화하는 방법으로써 특정 비트의 지속적인 오류를 방지하였다. Min-li jia 등은 표 1과 같이 비트 시퀀스로 구성할 수 있는 총 8가지의 심볼에 대하여 표준 편차 값들의 평균이 최소가 되는 맵핑 방법을 선택하였다^[10]. 하지만 이 방법은 한 심볼 내에서의 비트 간의 성능 편차를 최소화 할 수 있지만 심볼 간의 성능 차이를 고려하지 않았다. 따라서 심볼 간의 복호 성공 확률에 차이가 발생하면서 최적의 성능을 달성하지 못한다.

표 1. $i_1q_1i_2q_2i_3q_3$ 심볼 맵핑(그림 2)의 근사화된 LLR 값

Table 1. Approximate LLRs of $i_1q_1i_2q_2i_3q_3$ symbol mapping (Fig.2).

| 심볼 ($i_1q_1i_2q_2i_3q_3$) | $i_1q_1i_2q_2i_3q_3$ | | | |
|--------------------------------|----------------------|---------------------|---------------------|----------------------|
| | 평균 LLR (i_1) | 평균 LLR (i_2) | 평균 LLR (i_3) | 표준편차 (σ) |
| $0q_10q_20q_3$ | $-12Kd$ | $-4Kd$ | $-4Kd$ | 3.7712 |
| $0q_10q_21q_3$ | $-4Kd$ | $-12Kd$ | $4Kd$ | 3.7712 |
| $0q_11q_20q_3$ | $-20Kd$ | $4Kd$ | $-4Kd$ | 7.5425 |
| $0q_11q_21q_3$ | $-28Kd$ | $12Kd$ | $4Kd$ | 9.9778 |
| $1q_10q_20q_3$ | $12Kd$ | $-4Kd$ | $-4Kd$ | 3.7712 |
| $1q_10q_21q_3$ | $4Kd$ | $-12Kd$ | $4Kd$ | 3.7712 |
| $1q_11q_20q_3$ | $20Kd$ | $4Kd$ | $-4Kd$ | 7.5425 |
| $1q_11q_21q_3$ | $28Kd$ | $12Kd$ | $4Kd$ | 9.9778 |

3. 제안하는 심볼 맵핑 방법

제한된 전송횟수 내에서 CoRe 기법을 적용하여 최적의 성능을 얻기 위해서는 적절한 심볼 맵핑을 선택하는 것과 더불어 선택된 심볼 맵핑 방법을 어떠한 순서로 재전송 할 것인지도 중요한 요소이다. 심볼 맵핑의 재전송 순서에 따라 전체 시스템의 재전송 횟수가 달라지므로 시스템의 성능에 영향을 주기 때문이다. 따라서

본 논문에서는 첫 번째로 제한된 전송횟수에서 심볼 맵핑을 선택하는 방법과, 두 번째로 선택된 심볼 맵핑의 전송 순서를 결정하는 방법을 제안한다.

첫 번째로 심볼 맵핑을 선택하는 방법은 기존의 방법과 동일하게 각 심볼을 구성하는 비트 간의 표준편차를 구한 후, 그 값들의 평균이 아닌, 제곱의 평균을 구하여 그 값이 최소가 되는 맵핑 방법을 선택하는 것이다. 제곱의 평균을 고려할 경우, 식 (6)과 같이 평균 뿐만 아니라 분산도 같이 계산할 수 있으므로 비트와 심볼 사이의 편차를 동시에 고려할 수 있다.

$$E[\sigma^2] = E^2[\sigma] + Var[\sigma] \tag{6}$$

표 2는 재전송 횟수에 따른 심볼 맵핑 방법을 나타낸 것으로 각 심볼은 4가지의 성상 좌표를 가지게 된다. 최대 재전송 횟수는 4번으로 제한하였으며, 초기 전송은 그림 2와 같은 $i_1q_1i_2q_2i_3q_3$ 를 사용하였다. 표 3은 4번 전송 후 동위상 성분의 누적된 LLR 값을 나타낸 것으로써, 여기서 Mean LLR 값은 표 2에서 제시된 재전송 횟수에 따른 성상 재배열 방법에 따라 표 1과 같은 과정을 통해서 구해진 LLR 값을 합하여 구한 값이다.

표 2. 재전송 횟수에 따른 성상 재배열 방법

Table 2. CoRe methods for requested retransmissions.

| 심볼 맵핑 | 비트 시퀀스 | | |
|-------|----------------------|----------------------|----------------------|
| | No CoRe | CoRe1 | CoRe2 |
| 1 | $i_1q_1i_2q_2i_3q_3$ | $i_1q_1i_2q_2i_3q_3$ | $i_1q_1i_2q_2i_3q_3$ |
| 2 | $i_1q_1i_2q_2i_3q_3$ | $i_2q_2i_1q_1i_3q_3$ | $i_3q_3i_1q_1i_2q_2$ |
| 3 | $i_1q_1i_2q_2i_3q_3$ | $i_3q_3i_1q_1i_2q_2$ | $i_1q_1i_2q_2i_3q_3$ |
| 4 | $i_1q_1i_2q_2i_3q_3$ | $i_3q_3i_1q_1i_2q_2$ | $i_2q_2i_3q_3i_1q_1$ |

표 3. 성상좌표에서 in-phase 성분의 누적된 LLR 값

Table 3. Cumulative LLRs of in-phase component in the signal constellation.

| 심볼 ($i_1q_1i_2q_2i_3q_3$) | CoRe1 | | | CoRe2 | | |
|--------------------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|---------------------|
| | 평균 LLR (i_1) | 평균 LLR (i_2) | 평균 LLR (i_3) | 평균 LLR (i_1) | 평균 LLR (i_2) | 평균 LLR (i_3) |
| $0q_10q_20q_3$ | $-48Kd$ | $-16Kd$ | $-40Kd$ | $-40Kd$ | $-40Kd$ | $-32Kd$ |
| $0q_10q_21q_3$ | $-32Kd$ | $-32Kd$ | $40Kd$ | $-40Kd$ | $-32Kd$ | $32Kd$ |
| $0q_11q_20q_3$ | $-40Kd$ | $16Kd$ | $-40Kd$ | $-48Kd$ | $40Kd$ | $-24Kd$ |
| $0q_11q_21q_3$ | $-40Kd$ | $32Kd$ | $40Kd$ | $-48Kd$ | $32Kd$ | $24Kd$ |
| $1q_10q_20q_3$ | $48Kd$ | $-40Kd$ | $-40Kd$ | $40Kd$ | $-32Kd$ | $-32Kd$ |
| $1q_10q_21q_3$ | $32Kd$ | $-40Kd$ | $40Kd$ | $40Kd$ | $-40Kd$ | $32Kd$ |
| $1q_11q_20q_3$ | $40Kd$ | $40Kd$ | $-40Kd$ | $48Kd$ | $32Kd$ | $-40Kd$ |
| $1q_11q_21q_3$ | $40Kd$ | $40Kd$ | $40Kd$ | $48Kd$ | $40Kd$ | $40Kd$ |

표 4. 심볼 맵핑의 전송 순서에 따른 표준 편차 제곱의 평균

Table 4. Mean of standard deviation square in different symbol mappings.

| 전송 순서 | 심볼 맵핑 | $E[\sigma^2]$ | 심볼 맵핑 | $E[\sigma^2]$ | 심볼 맵핑 | $E[\sigma^2]$ |
|-------|----------------------|---------------|----------------------|---------------|----------------------|---------------|
| 1 | $i_1q_1i_2q_2i_3q_3$ | 81.8 | $i_1q_1i_2q_2i_3q_3$ | 113. | $i_1q_1i_2q_2i_3q_3$ | 53.3 |
| 2 | $i_3q_3i_1q_1i_2q_2$ | | $i_1q_1i_2q_2i_3q_3$ | | $i_2q_2i_3q_3i_1q_1$ | |

표 5. 심볼 맵핑에 따른 전송 순서

Table 5. Retransmission order in different symbol mappings.

| 전송 순서 | 비트 시퀀스 |
|-------|----------------------|
| | CoRe2 |
| 1 | $i_1q_1i_2q_2i_3q_3$ |
| 2 | $i_2q_2i_3q_3i_1q_1$ |
| 3 | $i_3q_3i_1q_1i_2q_2$ |
| 4 | $i_1q_1i_2q_2i_3q_3$ |

표 1과 2에서 No CoRe는 CoRe 기법을 적용하지 않고 고정된 심볼 맵핑으로 전송하는 것을 의미하고, CoRe1은 앞 절에서 설명한 기준에 제안된 심볼 맵핑 방법을 의미한다. CoRe2는 본 논문에서 제안하는 심볼 맵핑 방법을 의미한다. 표 3의 평균 LLR 값을 기반으로 각 행의 표준 편차의 크기를 구한 후, 그 값들의 제곱의 평균을 구하게 되면 No CoRe는 739.5556, CoRe1은 46.2222, CoRe2는 39.1111을 가진다. 따라서 CoRe2의 심볼 맵핑을 사용하여 심볼들의 성능을 평준화 함으로써 복호 성공 확률을 균등하게 하여 성능 이득을 얻을 수 있다.

두 번째로 선택된 심볼 맵핑의 전송 순서를 결정한다. 초기 전송은 고정되어 있으므로 표 2의 심볼 맵핑으로 고려할 수 있는 두 번째 전송 맵핑은 3가지이다. 각각의 경우에 표 1과 같이 표준 편차를 구한 후 제곱값의 평균을 구해주면 표 4와 같이 나타난다. 표에서 확인할 수 있듯이 심볼 맵핑 4를 두 번째로 전송할 경우, 표준 편차 제곱의 평균값이 최소가 되는 것을 알 수 있다. 남은 두 가지의 심볼 맵핑을 동일한 방법으로 세 번째 전송 맵핑으로 선택한 후 표준 편차 제곱의 평균값을 구해주면, 심볼 맵핑 2를 세 번째로 전송하는 경우에 더 작은 값을 가지게 된다. 따라서 표 5와 같은 전송 순서로 CoRe 기법의 심볼 맵핑을 적용한다.

IV. 모의실험 결과

본 절에서는 모의실험을 통해 기존의 기법과 제안된

표 6. 모의실험 환경

Table 6. Simulation environment.

| | | |
|-------------------------------|--|----------------------|
| 송·수신 안테나 ($N_T \times N_R$) | (1×1), (2×2) | |
| 오류정정 부호 | 3GPP LTE 터보 부호 - 부호율 : 0.5 - 길이 : 송신 QAM 심볼의 수 352개로 고정 | |
| 변조방식 | 64-QAM | |
| 채널 환경 | 시간 영역에서 상관 관계를 가지는 블록 페이딩 채널 | |
| 최대 전송 횟수 | 4, 12 | |
| 검출 방식 | ML 수신기 | |
| 반송파 주파수 | 2GHz | |
| OFDM | 부반송파 수 | 2048 |
| | CP 설정 | Normal cyclic prefix |

기법 사이의 성능을 비교하고, 그 결과를 분석한다. 3GPP-LTE 표준에 기반하여 시스템은 구성하였으며, 1/2 부호율의 터보부호를 사용한다^[11]. 자세한 모의실험 환경은 표 6과 같다.

전송 채널은 Jake's model을 사용하여 도플러 주파수에 따라 시간 영역에서 상관 관계를 가지는 채널을 고려하였으며^[12], 본 모의 실험에서는 도플러 주파수를 60Hz로 설정하였다. 그래프에서 x축은 수신기에서 측정 한 수신 SNR을 의미하며, 처리량은 패킷 전송시마다 발생하는 ACK 신호의 비율을 기준으로 측정하였다.

1. SISO (single-input single output)

그림 3과 4는 AWGN 채널에서 심볼 맵핑 방법에 따른 오율 성능과 처리량 성능을 나타낸 것이다. Full-CoRe는 총 12번의 재전송을 통해 심볼을 구성하는 각 비트의 평균 LLR 값을 동일하게 하는 심볼 맵핑 방법을 의미한다. 그리고 CoRe1과 CoRe2의 12번 전송으로 표시되어 있는 것은 오율의 공정한 비교를 위하여 4번 전송의 심볼 맵핑을 3번 반복하여 최대 12번 재전송한 것을 의미한다. 그림과 같이 No CoRe 기법은 고정된 심볼 맵핑을 사용하여 다이버시티 이득을 얻지 못하므로 가장 낮은 성능을 나타낸다. 반면 CoRe2 기법은 오율과 처리량 측면에서 다른 기법들보다 가장 좋은 성능을 나타낸다. 특히 CoRe1보다 50%의 처리량을 달성할 때, 약 1.5dB의 성능 이득이 있음을 알 수 있다. 이는 재전송에 따른 성상 좌표들의 전송 순서를 최적으로 결정해 줌으로써 두 번째 재전송에서 큰 복호 이득을

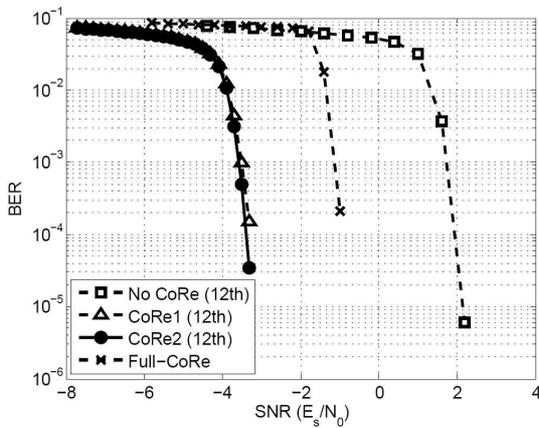


그림 3. AWGN 채널에서 심볼 맵핑에 따른 비트 오류 성능
 Fig. 3. Bit error rate of different symbol mapping methods over AWGN channel.

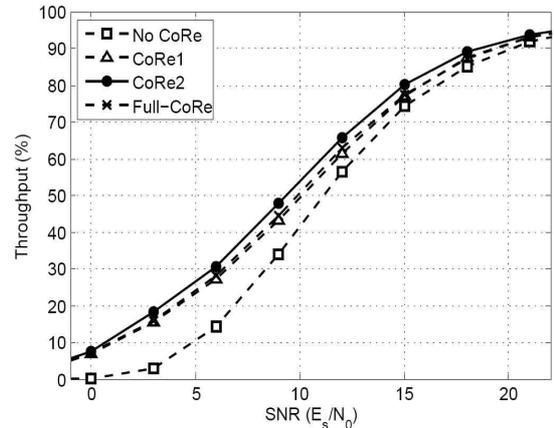


그림 6. 블록 페이딩 채널에서 SISO-OFDM 시스템의 심볼 맵핑에 따른 처리량 성능
 Fig. 6. Throughput of different symbol mapping methods in SISO-OFDM system over block fading channel.

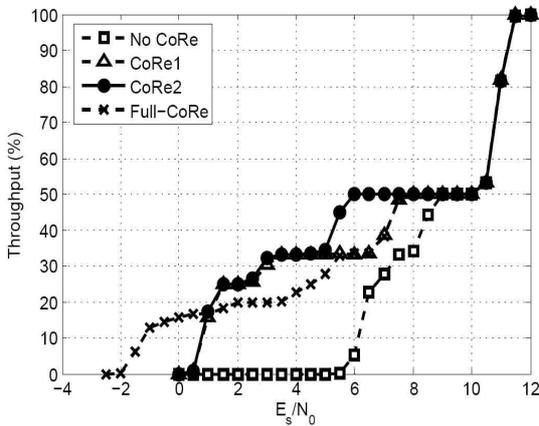


그림 4. AWGN 채널에서 심볼 맵핑에 따른 처리량 성능
 Fig. 4. Throughput of different symbol mapping methods over AWGN channel.

가지기 때문이다.

그림 5와 6은 블록 페이딩 채널에서 오류와 처리량 성능을 나타낸 것이다. 처리량 측면에서 CoRe2 기법은 Full-CoRe 기법이나 CoRe1 기법보다 3~15dB에서 약 4%의 처리량 성능 이득을 가진다. 따라서 페이딩 채널에서도 CoRe2 기법이 성능 이득을 가지는 것을 확인할 수 있다.

2. MIMO (multiple-input multiple-output)

그림 7~9는 송·수신 안테나가 각각 2개인 MIMO 시스템에서 심볼 맵핑에 따른 성능을 분석한 것이다. 그림 7에서 CoRe2 기법은 CoRe1 기법보다 뛰어난 오류 성능을 나

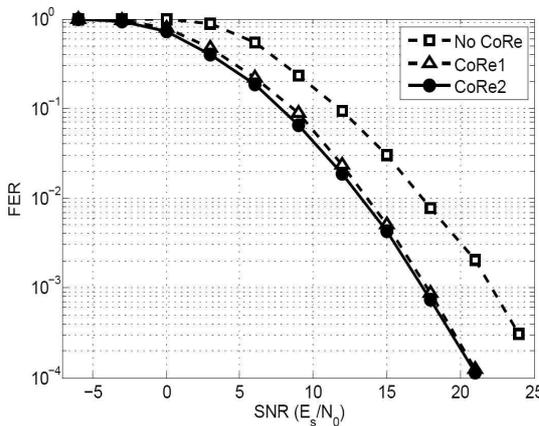


그림 5. 블록 페이딩 채널에서 SISO-OFDM 시스템의 심볼 맵핑에 따른 프레임 오류 성능
 Fig. 5. Frame error rate of different symbol mapping methods in SISO-OFDM system over block fading channel.

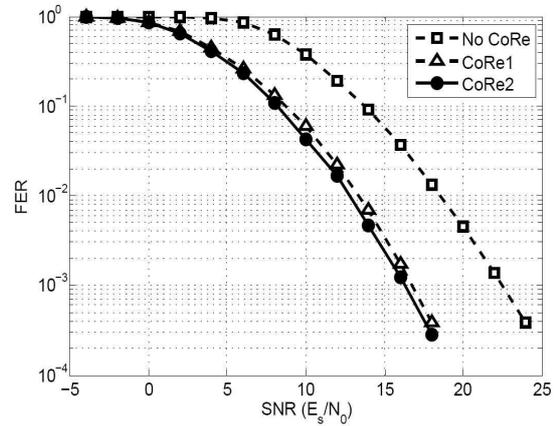


그림 7. 블록 페이딩 채널에서 MIMO-OFDM 시스템의 심볼 맵핑에 따른 프레임 오류 성능
 Fig. 7. Frame error rate of different symbol mapping methods in MIMO-OFDM system over block fading channel.

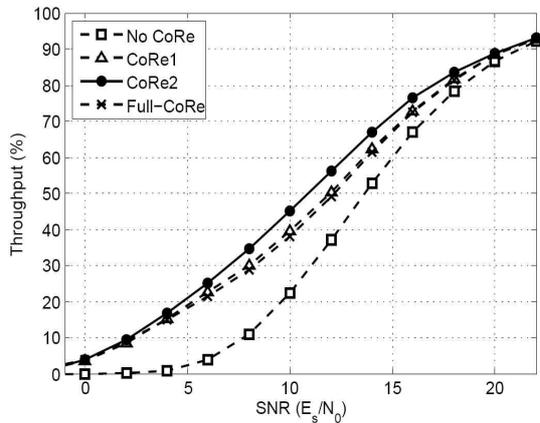


그림 8. 블록 페이딩 채널에서 MIMO-OFDM 시스템의 심볼 맵핑에 따른 처리량 성능

Fig. 8. Throughput of different symbol mapping methods in MIMO-OFDM system over block fading channel.

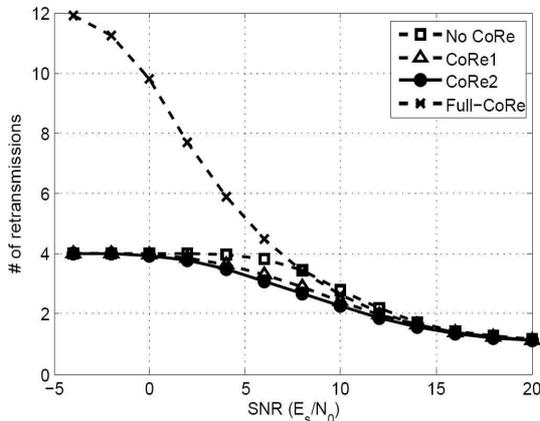


그림 9. 블록 페이딩 채널에서 MIMO-OFDM 시스템의 심볼 맵핑에 따른 재전송 횟수

Fig. 9. Number of retransmissions of different symbol mapping methods in MIMO-OFDM system over block fading channel.

타낸다. 또한 그림 8의 처리량 측면에서 CoRe2 기법은 최적의 성능을 나타내며, 10dB에서 CoRe1 기법과 Full-CoRe 기법에 비해서 각각 약 5.5%, 7%의 성능 이득을 가진다.

그림 9는 시스템 복잡도의 비교를 위해 심볼 맵핑에 따른 재전송 횟수를 나타낸 것이다. 그림에서 보듯이 5dB 이하의 낮은 SNR 영역에서는 Full-CoRe 기법의 재전송 횟수가 너무 크므로 복잡도의 증가로 인해 실제 시스템에 반영하기 어렵다는 것을 알 수 있다. 반면에 CoRe2 기법은 적은 전송 횟수로 가장 우수한 성능을 나타내므로 실제 시스템에 적용하기가 용이하다는 것을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 HARQ 프로토콜이 적용된 64QAM 변조 방식에서 기존의 방법보다 성능 이득을 얻을 수 있는 효율적인 CoRe 기법을 제시하였다. 제안한 방법은 제한된 전송횟수에서 심볼 맵핑을 선택하고, 선택된 심볼 맵핑의 전송 순서를 결정해 줌으로써 두 번째 재전송에서 성능 이득을 가지는 것을 확인할 수 있었다. 또한 페이딩 채널과 MIMO 시스템에 적용하여 성능을 분석해 봄으로써 실제 이동 통신 시스템에서의 적용 가능성을 확인할 수 있었다.

참 고 문 헌

- [1] S. Lin, D. J. Costello Jr., and M. J. Miller, "Automatic-repeat-request error-control schemes," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 22, no. 12, pp. 5-18, Dec. 1984.
- [2] S. B. Wicker, *Error Control Systems for Digital Communications and Storage*. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1994.
- [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] 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.
- [5] 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.
- [6] C. Wengerter, A. G. E. V. Elbwart and E. Seidel, "Constellation rearrangement: enhancement for multilevel modulation formats and transmit diversity," *Wireless Personal Communications*, Kluwer Academic Publishers, issue 29, pp. 35-45, 2004.
- [7] 3GPP, RAN WG#1 contribution R1-01-0237, Panasonic "Enhanced HARQ Method with Signal Constellation Rearrangement," *Laws Vegas, USA, February 27th-March 2nd 2001*.
- [8] D. Chase, "Code combining: A maximum-likelihood decoding approach for combining an arbitrary number of noisy packets," *IEEE Trans. Commun.*, vol. COM-33, pp. 385-393, May 1985.
- [9] Xinyu Gu, Kai Niu, and Weiling Wu, "A novel

efficient soft output demodulation algorithm for high order modulation,” Computer and Information Technology, 2004, pp. 493-498, Sept. 2004.

- [10] Min-li Jia, Jing-ming Kuang, and Zun-wen He, “Enhanced HARQ employing LDPC coded constellation rearrangement with 64QAM,” in Proc. ICCT’06 Commun. Tech. Conf., pp. 1-4, Nov., 2006.
- [11] 3GPP TS 36.212: “3rd Generation Partnership Project; Multiplexing and Channel Coding (Release 8)”.
- [12] W. C. Jakes, Microwave Mobile Communications. Piscataway, NJ: IEEE Press, 1994.

— 저 자 소 개 —



박 원 석(학생회원)
 2009년 성균관대학교 전자전기 공학과 학사 졸업.
 2011년 성균관대학교 휴대폰학과 석사 졸업.
 <주관심분야 : 디지털 통신, 다중 안테나 시스템>



조 충 기(학생회원)
 2011년 성균관대학교 전자전기 공학과 학사 졸업.
 2011년~현재 성균관대학교 휴대폰학과 석사 과정.
 <주관심분야 : 디지털 통신, 다중 안테나 시스템>



김 종 환(학생회원)
 2010년 성균관대학교 전자전기 컴퓨터공학과 학사 졸업.
 2010년~현재 성균관대학교 전자전기컴퓨터공학과 석사 과정.

<주관심분야 : 오류정정부호, 정보이론, 부호이론>



김 상 호(평생회원)-교신저자
 1998년 2월 서울대학교 전기공학부 학사 졸업
 2000년 2월 서울대학교 전기공학부 석사 졸업
 2004년 2월 서울대학교 전자·컴퓨터공학부 박사

2004년 3월~2006년 7월 삼성전자, 책임연구원
 2006년 8월~2007년 8월 박사후 연구원(USC)
 2007년 9월~현재 성균관대학교 정보통신공학부 조교수

<주관심분야 : 오류정정부호, 다중 안테나 시스템, 시퀀스, 협력 통신>