

유저 분포 환경에 따른 OFDM-IM 시스템의 스펙트럼 효율 평가 및 분석

안 창 영*, 유 흥 균^o

Spectral Efficiency Evaluation and Analysis of OFDM-IM System According to User Distribution Environments

Changyoung An*, Heung-Gyoon Ryu^o

요 약

본 논문에서는 OFDM-IM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing with Index Modulation) 시스템의 원리 및 신호처리 방법을 알아보고, 이동통신 및 WLAN(Wireless Local Area Network) 환경에서 유저의 분포에 따른 OFDM-IM 시스템의 처리량 향상 평가와 함께 기존 OFDM 시스템과 비교 분석하였다. OFDM-IM 시스템에서는 서브블록 내에 사용하는 부반송파의 개수를 설정함으로써 성능과 효율간의 Trade-off 특성을 결정한다. 본 논문에서는 OFDM-IM 시스템이 여러 디지털 변조를 사용할 경우 얻을 수 있는 스펙트럼 효율을 평가하고 정량적으로 제시하였다. 다음으로 이동통신 및 WLAN 환경에서 각각 3가지 유저 분포 시나리오에 따른 OFDM-IM 시스템의 처리량을 평가하고 기존 OFDM 시스템과 비교 분석하였다. 시뮬레이션 결과, OFDM-IM 시스템은 모든 환경에서 OFDM 시스템 보다 높은 처리량을 달성할 수 있음을 확인하였으며, 특히 저차 변조를 사용하는 비율이 높은 WLAN 환경과 유저가 셀의 가장자리에 집중된 시나리오에서 처리량 향상이 더욱 높은 것을 확인하였다.

Key Words : OFDM-IM, user distribution, spectral efficiency, mobile environments, WLAN, OFDM

ABSTRACT

In this paper, we examine the principle and signal processing method of orthogonal frequency division multiplexing with index modulation (OFDM-IM). And then we evaluate throughput improvement of OFDM-IM system according to user distribution in mobile communication and wireless local area network (WLAN) environment and compare it with existing OFDM system. In OFDM-IM system, the tradeoff characteristic between performance and efficiency is determined by setting the number of subcarriers used in the subblock. In this paper, we present quantitatively the spectral efficiency of the OFDM-IM system using a range of digital modulations. We also evaluate the throughput of the OFDM-IM system according to three user distribution scenarios in mobile communication and WLAN environment, respectively, and compare it with the existing OFDM system. Simulation results show that the OFDM-IM system achieves higher throughput than the OFDM system in all environments. Especially, it is confirmed that the throughput improvement of the OFDM-IM system is higher in the WLAN environment using the low-order modulation and in the scenario where the user is concentrated at the edge of the cell.

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

• First Author : (0000-0002-7829-7866)Department of electronic engineering, Chungbuk National University, acy890217@naver.com, 학생회원

^o Corresponding Author : (0000-0002-7368-9860)Department of electronic engineering, Chungbuk National University, ecomm@cbu.ac.kr, 정회원

논문번호 : 2018-03-060, Received March 19, 2018; Revised June 1, 2018; Accepted June 4, 2018

I. 서 론

최근 이동통신 표준화를 추진하는 3GPP(3rd Generation Partnership Project)에서는 5G(5th Generation) 이동통신 표준의 첫 걸음인 Release-15를 발표하였다. 여기에서는 기존의 4G 이동통신 기술과 5G를 위한 새로운 기술이 함께 사용되는 NSA(Non-Standalone) 방안을 제시하고 있다¹⁾. 이 1단계 표준안에서도 4G 이동통신과 같이 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 변조 기술이 핵심적으로 사용된다^{2,3)}. OFDM은 다중 반송파를 사용하는 기술로써, CP(Cyclic Prefix)를 활용하여 다중경로 페이딩에 의한 ISI(Inter-Symbol Interference)를 효과적으로 처리하고 고속 수신처리를 할 수 있는 장점을 가지고 있다. 그러나 5G는 각 시나리오에 따라 4G 이동통신에 비하여 더욱 높은 수준의 성능을 요구한다. 5G를 위한 2단계 표준안에서는 이러한 요구 수준을 만족시키기 위해 보다 진보된 기술을 요구하고 있다. 물리계층의 변조 기술인 OFDM 역시 개선 및 성능 향상이 이루어져야 한다. 이러한 흐름에 맞추어 OFDM을 보다 향상시키는 연구가 활발히 이루어지고 있다.

5G 이동통신의 다양한 시나리오에 적용하기 위한 OFDM 기반의 기술 중 하나로 OFDM-IM(Index Modulation)이 있다^{4,7)}. OFDM-IM은 데이터를 송신 심볼과 부반송파를 할당하는 조합의 수에 맵핑(Mapping)하여 전송한다⁴⁾. 현재 이와 관련된 많은 연구가 진행되고 있다. OFDM-IM에서는 사용하는 부반송파의 수에 따라 송신 심볼의 수와 부반송파를 할당하는 조합의 수가 바뀌게 되며, 이로 인하여 전송 효율이 변하게 된다. 사용하는 부반송파의 수가 적으면, 한 번에 송신되는 심볼의 수가 적어지므로 전송 효율이 감소하게 된다. 그러나 부반송파를 할당하는 조합의 수는 증가하거나 감소될 수 있다. 이 조합의 수가 증가하면 부반송파 인덱스 정보에 더 많은 데이터를 할당할 수 있으며, 반대로 이 조합의 수가 감소하면 부반송파 인덱스 정보에 맵핑할 수 있는 데이터가 적어지게 된다. 즉, OFDM-IM은 사용하는 부반송파의 수를 변경하여 시나리오에서 요구하는 특성을 향상시킬 수 있다.

이동통신 시스템에서 기지국을 중심으로 하여 거리가 멀어질수록 거리에 의해서 신호가 감쇄되며, 채널 환경으로 인하여 성능 열화가 심화될 수 있다. 따라서 셀의 가장자리나 채널 환경이 열악한 지역에서는 저차 변조를 사용하여 송수신을 하므로 통신 속도의 저

하가 야기된다. 이러한 현상은 WLAN(Wireless Local Area Network) 시스템에서도 유사하게 나타난다. 이와 같은 통신 속도 저하를 극복하기 위하여 OFDM-IM의 적용을 고려해 볼 수 있다. OFDM-IM은 BPSK(Binary Phase Shift Keying), 4-QAM(Quadrature Amplitude Modulation)과 같은 저차 변조를 사용하는 OFDM 시스템에 IM을 적용할 경우 전송 효율의 향상을 기대할 수 있다. OFDM-IM에서 송신 심볼과 부반송파 인덱스 정보에 각각 맵핑되는 데이터의 수는 기존 OFDM 시스템에 비하여 많기 때문이다. 여기에서 OFDM-IM에서는 한 번에 전송되는 데이터의 양을 최대화하기 위하여 변조레벨에 따라 사용되는 최적의 부반송파의 수를 찾는 것이 중요하다.

본 논문의 목적은 이동통신 시스템이나 WLAN 시스템에 OFDM-IM 시스템을 적용하였을 때 얻을 수 있는 통신 용량을 확인하는 것이다. 이를 위해 우선 OFDM-IM 시스템에 대하여 알아보고 최적의 전송 효율을 갖도록 하는 OFDM-IM 시스템을 구성 방법을 살펴본다. 그 다음, 이동통신 시스템 및 WLAN 환경에서 다양한 유저 분포를 고려하여 기존 OFDM 시스템 및 OFDM-IM 시스템의 통신 용량을 비교한다.

II. OFDM-IM 시스템

2.1 시스템 모델

OFDM-IM 시스템은 데이터를 심볼과 사용하는 부반송파의 조합 정보에 각각 맵핑하여 송수신한다^{4,5)}. OFDM-IM 시스템은 사용하는 부반송파의 개수를 조절하여 시스템의 BER(Bit Error Rate) 성능과 전송 속도간의 Trade-off를 결정한다. 즉, 부반송파의 개수에 따라 전송 속도를 낮추고 시스템의 BER 성능을 향상시키거나, 시스템의 BER 성능을 일부 열화 시키면서 전송 속도를 향상시킬 수 있다.

그림 1은 OFDM-IM 송신기의 블록도를 나타낸다. OFDM-IM 송신 처리과정을 보면, 우선 데이터 비트가 입력되면 이를 각각의 서브블록(Sub-block)에서 요구하는 비트의 수로 나눈다. 하나의 서브블록이 전송할 수 있는 비트의 수는 z 개이며 서브블록의 수는 M 개이므로 한 번에 전송할 수 있는 전체 비트의 수는 $g = z * M$ 개 이다. 여기에서 전체 부반송파를 서브블록으로 나누는 이유는 전체 부반송파의 개수가 클수록 너무 많은 조합의 수가 생성되며 이는 시스템의 복잡도를 크게 증가시킬 수 있기 때문이다. 따라서 전체

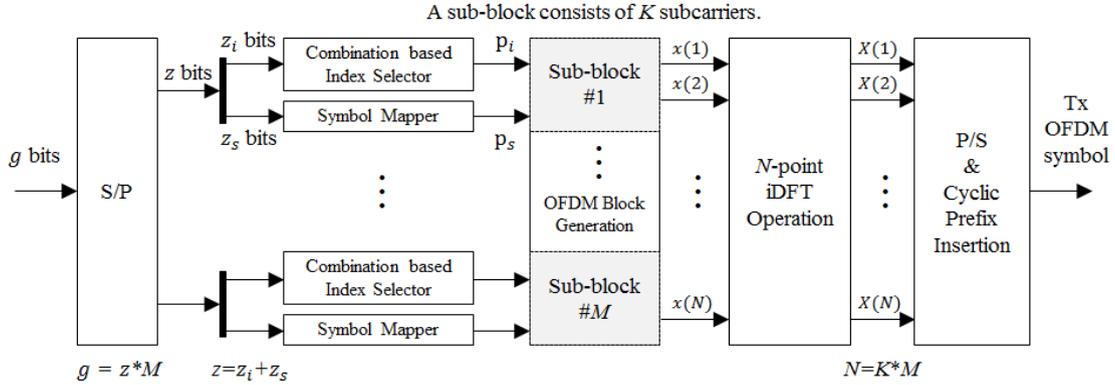


그림 1. OFDM-IM 송신기의 블록도.
Fig. 1. Block diagram of OFDM-IM transmitter.

부반송파를 서브블록으로 나누며, 하나의 서브블록은 K 개의 부반송파로 구성된다.

각각의 서브블록에서 사용되는 부반송파의 개수가 a 이고, m_s -QAM 변조를 사용할 때, 심볼에 맵핑되어 전송되는 비트의 수 z_s 와 IM으로 맵핑되는 데이터 비트의 수 z_i 는 다음과 같이 계산된다⁶⁾.

$$z_s = a * \log_2(m_s) \quad (1)$$

$$z_i = \text{fix}(\log_2(C(K, a))) \quad (2)$$

식 (1)을 보면 서브블록 안에서 사용되는 부반송파의 개수가 증가할수록 심볼에 맵핑되는 비트의 수는 증가하게 된다. 식 (2)에서 fix는 버림 연산자이며, C는 조합 연산자이다. 일반적으로 조합 연산은 $a = K/2$ 일 때 최대값을 갖게 된다. 식 (1)과 식 (2)의 조건을 모두 고려하여 계산하면 하나의 서브블록에서 최대의 비트를 전송할 수 있는 a 값을 도출할 수 있다. IM을 통해 전송할 수 있는 비트의 수 z_i 가 결정되면, 이 비트열을 십진수로 변경한 뒤에 십진수를 부반송파 조합으로 일대일 맵핑하는 Combinadics 방법을 이용하여 사용하는 부반송파 조합을 얻을 수 있다. 사용하는 부반송파 조합이 얻어지면, z_s 개의 비트를 a 개의 심볼로 변조한 뒤에 각각의 위치에 맵핑한다. 예를 들어, 서브블록의 크기가 4이고, 사용되는 부반송파의 개수를 2로 하였을 때, 가능한 부반송파의 조합은 [0 0 1 1], [0 1 0 1], [0 1 1 0], [1 0 0 1], [1 0 1 0], [1 1 0 0]로 총 6가지고 나오게 된다. 이 조합들 중 4가지를 이용하면 2개의 비트를 전송할 수 있

다. 이 조합에서 0은 사용하지 않는 부반송파이며 1은 사용하는 부반송파를 나타낸다. 전체 서브블록에 대한 맵핑이 완료된 후에 전체 부반송파를 iDFT(inverse Discrete Fourier Transform) 변환하고 CP(Cyclic Prefix)를 추가한 다음 송신 한다. OFDM-IM 수신기에서는 송신기의 역순서로 처리를 한다. 먼저 수신 받은 심볼의 CP를 제거하고 DFT연산을 수행하며, 그 다음 ML(Maximum Likelihood)나 LLR(Log-Likelihood Ratio) 알고리즘을 이용하여, 부반송파 조합을 계산하고 Combinadics 방법을 역으로 계산하여 조합에서 비트 정보를 수신하며, 각 부반송파에 맵핑되어 수신된 심볼은 복조하여 비트 정보를 수신한다.

2.2 시스템 특성

OFDM-IM 시스템은 데이터를 심볼과 부반송파의 조합 정보에 맵핑하여 전송한다. 부반송파를 조합의 수가 증가할수록 IM을 통해 전송하는 비트의 수는 증가한다. 이 조합의 수는 일반적으로 서브블록의 크기가 K 일 때, 사용하는 부반송파의 개수 $a = K/2$ 일 경우 최대치를 갖는다. 그러나 a 가 $K/2$ 일 경우 맵핑되는 심볼의 수는 서브블록 내의 전체 부반송파를 모두 사용하는 경우에 비하여 절반으로 감소되게 된다. 따라서 심볼에 맵핑되는 데이터양이 감소하게 된다. 따라서 OFDM-IM 시스템에서 최대의 전송속도를 지원하기 위해서는 변조 레벨이 결정되어 있을 때, 계산을 통하여 사용되는 부반송파의 개수를 결정해야 한다. OFDM-IM 시스템의 스펙트럼 효율 최대치를 결정하기 위하여 변조 레벨과 서브블록의 크기를 결정하고 부반송파의 개수를 1개에서부터 K 개 증가시키면서 스펙트럼 효율을 계산하면 그림 2에서 그림 6의 결과를 얻을 수 있다.

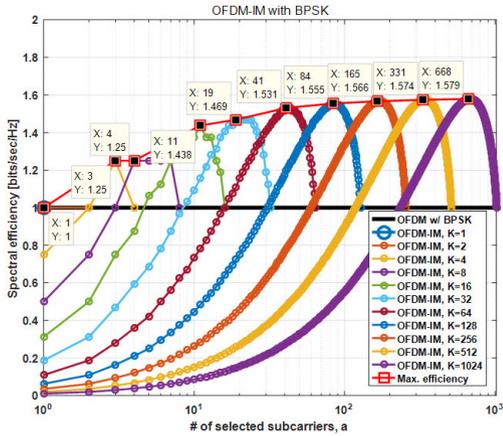


그림 2. BPSK 변조를 사용하는 OFDM-IM 시스템의 스펙트럼 효율.
Fig. 2. Spectral efficiency of OFDM-IM system using BPSK modulation.

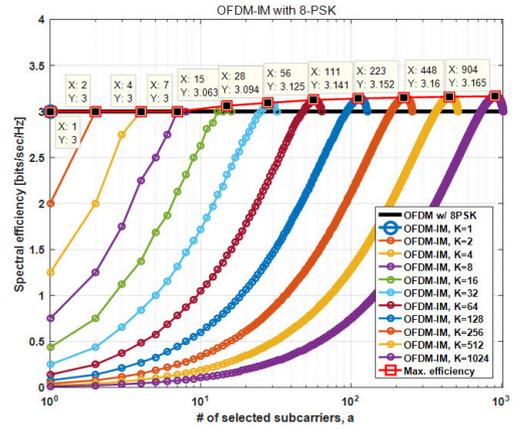


그림 4. 8-PSK 변조를 사용하는 OFDM-IM 시스템의 스펙트럼 효율.
Fig. 4. Spectral efficiency of OFDM-IM system using 8-PSK modulation.

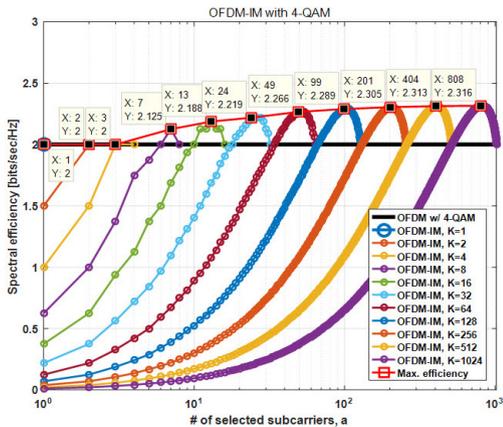


그림 3. 4-QAM 변조를 사용하는 OFDM-IM 시스템의 스펙트럼 효율.
Fig. 3. Spectral efficiency of OFDM-IM system using 4-QAM modulation.

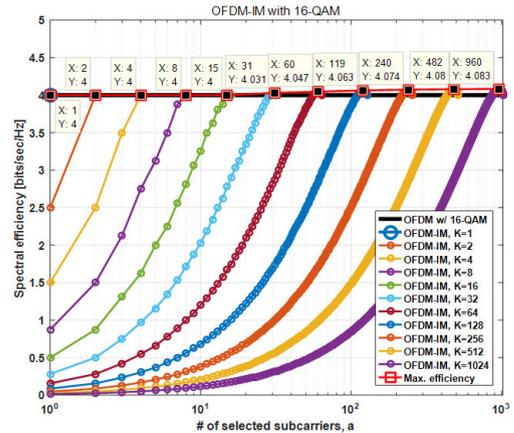


그림 5. 16-QAM 변조를 사용하는 OFDM-IM 시스템의 스펙트럼 효율.
Fig. 5. Spectral efficiency of OFDM-IM system using 16-QAM modulation.

기존 OFDM 시스템의 경우 사용되는 부반송파의 개수가 증가하여도 스펙트럼 효율은 변하지 않는다. 기존 OFDM 시스템에서 스펙트럼 효율은 BPSK, 4-QAM, 8-PSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM 변조를 사용하였을 때, 각각 1, 2, 3, 4, 6, 8 bits/sec/Hz 이다. 즉 변조 심볼 하나가 전송할 수 있는 비트의 수와 스펙트럼 효율을 같아지게 된다. 그러나 OFDM-IM 시스템은 IM을 이용하여 추가적인 데이터를 전송하므로 사용 부반송파의 개수에 따라 스펙트럼 효율이 변화하게 된다. OFDM-IM 시스템에서 BPSK 변조를 사용하였을 때를 보면, 서브블록의 크기 K 가 증가함에 따라 최대 스펙트럼 효율은 증가하

는 것을 확인할 수 있다. K 가 32일 때, 사용하는 부반송파의 개수 a 가 19일 경우 1.469 bits/sec/Hz의 스펙트럼 효율을 얻을 수 있다. K 가 256이고 a 가 165일 때, 1.566 bits/sec/Hz의 스펙트럼 효율을 얻을 수 있다.

OFDM-IM 시스템의 변조 레벨이 증가함에 따라 각 시스템이 갖는 최대 스펙트럼 효율은 기존 OFDM 시스템의 효율과 유사해짐을 확인할 수 있다. 이러한 이유는 다음과 같다. OFDM-IM 시스템에서 IM을 통해 전송하는 비트의 수 z_i 를 증가시키기 위해서는 사용하는 부반송파의 개수 a 를 $K/2$ 로 근접시켜야 하며, 심볼을 통해 전송하는 비트의 수 z_s 를 증가시키기

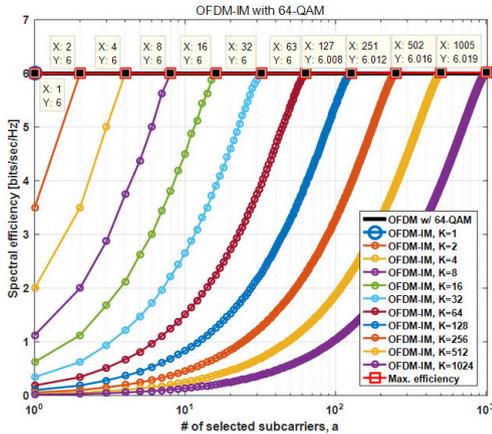


그림 6. 64-QAM 변조를 사용하는 OFDM-IM 시스템의 스펙트럼 효율.
Fig. 6. Spectral efficiency of OFDM-IM system using 64-QAM modulation.

위해서는 a 를 K 에 근접시켜야 한다. 변조 레벨이 증가하게 되면 a 를 $K/2$ 에 근접시켜 향상되는 z_i 보다 a 를 K 에 근접시켜 향상되는 z_s 가 더욱 커진다. 따라서 변조레벨이 증가할수록 최대 효율을 갖도록 하는 a 가 K 에 근접하게 되며, $a = K$ 가 될 경우 기존 OFDM 시스템과 같이 모든 부반송파를 사용하여 심볼을 전송하게 되므로 효율이 기존 OFDM 시스템과 같아지게 된다.

OFDM-IM 시스템에서 변조 레벨이 결정되어 있을 때, 달성할 수 있는 최대 효율은 K 가 증가함에 따라 증가하나 그림 2에서 그림 6을 확인할 경우 일정 수치로 수렴하는 것을 확인할 수 있다. OFDM-IM 시스템의 경우 BPSK 변조를 사용할 경우, 기존 BPSK 성과도에 원점 (0,0)에 1개의 심볼을 추가적으로 보내는 형태가 된다. 이는 서브블록 내에서 사용하는 부반송파에는 BPSK 심볼이 전송되고 사용하지 않는 부반송파에는 심볼이 맵핑되지 않기 때문이다. 따라서 성과도의 심볼의 개수는 BPSK 변조를 사용할 때 3개가 되며, 같은 원리로 4-QAM, 8-PSK, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM일 경우에는 각각 5, 9, 17, 65, 256이 된다. 즉, 기존 시스템의 성과도 보다 1개의 심볼이 늘어난다. 기존 OFDM 시스템은 성과도를 이루는 심볼의 개수에 \log_2 연산을 할 경우 한 심볼이 전송하는 비트의 수를 나타낸다. OFDM-IM 시스템에서도 이와 마찬가지로 \log_2 연산을 적용해 보면, BPSK, 4-QAM, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM 변조를 사용할 경우 스펙트럼 효율은 각각 1.585, 2.3219, 3.1699, 4.0875, 6.0224, 8.0056 bits/sec/Hz이 됨을 확인할 수

있으며, 이는 그림 2에서 그림 6의 경향과 일치한다.

III. 유저 분포 환경

본 논문에서는 모바일 이동통신 환경과 WLAN 환경에서 OFDM-IM 시스템을 사용하였을 경우 전체적인 통신 용량의 향상이 얼마나 이루어질 수 있는지에 대하여 분석한다. 이동통신 환경은 1000명의 유저를 고려하였으며, WLAN 환경은 100명의 유저를 고려하였다.

3.1 모바일 이동통신 환경

본 논문에서 이동통신 환경은 다음과 같다. LTE(Long-Term Evolution)의 환경과 유사한 변조 및 부호율(Code Rate)을 고려하였다. 변조는 256-QAM, 64-QAM, 16-QAM, 4-QAM, BPSK를 고려하였으며, 각각의 변조에 여러 부호율을 고려하였으며, 이는 표 1과 표 2에 정리되어 있다.

일반적으로 기지국으로부터 가까울수록 고차 변조와 높은 부호율을 사용하며 기지국으로부터 멀수록 낮은 부호율을 사용한다. 본 논문에서도 유저 분포를 고려함에 있어서 이와 같은 사항을 고려하였다. 이 구성은 거리에 따른 경로 손실을 고려한 것이다. 본 논문에서는 이동통신 환경에서 경로 손실에 의해 변조 및 부호율이 선택되는 유저를 300명으로 고려하였다. 그러나 거리가 가깝다고 하더라도 채널 환경에 따라서 저차 변조를 사용할 가능성이 있기 때문에 거리와 상관없이 열악한 채널 환경에 의해 4-QAM 및 BPSK 변조를 사용하는 경우를 함께 고려하였다. 이러한 조건의 유저는 700명을 고려하였다.

표 1. 이동통신 환경을 위해 고려된 변조와 부호율 (256-QAM, 64-QAM)

Table 1. The considered modulations and code rates for the mobile communication environment (256-QAM, 64-QAM)

Modulation	256-QAM				64-QAM				
Code rate	0.92	0.86	0.77	0.69	0.85	0.75	0.65	0.55	0.45
	58	34	83	43	25	39	04	37	51

표 2. 이동통신 환경을 위해 고려된 변조와 부호율 (16-QAM, 4-QAM, BPSK)

Table 2. The considered modulations and code rates for the mobile communication environment (16-QAM, 4-QAM, BPSK)

Modulation	16-QAM		4-QAM			BPSK			
Code rate	0.60	0.47	0.36	0.43	0.18	0.07	0.07	0.03	0.01
	16	85	91	85	85	62	62	81	91

3.2 WLAN 통신 환경

본 논문에서 고려한 WLAN 환경은 다음과 같다. 거리에 따라서 변조는 64-QAM, 16-QAM, 4-QAM, BPSK를 사용하며, 각각의 변조에 대해 여러 부호율을 고려하였다. 이에 대한 사항은 표 3에 정리되어 있다. WLAN 환경에서도 이동통신 환경에서와 같이 AP(Access Point)와 유저와의 거리가 멀어질수록 변조 레벨과 부호율이 낮아지는 상황을 고려하였으며, 거리에 상관없이 채널 환경에 따라 4-QAM 및 BPSK 변조를 사용하는 상황을 고려하였다. 본 논문에서는 WLAN 환경에서 경로 손실에 따라 변조 및 부호율을 선택하는 유저를 30명으로 고려하였으며, 열악한 채널 환경에 의해 4-QAM 및 BPSK 변조를 사용하는 유저를 70명으로 고려하였다.

표 3. WLAN 환경을 위해 고려된 변조와 부호율 (64-QAM, 16-QAM, 4-QAM, BPSK)
Table 3. The considered modulations and code rates for the WLAN environment (64-QAM, 16-QAM, 4-QAM, BPSK)

Modulations	64-QAM		16-QAM		4-QAM		BPSK	
Code rate	3/4	2/3	3/4	1/2	3/4	1/2	3/4	1/2

IV. 시뮬레이션 결과 및 분석

본 논문에서는 이동통신 환경 및 WLAN 환경에서 OFDM-IM 시스템을 사용하였을 경우 시스템 처리량(System Throughput)의 향상을 평가 및 비교분석하기

표 5. 이동통신 환경에서 기지국과 유저간의 거리에 따른 유저 분포 시나리오(전체 300명).

Table 5. The user distribution scenarios according to distance between base station and user in the mobile communication environment (total 300 users).

Distance between base station and user (m)	55.6	111.1	166.7	222.2	277.8	333.3	388.9	444.4	500	
Modulation	256-QAM					64-QAM				
Code rate	0.9258	0.8634	0.7783	0.6943	0.8525	0.7539	0.6504	0.5537	0.4551	
Scenario #1	55	47	39	33	27	23	19	15	12	
Scenario #2	7	9	11	13	16	19	23	28	33	
Scenario #3	1	2	2	3	3	4	6	8	10	
Distance between base station and user (m)	555.6	611.1	666.7	722.2	777.8	833.3	888.9	944.4	1000	
Modulation	16-QAM			4-QAM			BPSK			
Code rate	0.6016	0.4785	0.3691	0.4385	0.1885	0.0762	0.0762	0.0381	0.0191	
Scenario #1	9	7	5	3	2	2	1	1	0	
Scenario #2	32	26	22	18	14	11	8	6	4	
Scenario #3	11	14	18	22	26	32	38	46	54	

표 4. 시뮬레이션 환경

Table 4. Simulation parameters

Parameter	Value
Modulation	OFDM, OFDM-IM
Constellations	BPSK, 4-QAM, 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM
Bandwidth	20MHz
Roll-off factor	0.35
Cell radius	Mobile environment : 1000m WLAN environment : 100m
# of total users	Mobile environment : 300+700=1000 - distribution by path loss : 300 WLAN environment : 30+70=100 - distribution by path loss : 30 - distribution by channel condition : 70
# of subcarriers	Mobile environment : 1024 WLAN environment : 64

위하여 표 4와 같은 시뮬레이션 환경을 고려하였다. 이동통신 및 WLAN 환경의 셀(Cell) 반경은 각각 1000m와 100m를 고려하였다. 유저의 수는 이동통신 및 WLAN 환경에서 각각 1000명과 100명을 고려하였다. 이동통신 환경에서 300명은 기지국과의 거리가 멀어질수록 경로 손실로 인해 저차 변조를 사용하고 700명은 열악한 채널 환경으로 인하여 4-QAM 및 BPSK 변조를 랜덤(Random) 선택하도록 구성하였다. WLAN 환경에서는 30명이 경로 손실에 의해

AP(Access Point)와 거리가 멀어질수록 저차 변조를 사용하고 70명은 인접 AP의 간섭 및 열악한 채널 환경으로 인하여 4-QAM 및 BPSK 변조를 랜덤 선택하도록 구성하였다.

표 5는 이동통신 환경에서 전체 1000명 중 300명의 유저가 기지국과의 거리에 따라 사용하는 변조 및 부호율을 나타내며 거리에 따른 3가지 시나리오의 유저 분포를 보여준다. 기지국과의 거리가 가까울 경우 256-QAM 변조를 사용하며 높은 부호율을 사용하고, 반대로 기지국과 멀어질 경우 4-QAM, BPSK 등 저차 변조와 낮은 부호율을 사용한다. Scenario #1은 기지국으로 유저가 집중된 모델이며, Scenario #2는 중앙 집중 모델, Scenario #3은 가장자리 집중 모델을 나타낸다.

표 6은 이동통신 환경에서 전체 1000명 중 열악한 채널 환경에 있는 700명의 유저 분포를 나타낸다. 열악한 채널 환경은 복잡한 도심지에서 다양한 지형 환경 및 간섭 신호등으로 발생할 수 있다. 본 논문에서는 이와 같은 700명의 유저가 비교적 고르게 분포하도록 시뮬레이션을 고려하였다.

표 7은 WLAN 환경에서 AP와 유저간의 거리에 따라 사용되는 변조 및 부호율을 나타내며, 전체 100명중 30명에 해당 하는 3가지 유저 분포 시나리오를 보여준다. AP와의 거리가 가까울 경우 64-QAM의 고차 변조와 높은 부호율을 사용하며, AP와 거리가 멀어질수록 저차 변조 및 낮은 부호율을 사용한다. Scenario #1은 AP에 유저들이 집중된 모델이며, Scenario #2는 중앙 집중형, Scenario #3는 가장자리에 집중된 모델을 나타낸다.

표 8은 WLAN 환경에서 전체 100명의 유저 중 열악한 채널 환경에 있는 70명의 유저의 분포를 나타낸다. 이 유저들은 저차 변조인 4-QAM 및 BPSK 변조를 랜덤으로 선택하게 된다. 이 환경의 유저들은 통신

표 7. WLAN 환경에서 기지국과 유저간의 거리에 따른 유저 분포 시나리오(전체 30명).

Table 7. The user distribution scenario according to distance between base station and user in the WLAN environment (total 30 users).

Distance between base station and user (m)	12.5	25	37.5	50	62.5	75	87.5	100
Modulation	64-QAM		16-QAM		4-QAM		BPSK	
Code rate	3/4	2/3	3/4	1/2	3/4	1/2	3/4	1/2
# of users for scenario #1	11	8	5	3	2	1	0	0
# of users for scenario #2	3	4	5	6	6	3	2	1
# of users for scenario #3	1	1	2	2	3	4	7	10

표 8. WLAN 환경에서 열악한 채널 조건을 가지고 있는 유저 분포(전체 70명)

Table 8. The user distribution according to distance between base station and user in the mobile communication environment (total 70 users).

Distance between base station and user (m)	12.5	25	37.5	50	62.5	75	87.5	100
Modulation	Random selection [4-QAM or BPSK]							
# of users for scenario #1~#3	9	9	9	10	9	8	8	8

범위 내에 비교적 고르게 분포하도록 설정하였다. 좁은 공간 내에 다수의 AP가 설치될 경우 인접 AP의 간섭 신호로 인하여 열악한 채널 환경이 구성될 수 있다. 본 논문에서는 이러한 환경으로 70명의 유저가 열악한 채널을 가지고 통신을 하는 환경을 고려하였다.

그림 7은 이동통신 환경에서 유저 분포 모델에 따른 시스템의 처리량을 나타낸다. 그림 7의 (a), (b), (c)

표 6. 이동통신 환경에서 열악한 채널 조건을 가지고 있는 유저 분포(전체 700명).

Table 6. The user distribution with poor channel conditions in the mobile communication environment (total 700 users).

Distance between base station and user (m)	55.6	111.1	166.7	222.2	277.8	333.3	388.9	444.4	500
Modulation	Random selection [4-QAM or BPSK]								
# of users for scenario #1~#3	39	38	37	37	37	39	40	42	45
Distance between base station and user (m)	555.6	611.1	666.7	722.2	777.8	833.3	888.9	944.4	1000
Modulation	Random selection [4-QAM or BPSK]								
# of users for scenario #1~#3	45	41	39	38	36	36	36	37	38

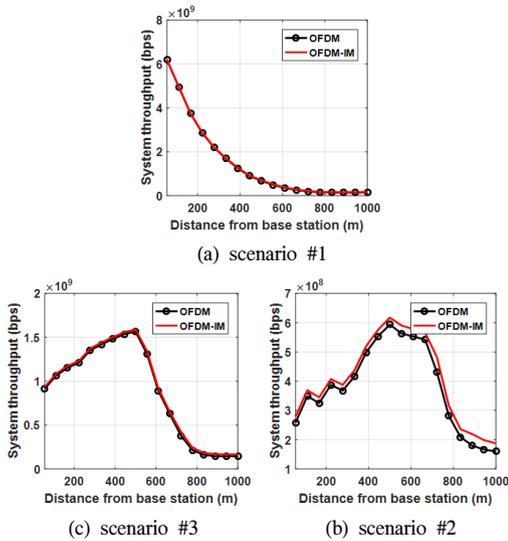


그림 7. 이동통신 환경에서 유저 분포 모델에 따른 시스템 처리량

Fig. 7. System throughput according to user distribution model in the mobile communication environment.

는 각각 표 5의 Scenario #1, Scenario #2, Scenario #3의 환경을 고려한 것이다. 여기에서 유저가 기지국에 집중된 환경일 때 기지국에서 처리하는 정보량이 가장 많으며, 중앙 및 가장자리에 집중될 경우 순서대로 처리량이 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그림 7에서 OFDM 및 OFDM-IM 시스템의 처리량을 비교하면, 유저가 가장자리에 집중되어 있을수록 OFDM-IM의 처리량 향상이 크게 나타남을 확인할 수 있다.

그림 8은 WLAN 환경에서 유저 분포 모델에 따른 시스템 처리량을 나타낸다. 그림 8의 (a), (b), (c)는 각각 표 7의 Scenario #1, Scenario #2, Scenario #3 환경에서의 시스템 처리량을 나타낸다. 이동통신 환경과는 달리 WLAN 환경에서는 OFDM과 OFDM-IM

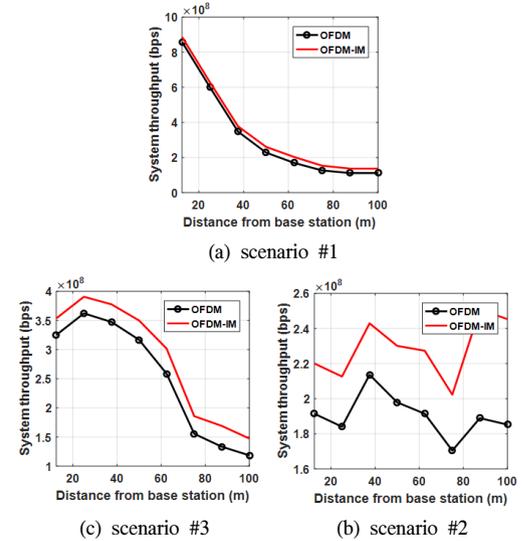


그림 8. WLAN 환경에서 유저 분포 모델에 따른 시스템 처리량

Fig. 8. System throughput according to user distribution model in the WLAN environment.

시스템의 처리량 차이가 비교적 크게 나타남을 확인할 수 있다. 이는 OFDM-IM 시스템이 비교적 낮은 16-QAM 이하의 변조에서 효율향상이 이루어지며, WLAN 환경에서는 16-QAM 이하의 변조를 사용하는 비율이 높기 때문이다. 그림 7과 그림 8을 전체적으로 정리하면 표 9와 같다.

표 9는 이동통신 및 WLAN 환경에서 OFDM과 OFDM-IM 시스템의 처리량을 비교한 것이다. 전체적으로 OFDM-IM 시스템이 기존 OFDM 시스템에 비하여 시스템 처리량이 향상되는 것을 확인할 수 있다. 그리고 이동통신 및 WLAN 환경 모두 유저가 가장자리에 집중된 Scenario #3의 환경에서 OFDM-IM 시스템의 처리량 향상이 크게 나타남을 확인할 수 있다.

표 9. 이동통신 및 WLAN 환경에서 OFDM과 OFDM-IM 시스템의 처리량 비교

Table 9. System throughput comparisons of OFDM and OFDM-IM system in the mobile communication and WLAN environments.

System throughput	Mobile communication environment			WLAN environment		
	Scenario #1	Scenario #2	Scenario #3	Scenario #1	Scenario #2	Scenario #3
OFDM	26422.77Mbps	15714.22Mbps	6802.08Mbps	2546.98Mbps	2018Mbps	1526.46Mbps
OFDM-IM	26807.57Mbps	16148.56Mbps	7275.79Mbps	2779.35Mbps	2276.38Mbps	1836.22Mbps
Throughput difference	384.8Mbps	434.34Mbps	473.71Mbps	232.37Mbps	258.39Mbps	309.75Mbps
Throughput enhancement ratio	1.46%	2.76%	6.96%	9.12%	12.8%	20.29%

이동통신 환경에서는 Scenario #1, Scenario #2, Scenario #3의 조건에서 OFDM-IM 시스템의 처리량 향상이 각각 1.46%, 2.76%, 6.96% 이루어 졌으며, WLAN 환경에서는 각각 9.12%, 12.8%, 20.29% 시스템 처리량 향상이 이루어 졌다. 더욱이 이동통신 환경과 비교하여 WLAN 환경에서는 16-QAM 이하의 저차 변조를 사용하는 비율이 높으므로 이동통신 환경보다 처리량 개선이 크게 나타남을 확인할 수 있다.

V. 결 론

OFDM-IM 시스템은 변조 레벨이 고정된 상태에서 서브블록의 크기를 향상시키고 사용하는 부반송파의 수를 효율적으로 선택할 경우 효율이 향상됨을 확인할 수 있으며, 효율 향상의 최대치는 기존 OFDM 시스템이 사용하는 변조의 성좌도에서 영점에 맵핑되는 경우가 추가됨으로, 기존 성좌도의 개수에서 하나를 더한 값에 \log_2 연산을 수행할 경우 얻을 수 있다. 다음으로 본 논문에서는 이동통신 및 WLAN 환경에서 각각 3가지의 유저 분포 시나리오를 고려하여 OFDM-IM 및 OFDM 시스템의 처리량을 평가 및 비교 분석하였다. OFDM-IM 시스템은 이동통신 및 WLAN 환경에서 기존 OFDM 시스템에 비하여 처리량 향상을 기대할 수 있으며, 특히 유저가 가장자리에 집중될수록 기존 시스템과 비교하여 처리량 향상이 크게 이루어지는 것을 확인할 수 있다. 또한 이동통신 환경에 비하여 WLAN 환경에서는 16-QAM 이하의 저차 변조의 사용 비율이 높으므로 시스템 처리량의 향상이 더 높은 것을 확인하였다.

References

- [1] 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 *Proc. Symp. KICS*, pp. 803-804, Jun. 2017.
- [2] A. Gupta and R. K. Jha, "A survey of 5G network: Architecture and emerging technologies," in *IEEE Access*, vol. 3, pp. 1206-1232, 2015.
- [3] M. Agiwal, A. Roy, and N. Saxena, "Next generation 5G wireless networks: A comprehensive survey," in *IEEE Commun. Surveys & Tuts.*, vol. 18, no. 3, pp. 1617-1655, 3rd quarter 2016.

- [4] M. Wen, X. Cheng, M. Ma, B. Jiao, and H. V. Poor, "On the achievable rate of OFDM with index modulation," in *IEEE Trans. Sign. Process.*, vol. 64, no. 8, pp. 1919-1932, Apr. 2016.
- [5] A. Bouhlel, S. G. Domouchtsidis, S. S. Ikki, and A. Sakly, "Performance of OFDM-IM under joint hardware impairments and channel estimation errors over correlated fading channels," in *IEEE Access*, vol. 5, pp. 25342-25352, 2017.
- [6] J. Choi and Y. Ko, "TCM for OFDM-IM," in *IEEE Wireless Commun. Lett.*, vol. 7, no. 1, pp. 50-53, Feb. 2018.
- [7] J. Choi, "Coded OFDM-IM with transmit diversity," in *IEEE Trans. Commun.*, vol. 65, no. 7, pp. 3164-3171, Jul. 2017.

안 창 영 (Changyoung An)



2013년 2월 : 충북대학교 전자공학과(공학사)
 2015년 2월 : 충북대학교 전자공학과(공학석사)
 2015년 3월~현재 : 충북대학교 전자공학과 박사과정
 <관심분야> 차세대 이동통신시스템, 디지털신호처리

유 흥 균 (Heung-Gyoon Ryu)



1988년~현재 : 충북대학교 전자공학과 교수
 2002년 3월~2004년 2월 : 충북대학교 컴퓨터정보통신연구소 소장
 <관심분야> 무선통신, B5G/6G 이동통신시스템, 위성통신