

다중 모드를 사용하는 OFDM-CDIM 시스템 설계와 성능 평가

Design and Performance Evaluation of OFDM-CDIM System Using Multiple Modes

안 창 영 · 유 흥 군

Changyoung An · Heung-Gyoon Ryu

요 약

본 논문에서는 기존 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 시스템보다 높은 성능과 스펙트럼 효율을 달성할 수 있는 OFDM-CDIM(Coded Direct Index Modulation) 시스템을 제안한다. 기존 OFDM-IM(Index Modulation) 및 DM(Dual Mode)-OFDM-IM 시스템은 높은 복잡도를 갖는 조합연산을 통해 각 부반송파의 인덱스에 추가적인 데이터를 할당하여 전송한다. 그러나 제안하는 시스템은 모드를 선택하는 정보를 각 부반송파에 추가 연산 없이 직접 할당하고, 선택된 모드 내에서 하나의 심볼을 선택하여 전송한다. 더욱이 부반송파의 인덱스에 할당되는 데이터에만 부호화를 수행하여 높은 부호율과 함께 우수한 성능 개선 효과를 얻는다. 시뮬레이션 결과를 통해 4개를 모드를 사용하는 4M(Four Modes)-OFDM-CDIM 시스템은 기존 4QAM(Quadrature Amplitude Modulation)을 사용하는 OFDM 시스템과 비교하여 AWGN(Additive White Gaussian Noise)과 Rayleigh 페이딩 환경에서 BER(Bit Error Rate) 성능과 전송 효율을 향상시킬 수 있음을 정량적으로 확인할 수 있다.

Abstract

An orthogonal frequency division multiplexing with coded direct index modulation(OFDM-CDIM) system that can achieve higher performance and spectral efficiency than previous OFDM systems is proposed. Previous OFDM with index modulation(IM) and OFDM-IM using dual modes systems allocate additional data to indices of respective subcarriers through combining operation with high complexity and then transmit them. However, the proposed system directly allocates the mode selection information to each subcarrier without performing additional operations. Then, the system selects and transmits one symbol in the selected mode. Furthermore, only the data allocated to the index of the subcarrier is encoded, and a good performance improvement effect is obtained with a high code rate. Simulation results show quantitatively that an OFDM-CDIM system using four modes improves bit error rate performance and transmission efficiency in additive white Gaussian noise and Rayleigh fading channel environments compared with a conventional OFDM system using 4-ary quadrature amplitude modulation.

Key words: OFDM-CDIM, Index Modulation, OFDM, OFDM-IM, Multi-Mode

I. 서 론

OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 기술

「이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2016R1D1A1B01008046).」

충북대학교 전자공학과(Department of Electronics Engineering, Chungbuk National University)

· Manuscript received March 27, 2018 ; Revised June 15, 2018 ; Accepted July 7, 2018. (ID No. 20180327-041)

· Corresponding Author: Heung-Gyoon Ryu (e-mail: ecomm@cnu.ac.kr)

은 4G(4th Generation) 이동통신을 포함하여 다양한 무선 통신 시스템에 적용되어 우수한 성능을 발휘하였다^{[1]~[3]}. OFDM은 다수의 부반송파에 데이터를 맵핑하여 전송하며, CP(Cyclic Prefix)를 이용하여 다중경로에 의한 ISI(Inter-Symbol Interference)를 효과적으로 완화함으로써 수신기의 낮은 복잡도 및 고속 처리를 달성하였다^[3]. 최근 이동통신 표준화 추진 단체인 3GPP(3rd Generation Partnership Project)에서는 5G 이동통신의 첫 번째 단계의 표준화인 Release-15를 발표하였다^[4]. 여기에서는 5G 기술을 기존 4G 시스템과 함께 사용하는 NSA(Non-Standalone) 방식을 보이고 있다. Release-15에서도 OFDM은 물리계층의 핵심 기술로 자리 잡고 있다. 5G에서는 OFDM을 다양한 주파수 대역을 사용하기 위하여 가변적인 부반송파 간격을 사용할 수 있도록 하였다^[4]. 이와 같이 OFDM은 현재 무선통신 분야에서 핵심적인 기술로 사용되고 있다. 그러나 차세대 무선통신 시스템은 다양한 KPIs(Key Performance Indicators)에서 높은 수준의 성능을 요구하기 때문에 OFDM을 개선하기 위한 다양한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

최근 OFDM을 개선하기 위한 연구 중 하나로 OFDM-IM(Index Modulation)에 관한 연구가 활발히 진행되고 있다^{[5]~[9]}. OFDM-IM은 데이터를 심볼(symbol)과 부반송파의 인덱스(index) 조합 정보에 맵핑(mapping)하여 전송한다^[6]. 여기에서 조합 정보는 전체 부반송파를 서브블록(sub-block)으로 나누고, 서브블록 내에서 사용하는 부반송파의 개수를 결정한 뒤, 이 부반송파를 배치시키는 가지 수를 나타낸다. OFDM-IM은 사용하는 부반송파의 개수에 따라 BER(Bit Error Rate) 성능과 스펙트럼 효율간의 trade-off 특성을 제공한다. 더 나아가, OFDM-IM에서 활성 부반송파와 비활성 부반송파에 서로 다른 성좌도의 심볼을 맵핑하는 DM(Dual Mode)-OFDM-IM에 대한 연구도 이루어졌다. 이 기술은 기존 OFDM-IM보다 높은 BER 성능을 제시한다^[9]. 그러나 이러한 시스템은 조합방식을 이용하여 각 부반송파의 인덱스에 맵핑하기 위한 비트열을 인덱스의 조합으로 변화하기 위하여 각 부반송파 별로 순차적인 계산이 요구된다. 이러한 방법을 Combinadics 알고리즘이라 한다^[10]. 이 방법을 사용하게 되면 하나의 다중반송파 심볼을 전송하기 위하여, 부반송파의 개수가 1,024개일 경우 1,024번의 순차적 연산처리가 요구되며, 개수가 4,096개일 경

우 4,096번의 순차적 연산처리가 요구된다. 이러한 처리는 시스템의 처리시간을 증가시키며, 시스템의 복잡도를 크게 증가시킬 수 있다.

본 논문에서는 OFDM-IM 및 DM-OFDM-IM과 같이 OFDM의 인덱스 정보를 활용하여 추가적인 정보를 전송하는 방법에 착안하여 새로운 시스템 모델을 제시한다. 제안하는 시스템은 다중모드를 사용하는 OFDM-CDIM(Coded Direct Index Modulation)이다. 제안하는 시스템은 데이터를 여러 성좌도로 구성된 다중 모드의 심볼과 부반송파의 각 인덱스에 직접 맵핑하여 전송한다. 부반송파에 맵핑된 데이터는 모드를 선택하는 정보로 이용된다. 제안하는 시스템은 OFDM-IM이나 DM-OFDM-IM과 달리 부반송파 인덱스에 데이터를 맵핑할 때 조합 방식을 사용하지 않기 때문에 시스템의 복잡도를 크게 줄일 수 있다. 더욱이, 부반송파에 맵핑되는 데이터에만 부호화를 수행하여, 부반송파의 인덱스에 맵핑된 데이터 뿐만 아니라 다중 모드에서 선택된 심볼을 정정함으로써 시스템의 성능을 대폭 개선시킨다.

본 논문에서는 우선 제안하는 OFDM-CDIM의 송수신 시스템과 신호처리 방법을 제시한다. 그 다음 AWGN(Additive White Gaussian Noise) 및 다중경로 페이딩(Multipath Fading) 환경에서 제안하는 시스템의 BER 성능을 평가하고 분석한다. 본 논문에서는 이러한 성능 및 특성 분석을 위하여 2개의 모드를 사용하는 2M(Two Modes)-OFDM-CDIM 및 4개의 모드를 사용하는 4M(Four Modes)-OFDM-CDIM 시스템을 설계하고, 시뮬레이션을 수행하였다.

II. 시스템 모델

기존 OFDM-IM 시스템의 경우, 데이터를 각 부반송파의 인덱스에 맵핑하기 위하여 Combinadics 알고리즘을 사용한다. 이 알고리즘은 각 활성 부반송파와 비활성 부반송파를 결정하기 위하여 순차적인 연산을 해야 한다^[10]. 이는 DM-OFDM-IM 시스템에서도 동일하다. 송신기에서 부반송파의 개수가 증가할수록 하나의 다중반송파 심볼을 생성할 때마다 요구되는 연산처리량이 증가하게 된다. OFDM-IM에서 부반송파의 개수가 n 이고, 선택되는 활성 부반송파의 개수가 k 일 때, 부반송파의 인덱스에 맵핑되는 비트열을 십진수로 바꾼 값인 D 는 다음과 같이 표현된다^[10].

$$D = C(s_k, k) + \dots + C(s_2, 2) + C(s_1, 1) \quad (1)$$

식 (1)에서 C 는 Combination 연산을 나타내고, $S = \{s_k, \dots, s_1\}$ 값은 선택되는 부반송파의 인덱스 조합을 나타낸다. 데이터 D 에 해당하는 조합 S 를 찾기 위하여 우선 D 보다 작거나 같은 $C(s_k, k)$ 후보 중 가장 큰 값을 찾아 s_k 를 결정한다. 그 다음, D 에서 $C(s_k, k)$ 값을 뺀 다음, 이 값보다 작거나 같은 $C(s_{k-1}, k-1)$ 후보 중 가장 큰 값을 선택하여 s_{k-1} 을 결정한다. 이러한 방법을 순차적으로 반복하여 s_1 까지 선택되면, 이 인덱스에 해당하는 부반송파에 데이터를 맵핑하여 전송한다. 이러한 방법은 부반송파의 수가 증가하게 되면, 반복처리 연산량 또한 증가하게 된다.

2-1 Proposed Transmitter

제안하는 OFDM-CDIM 시스템은 부반송파의 인덱스에 데이터를 직접 맵핑하고, 이 데이터를 이용하여 다중 모드 중에서 하나의 모드를 선택한다. 여기에서 모드 선택을 위해 부반송파에 할당되는 비트 열은 부호화되며, 부호화 되지 않은 시스템을 OFDM-DIM이라 한다. 모드가 선택되면 추가적인 데이터 비트를 이용하여 모드 내에 심볼을 선택하고, 이를 부반송파에 맵핑하여 전송한다. OFDM-CDIM 시스템은 여러 개의 모드를 사용할 수 있으며, 각 모드는 여러 개의 심볼로 구성된다.

그림 1은 2M-OFDM-CDIM 송신기의 블록도를 나타낸다. 2M-OFDM-CDIM은 2개의 모드를 사용한다. 각 모드는 4개의 심볼로 구성되어 있다. 이 송신기의 처리과정을 살펴보면, 우선 데이터 비트 열이 부반송파의 인덱스와 모드 내의 심볼에 맵핑되기 위해 나누어진다. 인덱스에 맵핑되는 비트 열은 컨볼루션(Convolution) 부호화가 이루어진다.

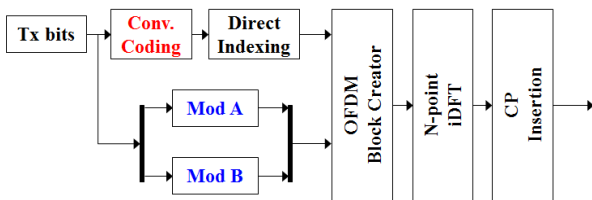


그림 1. 2M-OFDM-CDIM 송신기의 블록도
Fig. 1. Block diagram of transmitter for 2M-OFDM-CDIM.

어진다. 부호화된 비트 열은 각 부반송파에 순서대로 하나씩 맵핑된다. 현 2M-OFDM-CDIM은 2개의 모드가 사용됨으로 모드를 구분하기 위하여 1개의 비트만이 필요하다. 따라서 각 부반송파에는 부호화된 비트 1개가 직접 맵핑된다. 만약 OFDM-CDIM이 4개, 8개 16개의 모드를 사용한다면, 각각 2, 3, 4개의 비트가 하나의 부반송파에 맵핑되어 모드를 선택하는데 사용된다. 부반송파의 인덱스에 맵핑이 완료되면, 각 부반송파에 맵핑된 데이터에 따라 각 부반송파에 사용될 모드를 선택한다. 만약 맵핑된 비트가 0일 경우 모드 A를 선택하며, 1일 경우 모드 B를 선택한다. 각 부반송파를 위한 모드가 선택되면, 추가적인 데이터 비트 열이 각 모드 내의 심볼로 맵핑된다. 모든 부반송파에 대한 심볼 맵핑이 완료된 후 iDFT(inverse Discrete Fourier Transform) 연산이 수행된다. 그 다음 다중경로 채널환경에 ISI에 대한 영향을 완화하기 위하여 CP를 추가한 후 송신한다.

그림 2는 2M-OFDM-CDIM 시스템의 데이터 맵핑 방법을 나타낸다. 이 시스템은 2개의 모드를 사용하므로, 각 부반송파마다 이를 구분하기 위한 1개의 비트가 필요하다. 따라서 부호화된 비트들은 각 부반송파에 하나씩 맵핑된다. 그 다음 맵핑된 비트에 따라 모드 A와 모드 B를 선택한다.

그림 3은 2M-OFDM-CDIM을 위한 두 가지 모드를 나타낸다. 각 부반송파에서 사용할 모드가 선택되면, 해당 모드 내에서 하나의 심볼을 선택하여 부반송파에 맵핑한다. 각 모드는 QPSK(Quadrature Phase Shift Keying) 심볼로 구성되어 있으므로, 2개의 비트를 이용하여 하나의 심볼을 선택한다. 부반송파의 인덱스에 맵핑된 비트가 1개, 모드에서 심볼을 선택하기 위한 비트가 2개이므로 부반

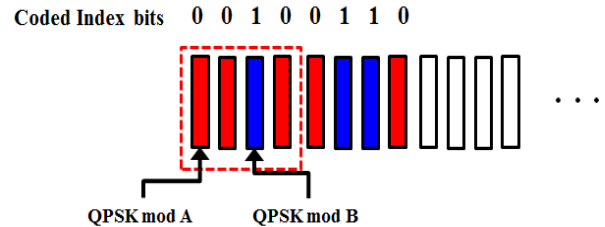


그림 2. 2M-OFDM-CDIM 시스템의 데이터 맵핑 방법
Fig. 2. Data mapping method for 2M-OFDM-CDIM system.

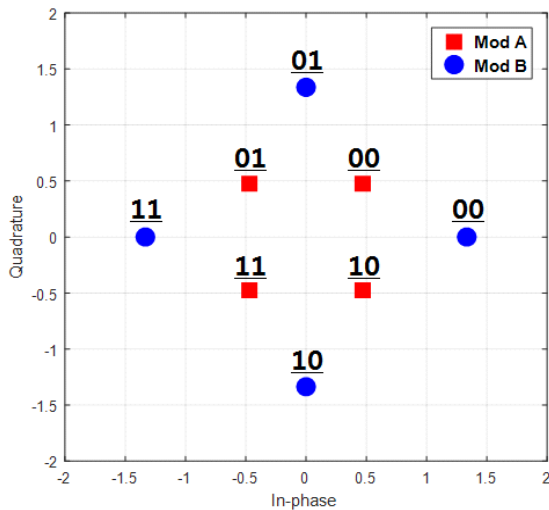


그림 3. 2M-OFDM-CDIM 시스템에서 사용하는 2가지 모드
Fig. 3. Two modes used in 2M-OFDM-CDIM system.

송파 하나 당 3개의 비트를 전송할 수 있다. 그러나 2M-OFDM-CDIM에서 인덱스에 할당되는 비트는 부호화 되어 있기 때문에 부호율 만큼 비트 수가 감소하게 된다. 본 논문에서는 부반송파의 인덱스에 할당되는 비트를 1/2의 부호율로 부호화 한다. 따라서 실제 전송되는 비트 수는 하나의 부반송파 당 2.5 비트가 된다.

여기에서 모드 A의 성좌도가 갖는 크기를 R_1 , 모드 B의 성좌도가 갖는 크기를 R_2 라고 할 때, R_1 과 R_2 의 비율에 따라 시스템의 성능이 변화될 수 있다. 이에 대한 사항은 III장에서 보이도록 한다.

그림 4는 4개의 모드를 사용하는 OFDM-CDIM 송신기의 블록도를 나타낸다. 이 4M-OFDM-CDIM 송신기는 그림 1의 2M-OFDM-CDIM과 전체적인 신호 처리 원리는 같다. 그러나 이 송신기는 4개의 모드를 사용함으로 이를

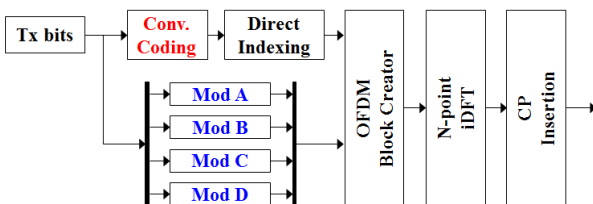


그림 4. 4M-OFDM-CDIM 송신기의 블록도
Fig. 4. Block diagram of transmitter for 4M-OFDM-CDIM.

구분하기 위하여 각 부반송파에 2개의 부호화된 비트가 할당된다. 이 2개의 비트를 이용하여 4개중 1개의 모드를 선택한다. 모드가 선택된 다음에는 2M-OFDM-CDIM과 같이 선택된 모드 내에서 2개의 비트를 이용하여 하나의 심볼을 선택하게 된다.

그림 5는 4M-OFDM-CDIM 시스템의 데이터 맵핑 방법을 자세히 보여준다. 부호화된 비트 열은 2개씩 각 부반송파에 맵핑된다. 연속된 부반송파에 맵핑된 비트가 00, 01, 10, 11일 때 모드 A, 모드 B, 모드 C, 모드 D가 각각 선택된다. 그림 6은 4M-OFDM-CDIM 시스템에서 사용하는 4개의 모드를 나타낸다. 각 모드는 4개의 심볼로 구성되어 있으며, 이 중 하나의 심볼을 선택하여 부반송파에 맵핑하기 위하여 2개의 비트가 사용된다. 즉, 4M-OFDM-

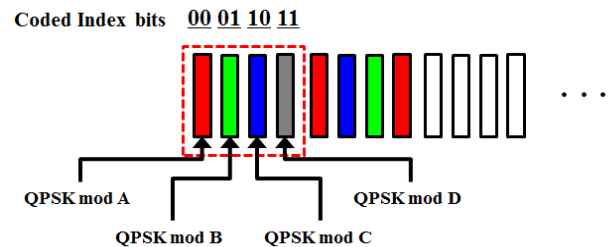


그림 5. 4M-OFDM-CDIM 시스템의 데이터 맵핑 방법
Fig. 5. Data mapping method for 4M-OFDM-CDIM system.

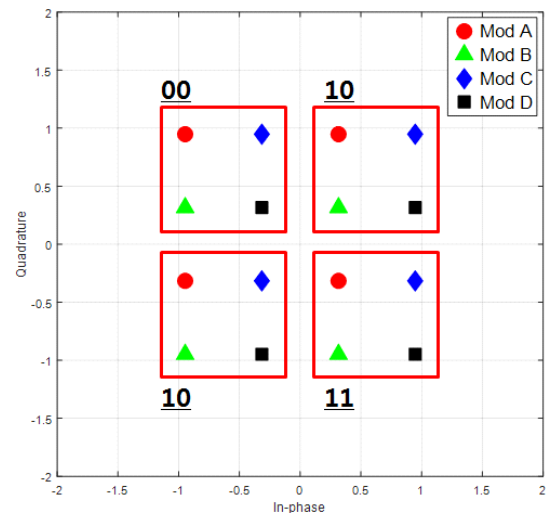


그림 6. 4M-OFDM-CDIM 시스템에서 사용하는 4가지 모드
Fig. 6. Four modes used in 4M-OFDM-CDIM system.

CDIM 시스템에서는 모드 선택을 위해 각 부반송파에 2개의 비트가 할당되고, 모드 내의 심볼을 선택하기 위해 2개의 비트가 선택되므로 하나의 부반송파는 4개의 비트를 전송할 수 있다. 그러나 4M-OFDM-CDIM 시스템에서 모드를 선택하기 위한 비트는 1/2의 부호율로 부호화되어 있기 때문에 하나의 부반송파를 통해 전송되는 실제 비트의 수는 3 비트가 된다.

2-2 Proposed Receiver

그림 7은 OFDM-DIM 수신기의 블록도를 나타낸다. OFDM-DIM 시스템은 모드 선택을 위해 부반송파에 할당되는 비트 열을 부호화하지 않는다. 이 수신기의 처리 과정을 살펴보면 우선 수신 받은 신호에서 CP가 제거되고, DFT 연산이 수행된다. 그 후 주파수 영역에서 ZF(Zero Forcing)이나 ML(Maximum likelihood) 방법을 사용하여 채널 등화를 수행한다. 그 다음 전체 모드 구성 정보를 이용하여 모드와 심볼을 판정한다. 우선 어떤 모드와 가장 가까운 운지를 계산하고, 가까운 모드가 선택되며, 해당 모드를 구성하는 모든 심볼과 비교하여 가장 가까운 심볼을 선택한다. 모드와 심볼이 선택되면 이를 비트 정보로 변환한다.

그림 8은 OFDM-CDIM 수신기의 블록도를 나타낸다. OFDM-CDIM 시스템은 모드 선택을 위한 비트 열이 부호화되어 있으므로 OFDM-DIM 시스템보다 높은 복잡도를 갖는 수신기가 요구된다. OFDM-CDIM 수신기의 처리 과정을 살펴보면, 우선 수신받은 신호에서 CP를 제거하고, DFT 연산을 수행한다. 그 다음 주파수 영역에서 등화를 수행한다. 등화가 완료된 심볼을 이용하여 모드를 먼저

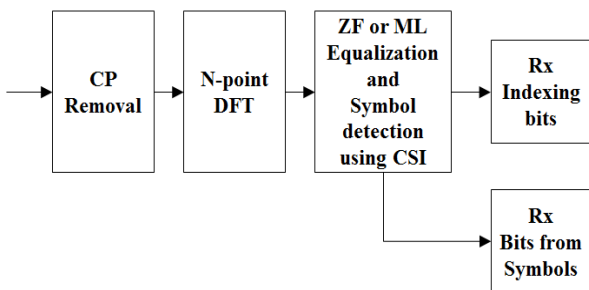


그림 7. OFDM-DIM 수신기의 블록도
Fig. 7. Block diagram of OFDM-DIM receiver.

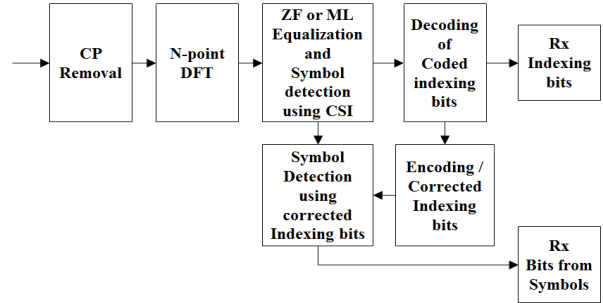


그림 8. OFDM-CDIM 수신기의 블록도
Fig. 8. Block diagram of OFDM-CDIM receiver.

판정한다. 모드 판정이 완료되면 이를 비트 열로 변환하고 복호화한다. 본 논문에서는 OFDM-CDIM의 송신기에서 콘볼루션 부호를 사용하였기 때문에 수신기에서 VD(Viterbi Decoder)를 사용하여 복호화를 수행한다. 복호화가 완료되면 이 비트를 최종 모드 선택 정보로 판정한다. 그 다음 복호에 의해 정정된 비트를 다시 부호화한다. 이 과정을 통해 잘못 선택된 모드가 정정된다. 정정된 모드 내에서 각 부반송파에 맵핑된 심볼을 판정하고, 이를 최종 복조한다.

III. 시뮬레이션 결과 및 분석

본 논문에서는 제안하는 다중모드를 사용하는 OFDM-CDIM 시스템의 성능을 평가하고, 비교 분석하기 위하여 2M-OFDM-CDIM 및 4M-OFDM-CDIM 시스템을 설계하고, 이를 표 1과 같은 환경에서 시뮬레이션하였다. 부반송파는 1,024개, CP의 길이는 256을 고려하였다. 그리고 256개의 탭(tap)을 갖는 Rayleigh 페이딩 채널과 AWGN 채널을 고려하였다. 본 논문에서의 효율은 하나의 부반송파 당 단위 시간에 전송할 수 있는 비트의 수를 나타낸다.

그림 9와 그림 10은 2M-OFDM-DIM 시스템을 구성하는 모드 A와 모드 B의 크기 비율 R2/R1에 대한 시스템의 성능을 평가한 것이다. 여기에서는 R2/R1이 2일 경우, 가장 좋은 성능을 갖는 것을 확인할 수 있다. 따라서 이 후 진행되는 시뮬레이션 결과는 모두 R2/R1의 비율을 2로 설정하였다.

그림 11은 AWGN 및 Rayleigh 페이딩 채널에서 2M-OFDM-CDIM 시스템의 성능을 평가한 것이다. 여기에서

표 1. 시뮬레이션 환경

Table 1. Simulation environment.

Parameters	Values
Symbol type	QPSK or 4-QAM
Modulation	2M-OFDM-DIM 2M-OFDM-CDIM 4M-OFDM-DIM 4M-OFDM-CDIM
# of subcarriers	1,024
CP length	256
Channel	256-taps random Rayleigh channel
Constraint length(CL)	3, 7
Code rate for indexing bits	1/2
Code rate of total system	2M-OFDM-CDIM : 5/6 4M-OFDM-CDIM : 3/4
Efficiency	2M-OFDM-DIM : 3 bits/Hz 2M-OFDM-CDIM : 2.5 bits/Hz 4M-OFDM-DIM : 4 bits/Hz 4M-OFDM-CDIM : 3 bits/Hz

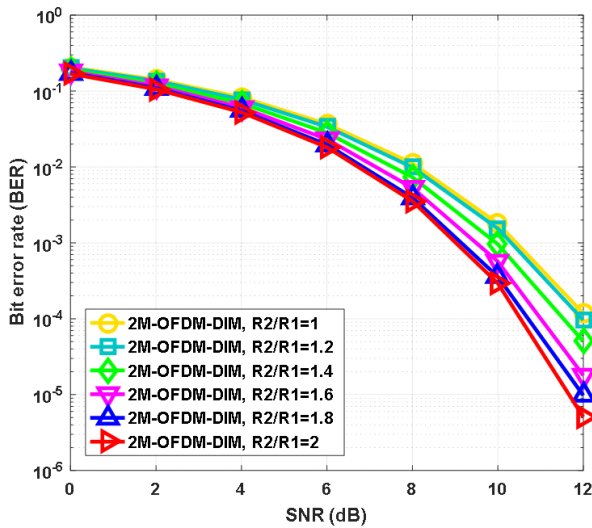


그림 9. R1과 R2 비율에 따른 2M-OFDM-DIM 시스템의 BER 성능

Fig. 9. BER performance of 2M-OFDM-DIM system according to ratio of R1 and R2.

는 모드 선택을 위한 비트 열에 부호화를 수행할 경우, 시스템의 성능을 효과적으로 개선시킬 수 있음을 확인할

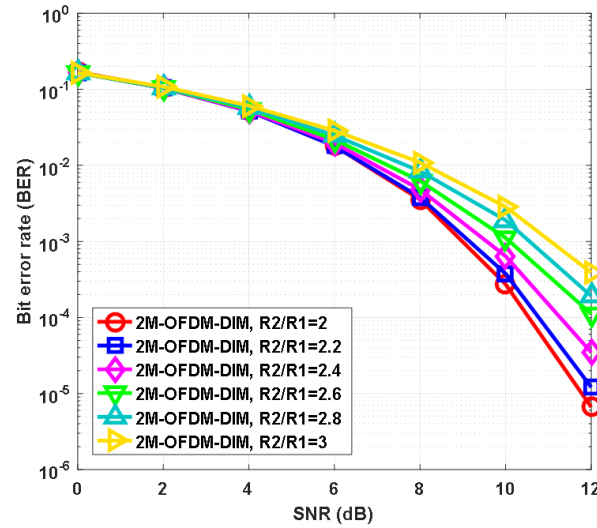


그림 10. R1과 R2 비율에 따른 2M-OFDM-DIM 시스템의 BER 성능

Fig. 10. BER performance of 2M-OFDM-DIM system according to ratio of R1 and R2.

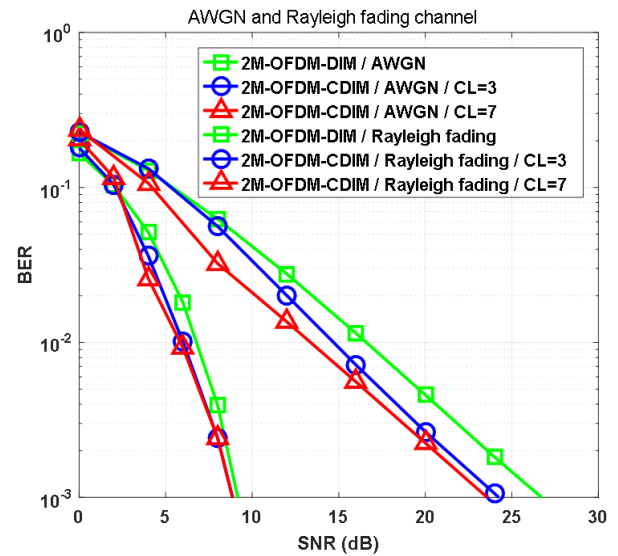


그림 11. AWGN 및 Rayleigh 페이딩 채널에서 2M-OFDM-CDIM 시스템의 BER 성능

Fig. 11. BER performance of 2M-OFDM-CDIM system over AWGN and Rayleigh fading channel.

수 있다. AWGN 채널에서는 부호화에 대한 성능 향상 효과가 크지 않으나 Rayleigh 페이딩 채널에서는 구축장 길

이(constraint length: CL)가 7일 경우 부호화를 통해 많은 성능 개선이 이루어짐을 확인할 수 있다. 정량적으로 살펴보면, 10^{-3} 의 BER을 기준으로 2M-OFDM-DIM 시스템은 약 26.7 dB의 SNR이 요구되며, 2M-OFDM-CDIM 시스템은 약 23.6 dB의 SNR이 요구된다. 두 시스템의 SNR 차이는 약 3.1 dB이다.

그림 12는 AWGN 채널에서 4M-OFDM-CDIM과 기존 OFDM 시스템의 BER 성능을 비교한 것이다. 4M-OFDM-CDIM 시스템이 7의 구속장 길이를 사용한 부호를 사용하였을 때, SNR이 7 이상인 경우 4QAM 변조를 사용하는 OFDM 시스템보다 우수한 성능을 보임을 확인할 수 있다. 4QAM 변조를 사용하는 OFDM 시스템의 효율은 2비트이며, 4M-OFDM-CDIM 시스템의 효율은 3비트이다. 즉, 성능과 효율 모두 우수한 시스템을 확인할 수 있다. 정량적으로 살펴보면, 10^{-5} 의 BER을 기준으로 4M-OFDM-CDIM(CL=7) 시스템은 8.8 dB의 SNR을 요구하며, 4M-OFDM-CDIM(CL=3) 시스템은 10.6 dB의 SNR을 요구한다. 기존 4QAM 변조를 사용하는 OFDM 시스템은 9.6 dB의 SNR을 요구한다. 여기에서 구속장의 길이가 길어질수록 성능은 더욱 향상되나, 시스템의 복잡도가 증가하게 된다.

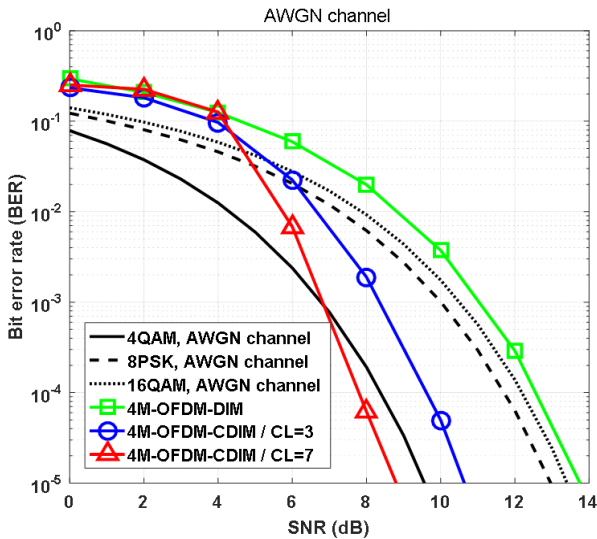


그림 12. AWGN 채널에서 4M-OFDM-CDIM과 기존 OFDM 시스템의 BER 성능 비교

Fig. 12. BER performance comparison of 4M-OFDM-CDIM and conventional OFDM system over AWGN channel.

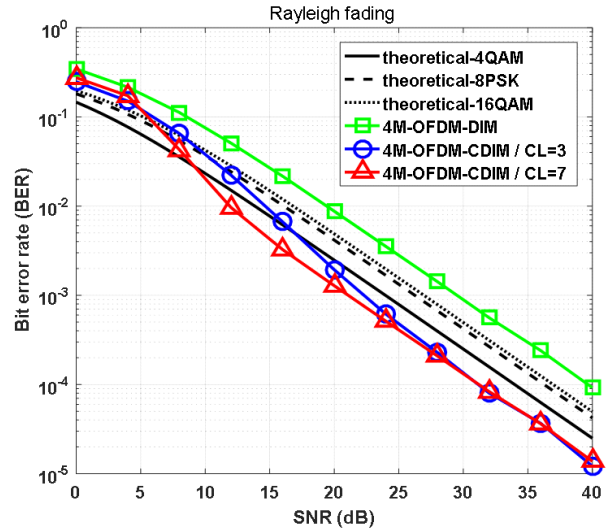


그림 13. Rayleigh 페이딩 채널에서 4M-OFDM-CDIM과 기존 OFDM 시스템의 BER 성능 비교

Fig. 13. BER performance comparison of 4M-OFDM-CDIM and conventional OFDM system over Rayleigh fading channel.

그림 13은 Rayleigh 페이딩 채널에서 4M-OFDM-CDIM과 기존 OFDM 시스템의 BER을 비교한 것이다. 10^{-4} 의 BER을 기준으로 4M-OFDM-CDIM(CL=7) 시스템은 31.2 dB의 SNR이 요구되며, 기존 OFDM 시스템은 변조 레벨이 4QAM일 때 약 34 dB의 SNR이 요구하므로 제안하는 4M-OFDM-CDIM(CL=7) 시스템은 약 2.8 dB의 SNR을 개선시키는 것을 확인할 수 있다. 전송 효율 측면에서 보면, 하나의 부반송파를 기준으로 할 때 4QAM 변조 시스템은 2비트를 전송하고 제안하는 4M-OFDM-CDIM 시스템은 3비트를 전송한다. 즉, 결과적으로 제안하는 시스템은 Rayleigh 페이딩 채널에서도 전송 효율뿐만 아니라, 시스템의 성능을 모두 개선시킬 수 있음을 확인할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 다중 모드를 사용하는 OFDM-CDIM 시스템을 제안하고, 시스템의 성능을 평가하였다. 제안하는 시스템은 데이터를 심볼과 부반송파의 인덱스에 맵핑하여 전송한다. 부반송파의 인덱스에 맵핑된 비트는 모드를 선택하는데 사용되며, 모드가 선택되면 모드 내에서 심볼

을 선택하게 된다. 이러한 처리 과정과 함께 전송 효율을 적게 감소시키면서 성능을 크게 개선시키기 위하여 부반송파의 인덱스에 할당되는 비트 열에 부호화를 수행한다. 이러한 방법으로 수신처에서 모드를 정정하고, 모드의 정정을 통해 수신 받은 심볼까지 정정할 수 있는 효과를 얻는다. 시뮬레이션 결과, 제안하는 2M-OFDM-CDIM 시스템은 부반송파의 인덱스에 맵핑되는 비트 열의 부호화를 통해 Rayleigh 페이딩 환경에서 10^{-3} 의 BER을 기준으로 약 3.1 dB의 SNR을 개선시킴을 확인하였으며, 4M-OFDM-CDIM 시스템은 같은 조건에서 약 8.5 dB의 SNR을 개선시킴을 확인하였다. 더욱이 4M-OFDM-CDIM 시스템은 경우 기존 4QAM 변조를 사용하는 OFDM 시스템과 비교할 때, AWGN 및 Rayleigh 채널에서 전송 효율과 성능 모두를 개선시킬 수 있는 시스템이다.

References

[1] R. Zhang, M. Wang, L. X. Cai, Z. Zheng, X. Shen, and L. L. Xie, "LTE-unlicensed: The future of spectrum aggregation for cellular networks," *IEEE Wireless Communications*, vol. 22, no. 3, pp. 150-159, Jun. 2015.

[2] M. Simsek, A. Aijaz, M. Dohler, J. Sachs, and G. Fettweis, "5G-enabled tactile internet," *IEEE Journal on Selected Areas in Communications*, vol. 34, no. 3, pp. 460-473, Mar. 2016.

[3] C. Shahriar, M. La Pan, M. Lichtman, T. C. Clancy, R. McGwier, and R. Tandon, et al., "PHY-layer resiliency in OFDM communications: A tutorial," *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 17, no. 1, pp. 292-314, 2015.

[4] H. Lee, Y. Chung, D. Kim, R. Ha, Y. I. Jo, and D. Kim, "The status and future prospects of 5G standardization in 3GPP," in *Proceedings of Symposium of the Korean Institute of Communications and Information Sciences*, Jun, 2017, vol. 2017, no. 6, pp. 803-804.

[5] E. Basar, "Index modulation techniques for 5G wireless networks," *IEEE Communications Magazine*, vol. 54, no. 7, pp. 168-175, Jul. 2016.

[6] M. Wen, X. Cheng, M. Ma, B. Jiao, and H. V. Poor, "On the achievable rate of OFDM with index modulation," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 64, no. 8, pp. 1919-1932, Apr. 2016.

[7] T. Datta, H. S. Eshwaraiah, and A. Chockalingam, "Generalized space-and-frequency index modulation," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 65, no. 7, pp. 4911-4924, Jul. 2016.

[8] E. Basar, M. Wen, R. Mesleh, M. Di Renzo, Y. Xiao, and H. Haas, "Index modulation techniques for next-generation wireless networks," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 16693-16746, 2017.

[9] X. Zhang, H. Bie, Q. Ye, C. Lei, and X. Tang, "Dual-mode index modulation aided OFDM with constellation power allocation and low-complexity detector design," *IEEE Access*, vol. 5, pp. 23871-23880, 2017.

[10] E. Başar, Ü. Aygözü, E. Panayircı, and H. V. Poor, "Orthogonal frequency division multiplexing with index modulation," *IEEE Transactions on Signal Processing*, vol. 61, no. 22, pp. 5536-5549, Nov. 2013.

안 창 영



2013년 2월: 충북대학교 전자공학과 (공학사)
 2015년 2월: 충북대학교 전자공학과 (공학석사)
 2015년 3월~현재: 충북대학교 전자공학과 박사과정
 [주 관심분야] 무선통신 시스템, 신호처리, B5G 이동통신 시스템

유 흥 균



1988년~현재: 충북대학교 전자공학과 교수
 2002년 3월~2004년 2월: 충북대학교 컴퓨터정보통신연구소 소장
 [주 관심분야] 무선통신시스템, 위성통신, B5G/6G 이동통신 시스템, 통신회로 설계 및 통신 신호처리