

고차 변조를 사용하는 Load-Modulation MIMO 시스템 설계와 성능 평가

이 동 형*, 안 창 영*, 유 흥 균^o

Design and Performance Evaluation of Load-Modulation MIMO System Using High-Order Modulation

Dong-Hyung Lee*, Changyoung An*, Heung-Gyoon Ryu^o

요 약

본 논문에서는 단일 RF 단을 사용하여 다중 스트림을 전송할 수 있는 LM-MIMO (load-modulation multiple-input multiple-output) 시스템에 대하여 알아보고, 이 시스템에서 사용하는 부하변조 (load modulation) 방법이 고차 m-PSK (phase shift keying) 심볼이나 고차 m-QAM (quadrature amplitude modulation) 심볼을 효과적으로 생성할 수 있는지 확인한다. 그리고 부하변조를 사용하는 LM-MIMO 시스템의 성능을 평가한다. LM-MIMO 시스템은 안테나가 확장되어도 단일 RF 단만을 요구하기 때문에 저복잡도, 저전력의 시스템 구성을 할 수 있다. 시뮬레이션의 결과를 살펴보면, T 모델 (model)을 사용하는 부하변조는 고차 m-PSK 변조와 고차 m-QAM 변조를 효과적으로 지원할 수 있다. 또한 부하변조를 사용하는 LM-MIMO 시스템이 기존의 이상적인 m-PSK나 m-QAM 변조를 사용하는 MIMO 시스템과 유사한 성능을 낼 수 있음을 확인하였다. 또한 4x4 LM-MIMO 시스템이 기존의 4x4 MIMO 시스템과 유사한 성능을 내는 것을 확인하였다.

Key Words : Load-modulation, LM-MIMO, MIMO, single RF chain, massive MIMO

ABSTRACT

In this paper, we analyze LM-MIMO (load-modulation multiple-input multiple-output) system with single RF chain. And then, we confirm that load modulation technique can support generation of high-order m-PSK modulation and m-QAM modulation in LM-MIMO system. Finally we evaluate performance of LM-MIMO system with load modulation. Conventional MIMO system requires a number of RF chains for expansion of MIMO dimension. A number of RF chains can cause various problems. On the other hand, although LM-MIMO system is expanded, LM-MIMO system requires single RF chain only. Therefore, LM-MIMO system has low-complexity and low power consumption. As results, we can confirm that load modulation of T-model can modulate high-order m-PSK and m-QAM signal. Also, we can confirm that 4x4 LM-MIMO system using load modulation has a similar performance to conventional 4x4 MIMO system.

※ 이 논문은 2015년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 정보통신기술진흥센터의 지원을 받아 수행된 연구임 (R0101-15-244, 초연결 스마트 모바일 서비스를 위한 5G 이동통신 핵심 기술개발) 그리고 이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No.2013R1A2A2A01005849).

♦ First Author : SK Telecom, danny92@nate.com, 정희원

o Corresponding Author : Department of Electronics Engineering, Chungbuk National University, ecomm@cbu.ac.kr, 정희원

* Department of Electronics Engineering, Chungbuk National University, acy890217@naver.com, 학생희원

논문번호 : KICS2015-07-212, Received July 8, 2015; Revised September 18, 2015; Accepted October 21, 2015

I. 서 론

최근 고화질 동영상 실감경험 (immersive experience) 및 홀로그램 (hologram) 기술 등을 지원하는 고용량 차세대 멀티미디어 서비스 (multi-media service)가 증가하고 있으며, 이를 지원하기 위한 다양한 무선 통신 기기들이 증가하고 있다[1]. 이러한 무선 통신 기기들은 고속 무선 통신을 요구한다. 이를 위해 다양한 연구가 진행되고 있다. 그 중 하나로 MIMO (multiple-input multiple-output) 기술에 대한 연구가 있다[2].

MIMO 기술은 송신기와 수신기에 다수의 안테나를 사용하여 채널 용량을 증가시키는 기술이다[2]. MIMO 기술은 추가적인 대역폭이나 추가적인 전력을 요구하지 않는다. 또한 MIMO 기술은 송수신기에 사용하는 안테나의 수가 증가시켜 통신 용량을 더욱 향상시킬 수 있다. 이러한 장점으로 인하여 MIMO 기술은 차세대 무선 통신 시스템을 위한 핵심 기술로 분류되고 있다. MIMO 기술은 이미 LTE (long term evolution), LTE-A (long term evolution advanced)이나 IEEE 802.11n과 같은 표준의 핵심 기술로 지정되어 있다[3-5]. 또한 현재 폭발적인 관심을 받고 있는 5G 무선 통신 시스템 연구에서도 MIMO 기술을 극대화시킨 Massive MIMO 기술이 핵심 기술로 주목받고 있다[6]. 이와 같이 MIMO 기술은 더욱 더 많은 안테나를 사용하여 통신 용량을 향상시키는 방향으로 발전해 나가고 있다.

이러한 MIMO 기술은 송신기와 수신기의 안테나 수만큼 RF (radio frequency) 단을 사용한다. 예를 들어 2x2 MIMO 시스템이 경우 송신기와 수신기에 각각 2개의 RF 단과 2개의 안테나를 사용한다. MIMO 기술을 극대화 시킨 Massive MIMO 기술의 경우 수백 개 이상의 안테나를 사용한다. 따라서 Massive MIMO 기술은 안테나 수와 같이 수백 개 이상의 RF 단이 요구된다. 이와 같이 성능 향상을 위하여 MIMO 기술을 확장시킬 경우 다수의 RF 단에 의해 여러 가지 문제점이 발생할 수 있다[7]. 시스템에서 RF 단이 증가할수록 전체적인 시스템 복잡도가 증가하게 되고 이로 인하여 전력 소비 또한 급증하게 된다[7]. 또한 RF 단이 증가하게 되면 RF 단간 간섭이 발생하여 전체적인 시스템의 성능을 열화시킬 수 있다. 마지막으로 RF 단의 증가는 전체적인 시스템 구성의 비용을 크게 증가시키게 된다[7]. 이러한 RF 단의 증가에 따른 문제점을 해결하기 위하여 다양한 연구들이 진행되고 있다. 이러한 연구 중 하나로 단일 RF 단을 이용하여

MIMO 기술을 구현하려는 노력이 있다[8-10].

단일 RF 단을 사용하는 MIMO 기술 중 하나로 부하 변조 (load modulation)를 사용하는 MIMO 기술이 있다[10]. 이 LM-MIMO 기술은 단일 RF 단을 이용하여 MIMO 기술의 확장을 지원할 수 있는 장점이 있다[10]. 따라서 이 LM-MIMO 기술은 다수의 안테나를 사용하는 Massive MIMO 기술에 적용하면 다수의 RF 단에 의한 문제점을 해결할 수 있다.

본 논문에서는 이러한 장점을 갖는 LM-MIMO 기술의 전체적인 개념과 부하변조 원리에 대하여 알아보고 LM-MIMO 기술에 사용되는 부하변조 회로가 다양한 고차 PSK (phase shift keying) 변조나 고차 QAM (quadrature amplitude modulation) 변조를 효과적으로 지원할 수 있는지 확인하고 분석한다. 그리고 LM-MIMO 시스템에서 부하변조를 사용하여 m-PSK 신호나 m-QAM 신호를 생성하여 송신하였을 때 시스템의 성능을 평가하고 분석한다.

II. LM-MIMO 송신기

LM-MIMO 송신기는 단일 RF 단을 이용하여 다수의 데이터 심볼 (data symbol)을 전송하는 송신기이다[10]. LM-MIMO 송신기는 다수의 안테나와 단일 RF 단을 사용한다. LM-MIMO 송신기는 기존의 MIMO 송신기의 다수 RF 단에 의해 발생하는 문제점들을 효과적으로 해결할 수 있다[10]. LM-MIMO 송신기는 각각의 안테나로 송신되는 데이터 심볼을 변조하기 위하여 부하변조를 사용한다.

그림 1은 부하 변조 원리를 이용한 LM-MIMO 시스템의 송신기 구성도를 나타낸다. LM-MIMO 송신기의 동작 원리를 살펴보면 다음과 같다. 우선 발진기

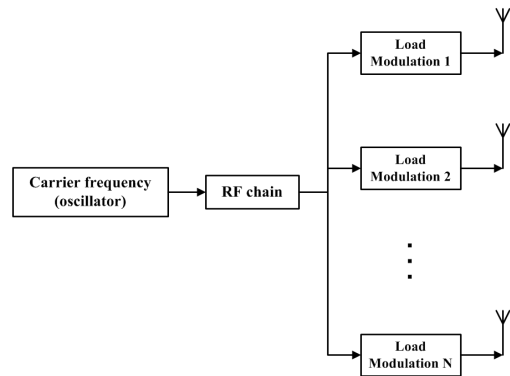


그림 1. NxN LM-MIMO 송신기의 구성도
Fig. 1. Block diagram of NxN LM-MIMO transmitter.

에서 반송파 주파수에 해당하는 반송파 신호가 생성되고 이 신호가 RF 단을 거쳐 증폭된다. 그 후 증폭된 반송파 신호는 각각의 안테나의 앞단에 연결된 부하 변조기로 인가된다. 부하 변조기에서는 반송파 신호를 부하 변조 방법을 통하여 정해진 데이터 심볼에 해당하는 신호로 변조하여 출력한다. 부하 변조를 통과한 후의 신호는 각각의 안테나로 인가되어 송신된다. 이러한 구조의 LM-MIMO 시스템의 경우 단일 RF 단 구조로 되어 있어 기존의 MIMO 시스템에 비하여 시스템의 복잡도와 전력 소모를 크게 줄일 수 있다.

III. 부하 변조

그림 2는 LM-MIMO 송신기에서 단일 송신 회로의 구성도를 나타낸다. 발진기에서 생성되는 반송파 신호의 전압은 v_0 이며 단일 회로에 흐르는 전체 전류는 i_s 로 나타낸다. z_s 는 부하 변조 회로의 앞부분에서 본 입력 임피던스 (impedance)를 나타내며 i_o 는 부하 변조 회로에서 변조되어 출력되는 전류로 실제 안테나에 인가되는 전류를 나타낸다. z_L 은 안테나의 임피던스를 나타내며 본 논문에서는 50Ω을 고려하였다. 우선 부하 변조회로의 임피던스 행렬은 다음과 같이 표현된다^[10].

$$\mathbf{Z}_{M,n} = j \begin{bmatrix} x_{n11} & x_{n12} \\ x_{n21} & x_{n22} \end{bmatrix} \quad (1)$$

전체 회로의 입력 전류 i_s 는 다음과 같이 표현된다.

$$i_s = \frac{v_0}{R + z_s} \quad (2)$$

부하 변조 회로의 입력 임피던스 z_s 는 다음과 같이

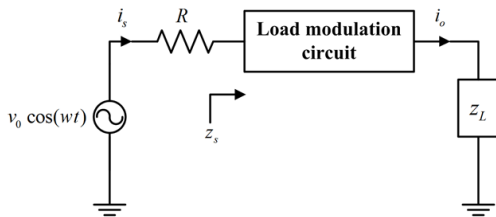


그림 2. LM-MIMO 송신기에서 단일 송신 회로의 구성도
Fig. 2. Schematic diagram of single branch transmission circuit in LM-MIMO transmitter.

표현된다^[10].

$$z_s = jx_{11} + \frac{x_{12}^2}{z_L + jx_{22}} \quad (3)$$

안테나에 인가되는 최종 부하 변조된 전류 i_o 는 다음과 같다^[10].

$$\begin{aligned} i_o &= \frac{jx_{12}}{z_L + jx_{22}} i_s \\ &= \frac{jx_{12}}{z_L + jx_{22}} \frac{v_0}{R + z_s} \end{aligned} \quad (4)$$

여기에서 R 은 발진기 모듈 (module) 내부의 저항을 고려하였으며 본 논문에서는 50Ω을 고려하였다. 그리고 v_0 를 1V로 고려하였다. 반송파 신호는 부하 변조 회로가 존재하지 않을 경우 R 과 z_L 은 모두 50Ω이기 때문에 안테나에 흐르는 전류 i_o 는 회로 전체의 입력 전류 i_s 와 같으며 크기는 0.01mA, 위상 천이량은 0도가 된다. 부하 변조 회로를 고려할 경우 안테나에 인가되는 전류 i_o 의 크기와 위상이 부하 변조 회로의 리액턴스 (reactance)에 의해 조절될 수 있다.

그림 3은 본 논문에서 부하 변조 회로로 고려한 T 모델(model) 회로를 나타낸다. 이 회로는 3개의 가변 리액턴스 블록 (block)으로 구성되어진다. T 모델 회로로 부하 변조 회로를 구성할 경우 부하 변조 회로의 임피던스 행렬의 원소는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} x_{n11} &= x_1 + x_3 \\ x_{n12} &= x_3 \\ x_{n21} &= x_3 \\ x_{n22} &= x_2 + x_3 \end{aligned} \quad (5)$$

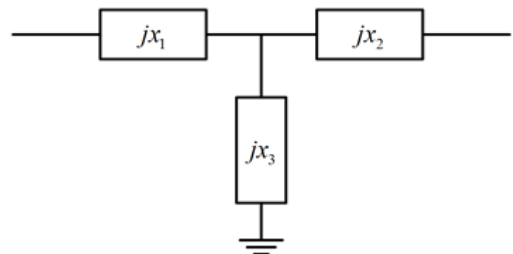


그림 3. 부하 변조를 위한 T 모델 회로
Fig. 3. T-model circuit for load modulation.

T 모델 회로에서 x_1 , x_2 그리고 x_3 의 리액턴스를 조절할 경우 부하 변조 회로의 임피던스 행렬의 특성이 바뀌게 되며 최종적으로 부하 변조 회로의 출력 전류 크기와 위상이 조절되게 된다.

본 논문에서는 T 모델의 3가지 가변 리액턴스부분을 조절하여 반송과 신호를 고차 m-PSK 계열 또는 고차 m-QAM 계열의 신호로 변조하는 리액턴스 집합이 존재하는지 확인한다.

그림 4. (a)부터 그림 4. (f)는 그림 4.2의 단일 송신 회로에서 부하 변조 회로를 T 모델로 고려하였을 때, T 모델의 리액턴스 값 x_1 , x_2 , x_3 을 각각 -500에서 500까지 μ 스텝만큼 가변하면서 계산되는 모든 안테나로 인가되는 전류 i_o 의 데이터를 나타낸다. 이 데이터는 안테나로 인가되는 최종적인 변조된 전류 신호의 특성을 나타내며 전류가 변조될 수 있는 모든 크기와 위상을 나타낸다. 그림 4. (a)의 경우 μ 값이 50

로 매우 넓은 간격으로 리액턴스를 변경하면서 i_o 전류를 계산하였을 경우의 모든 데이터를 나타낸다. 리액턴스의 간격이 넓기 때문에 생성되는 변조될 수 있는 전류의 상태 또한 많지 않음을 확인할 수 있다. 그림 4. (b), 그림 4. (c), 그림 4. (d), 그림 4. (e) 그리고 그림 4. (f)는 각각 μ 값이 25, 20, 10, 5, 3인 조건에서 계산된 전류 i_o 에 대한 모든 데이터를 나타낸다. μ 값이 작을수록 더욱 많은 데이터 심볼을 생성 할 수 있음을 확인할 수 있으며, 생성되는 전류 샘플들은 일정한 크기의 반경을 갖는 원안에 존재하는 것을 확인할 수 있다. 즉, 이는 반송과 신호가 더욱 여러 상태로 변조될 수 있음을 보이며 고차 변조를 위한 리액턴스 집합의 추출도 보다 용이한 것을 확인할 수 있다.

부하변조에 의해 생성된 심볼의 성좌도와 이상적인 심볼의 성좌도간의 오차는 다음과 같은 EVM_{RMS} 식에 의해 정량적으로 표현된다.

$$EVM_{RMS} = 100 * \sqrt{\frac{\frac{1}{N} \sum_{k=1}^N (e_k)}{P_{avg}}} \quad (6)$$

식 (6)의 값이 낮을수록 부하변조에 의해 생성된 심볼이 이상적인 심볼과 유사하다는 것을 나타내며, 값이 클수록 이상적인 심볼과의 오차가 크다는 것을 나타낸다. 식 (6)에서 N 은 전체 추출된 심볼의 개수이다. P_{avg} 는 이상적인 심볼의 평균 전력값을 나타낸다. 예를 들어 16-PSK 변조에서 P_{avg} 를 계산해보면, 이상적인 심볼의 절대값이 0.01일 경우, 16개의 심볼 절대값을 모두 제곱한 후 더해주면 0.0016이 되며 이를 전체 심볼의 개수 16개로 나누어 주면 0.001이 된다. 마지막으로 0.001의 거듭제곱근을 구하면 0.01이 된다.

e_k 는 이상적인 심볼과 추출된 심볼간의 거리 오차를 나타내며 다음과 같이 구할 수 있다.

$$e_k = (I_k - \tilde{I}_k)^2 + (Q_k - \tilde{Q}_k)^2 \quad (7)$$

여기에서 I_k, Q_k 는 이상적인 심볼의 실수와 허수 값을 나타내며, \tilde{I}_k, \tilde{Q}_k 는 추출된 심볼의 실수와 허수 값을 나타낸다.

IV. 실험결과 및 분석

본 논문에서는 부하변조를 위한 T 모델 회로에서

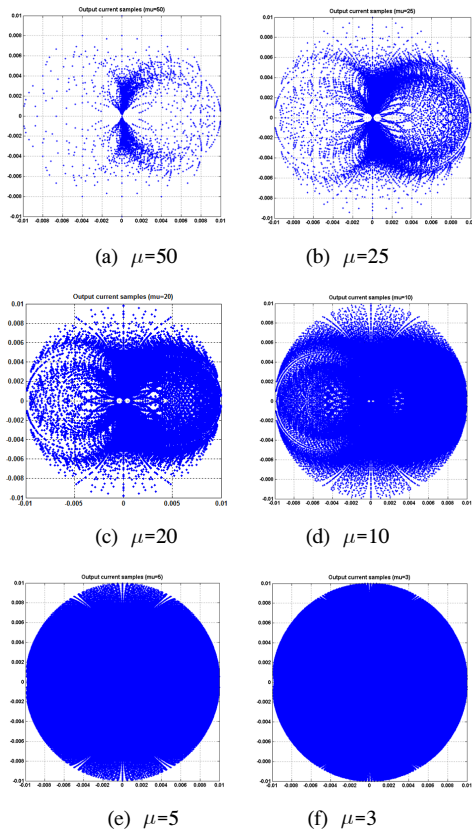


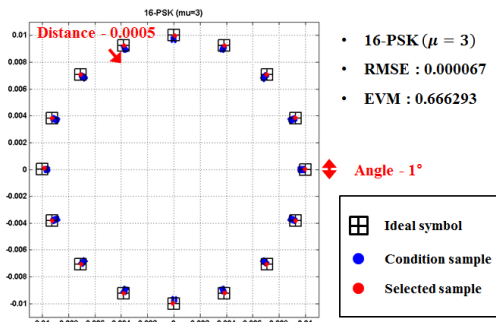
그림 4. 단일 송신 회로에서 μ 값에 따른 부하 변조를 위한 모든 리액턴스 집합
Fig. 4. All reactance set according to μ in single branch transmission circuit with load modulation.

고차 m-PSK 변조와 고차 m-QAM 변조가 잘 이루어지는지 확인하기 위하여 MATLAB을 이용하여 리액턴스 추출하고 회로 시뮬레이션을 통하여 추출된 리액턴스 집합이 해당하는 변조 신호를 효과적으로 생성해 내는지 확인하였다. 또한 추출된 심볼을 사용하는 4x4 LM-MIMO 시스템의 성능을 평가하고 분석하였다. 본 논문에서는 2.45GHz에서 동작하는 부하변조를 고려하여 리액턴스를 추출하였다. 리액턴스 집합을 추출하기 위하여 T 모델 회로의 리액턴스 jx_1 , jx_2 , jx_3 을 각각 -500에서 500까지 범위에서 μ 의 간격으로 순차적으로 증가시키면서 생성될 수 있는 모든 전류 특성을 계산하였다. 여기서 리액턴스 간격 μ 는 3으로 하였다.

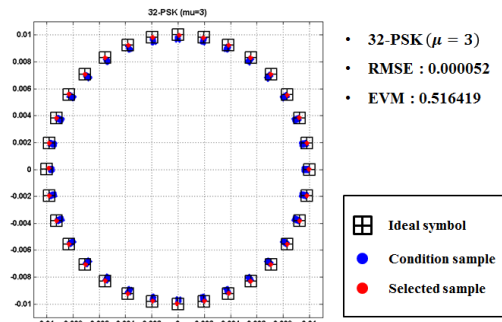
그림 5는 T 모델회로에서 부하변조를 통해 선택 가능한 m-PSK 변조 심볼들의 전류 특성을 나타낸다. 여기에서 계산되어지는 m-PSK 변조를 위한 전류 샘플 1개는 3개의 리액턴스 조합에 의하여 이루어진다. 그 다음 생성할 수 있는 전류 샘플들 중 원점으로 부터의 거리가 같은 위치와 각 m-PSK에 해당하는 위상

각 근처의 샘플을 선택하였다. 그림 5에서는 Condition sample이 이에 해당한다. 그 다음 이상적인 m-PSK 변조 심볼 위치와 가장 가까운 샘플을 1개 선택하였다. 이 샘플이 Selected sample을 나타낸다. 이렇게 최종 선택된 샘플과 이상적인 m-PSK 심볼간의 차이를 확인하기 위하여 EVM (error vector magnitude)을 계산하였다. 선택된 16-PSK 변조 심볼의 경우 EVM은 0.666293임을 확인할 수 있다. 순차적으로 32-PSK, 64-PSK, 128-PSK의 경우 각각 EVM이 0.516419, 0.431168, 0.425438임을 확인할 수 있다. 즉, 추출된 부하변조에 의한 고차의 m-PSK 심볼은 이상적인 고차 m-PSK 심볼과 매우 유사함을 확인할 수 있다.

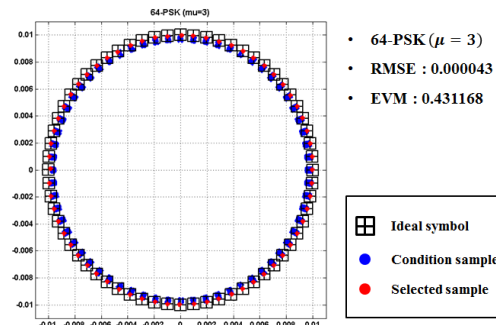
그림 6은 T 모델회로에서 부하변조를 통해 선택 가능한 m-QAM 변조 심볼들의 전류 특성을 나타낸다. 부하 변조를 통한 m-QAM 변조 심볼을 선택하기 위하여 우선 모든 리액턴스 조합에 따른 전류 특성을 모두 계산하였다. 그 다음 이상적인 m-QAM 변조 심볼 근처의 샘플들을 1차적으로 선택하였다. 그 다음 최종적으로 이상적인 m-QAM 변조 심볼과 가장 가까운



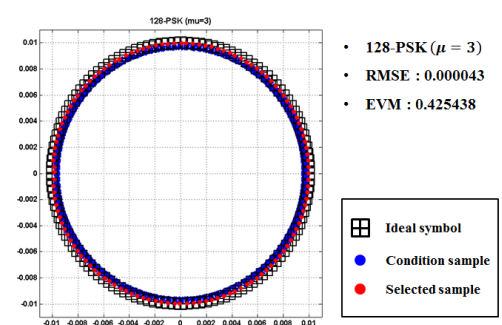
(a) 16-PSK



(b) 32-PSK

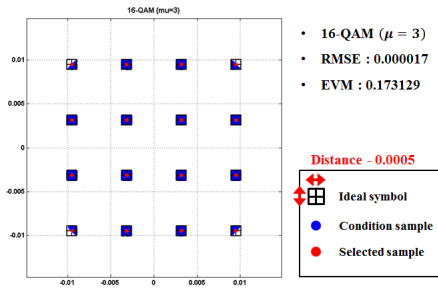


(c) 64-PSK

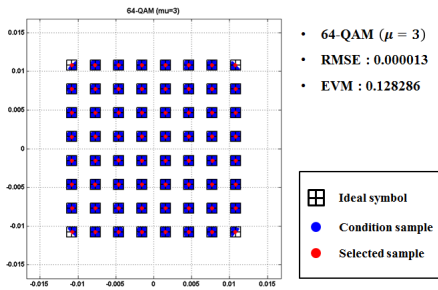


(d) 128-PSK

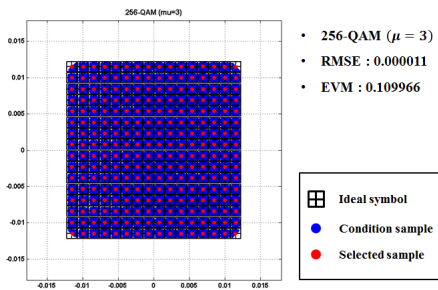
그림 5. m-PSK 부하 변조를 위한 리액턴스 집합($\mu=3$)
Fig. 5. Reactance set for m-PSK load modulation($\mu=3$).



(a) 16-QAM



(b) 64-QAM

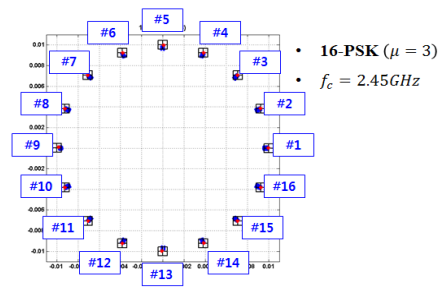


(c) 256-QAM

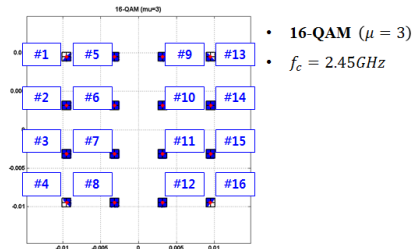
그림 6. m-QAM 부하 변조를 위한 리액턴스 집합 ($\mu=3$)
Fig. 6. Reactance set for m-QAM load modulation ($\mu=3$).

전류 특성을 갖는 샘플을 선택하였다. 부하변조에 의해 생성할 수 있는 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM 심볼들은 EVM이 각각 0.173129, 0.128286, 0.109966 임을 확인할 수 있다. 즉, 부하변조를 통해 고차의 m-QAM 변조를 효과적으로 할 수 있음을 확인할 수 있다.

그림 7. (a)는 부하변조에 의해 생성할 수 있는 16-PSK 변조 심볼의 번호를 나타낸다. 여기에서 최종 선택된 16개의 샘플들은 각각 16-PSK 변조 심볼을 나타내며, 각각의 샘플은 3개의 리액턴스 조합에 의해 생성할 수 있다. 예를들어 #1의 심볼을 생성하기 위하여 #1을 생성한 3개의 리액턴스 조합을 T 모델회로에



(a) 16-PSK



(b) 16-QAM

그림 7. 부하 변조를 위해 선택된 16-PSK와 16-QAM 심볼의 번호

Fig. 7. Number of 16-PSK symbols and 16-QAM symbols for load modulation.

인가할 경우 #1에 해당하는 변조 심볼을 얻을 수 있다.

그림 7. (b)는 부하변조에 의해 생성할 수 있는 16-QAM 변조 심볼의 번호를 나타낸다. 여기에서 최종 선택된 16개의 샘플들은 각각 16-QAM 변조 심볼을 나타내며, 각각의 샘플은 3개의 리액턴스 조합에 의해 생성할 수 있다. 예를들어 #1의 심볼을 생성하기 위하여 #1을 생성한 3개의 리액턴스 조합을 T 모델회로에 인가할 경우 #1에 해당하는 변조 심볼을 얻을 수 있다.

그림 8과 그림 9는 각각 계산적으로 추출된 리액턴스 집합을 생성하는 표 1과 표 2의 인덕턴스와 캐패시턴스 값을 회로 시뮬레이션 툴을 이용하여 설계한 T 모델 회로에 적용하여 반송과 신호를 각각 16-PSK와 16-QAM으로 실시간 부하 변조한 결과이다. 그림 8의 16-PSK 변조의 경우 대체적으로 각 심볼을 나타내는 신호의 크기는 거의 유사하며 각각의 심볼이 거의 균일한 위상차를 갖는 것을 확인할 수 있다. 그림 9의 16-QAM 변조 또한 3개의 크기 레벨(level)을 확인할 수 있으며 매우 적절하게 변조가 이루어 졌음을 확인할 수 있다.

표 1은 그림 7. (a)의 부하변조에 의해 생성된 각 16-PSK 심볼들을 생성하기 위한 리액턴스 조합과 해

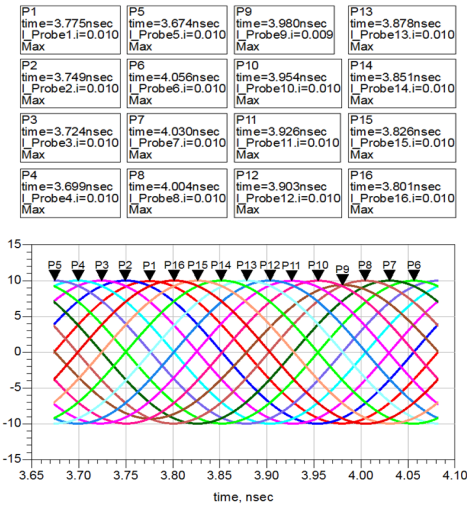


그림 8. 단일 송신 회로에서 부하 변조에 의해 출력되는 16-PSK 신호
Fig. 8. Real time 16-PSK signal by load modulation in single branch transmission circuit.

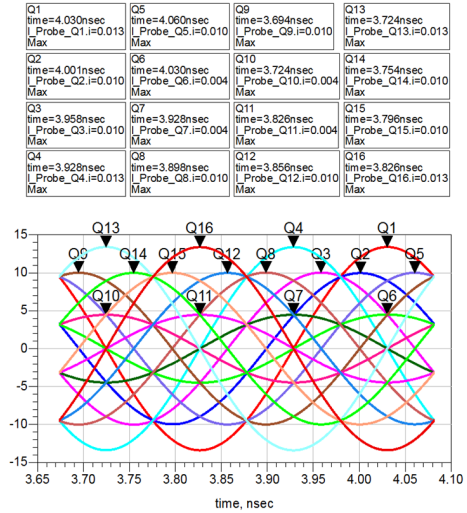


그림 9. 단일 송신 회로에서 부하 변조에 의해 출력되는 16-QAM 신호
Fig. 9. Real time 16-QAM signal by load modulation in single branch transmission circuit.

표 1. 16-PSK 부하 변조를 위해 선택된 리액턴스 집합 소자 값($\mu=3$)
Table 1. Selected reactance set and element values for 16-PSK load modulation($\mu=3$).

$R_r(\mu=3)$	$X_1(j)$	$X_2(j)$	$X_3(j)$	value1	value2	value3
1	4	1	499	2.60E-10	6.50E-11	3.24E-08
2	-11	-11	145	-5.91E-12	-5.91E-12	9.42E-09
3	-23	-20	73	-2.82E-12	-3.25E-12	4.74E-09
4	-32	-32	52	-2.03E-12	-2.03E-12	3.38E-09
5	-50	-53	52	-1.30E-12	-1.23E-12	3.38E-09
6	-80	-80	58	-8.12E-13	-8.12E-13	3.77E-09
7	-116	-113	67	-5.60E-13	-5.75E-13	4.35E-09
8	-266	-269	139	-2.44E-13	-2.41E-13	9.03E-09
9	-497	-500	247	-1.31E-13	-1.30E-13	1.60E-08
10	229	229	-119	1.49E-08	1.49E-08	-5.46E-13
11	130	133	-77	8.44E-09	8.64E-09	-8.44E-13
12	76	79	-56	4.94E-09	5.13E-09	-1.16E-12
13	52	55	-53	3.38E-09	3.57E-09	-1.23E-12
14	34	31	-53	2.21E-09	2.01E-09	-1.23E-12
15	19	19	-65	1.23E-09	1.23E-09	-9.99E-13
16	10	10	-131	6.50E-10	6.50E-10	-4.96E-13

당 리액턴스 값을 생성하기 위해 필요한 인덕턴스 (inductance) 값과 캐패시턴스 (capacitance) 값을 나타낸다. 예를 들어 5번 심볼을 생성하기 위해서는 T 모델 회로에 각각 -50, -53, 52에 해당하는 리액턴스를 인가해야 한다. value1, value2, value3은 각각 X_1 , X_2 , X_3 의 리액턴스 값을 생성하기 위해 필요한 인덕

턴스 값과 캐패시턴스 값을 나타낸다. 여기에서 -부호가 붙은 음수 값은 절댓값을 취하면 캐패시턴스를 나타내게 된다. 양수값은 인덕턴스를 나타내게 된다.

표 2는 그림 7. (b)의 부하변조에 의해 생성된 각 16-QAM 심볼들을 생성하기 위한 리액턴스 조합과 해당 리액턴스 값을 생성하기 위해 필요한 인덕턴스

표 2. 16-QAM 부하 변조를 위해 선택된 리액턴스 집합 소자 값($\mu=3$)
 Table 2. Selected reactance set and element values for 16-QAM load modulation($\mu=3$).

$R_x (\mu = 3)$	$X_1(j)$	$X_2(j)$	$X_3(j)$	value1	value2	value3
1	-116	-113	67	-5.60E-13	-5.75E-13	4.35E-09
2	232	268	-110	1.51E-08	1.74E-08	-5.91E-13
3	160	367	-116	1.04E-08	2.38E-08	-5.60E-13
4	130	133	-77	8.44E-09	8.64E-09	-8.44E-13
5	-200	-128	115	-3.25E-13	-5.08E-13	7.47E-09
6	202	391	-95	1.31E-08	2.54E-08	-6.84E-13
7	457	61	-83	2.97E-08	3.96E-09	-7.83E-13
8	154	202	-125	1.00E-08	1.31E-08	-5.20E-13
9	-101	-35	118	-6.43E-13	-1.86E-12	7.67E-09
10	52	-413	-161	3.38E-09	-1.57E-13	-4.03E-13
11	175	22	88	1.14E-08	1.43E-09	5.72E-09
12	103	13	-101	6.69E-09	8.44E-10	-6.43E-13
13	-20	-23	73	-3.25E-12	-2.82E-12	4.74E-09
14	-377	166	-386	-1.72E-13	1.08E-08	-1.68E-13
15	139	-266	-233	9.03E-09	-2.44E-13	-2.79E-13
16	19	19	-65	1.23E-09	1.23E-09	-9.99E-13

값과 캐패시턴스 값을 나타낸다.

그림 10은 기존 4x4 MIMO 시스템의 성능과 4x4 LM-MIMO 시스템의 성능을 비교한 것이다. 여기에서 MIMO 채널은 주파수 비선형적 랜덤 레일리 (Rayleigh) 페이딩 환경을 가정하여 채널 행렬의 각 성분은 평균이 0이고, 분산이 1인 i.i.d.(independent

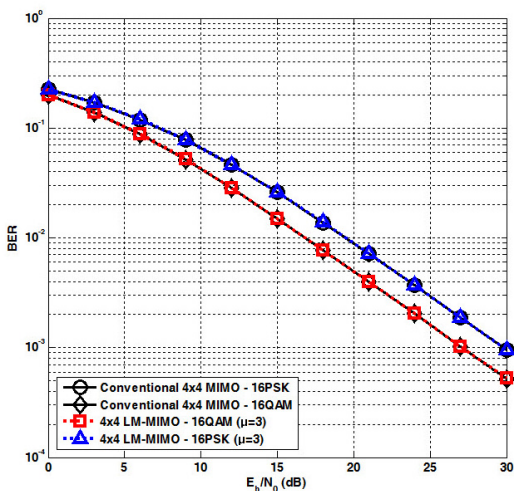


그림 10. 기존 MIMO 시스템과 LM-MIMO 시스템의 성능 비교
 Fig. 10. Performance comparison of conventional MIMO system and LM-MIMO system.

and identically distributed) 복소 가우시안 (Gaussian) 확률변수를 고려하였다. 수신기에서 MIMO 디코딩 (decoding)은 ZF (zero-forcing) 알고리즘 (algorithm)을 사용하였다. 그림 10의 결과를 보면 기존의 MIMO 시스템과 LM-MIMO 시스템의 성능이 PSK와 QAM 변조에서 모두 유사한 것을 확인할 수 있다.

그림 11과 그림 12는 각각 부하변조를 사용한 m-PSK 및 m-QAM 변조에 따른 4x4 LM-MIMO 시스템의 BER 성능을 나타낸다. 여기에서는 μ 값을 3으로 고려하여 부하 변조를 위한 리액턴스 집합을 추출한 후 이를 적용하여 성능을 평가하였다. 그림 11에서는 이론적인 BPSK 변조에 대한 성능과 실험에 의한 성능이 매우 유사함을 확인할 수 있고, 고차 변조인 128-PSK 변조를 사용할 경우에도 기존의 MIMO 시스템과 유사한 성능을 내는 것을 확인할 수 있다. 또한 그림 12에서는 이론적인 QAM 변조에 대한 성능과 실험에 의한 성능이 매우 유사함을 확인할 수 있고, 고차 변조인 256-QAM 변조를 사용할 경우에도 기존의 MIMO 시스템과 유사한 성능을 내는 것을 확인할 수 있다. 그림 11과 그림 12에 제시된 전체적인 변조 레벨에 대한 성능을 통해 기존 m-PSK 및 m-QAM 변조를 사용하는 MIMO 시스템의 성능 특성과 유사함을 확인할 수 있다.

LM-MIMO 시스템은 실험의 결과와 같이 기존의

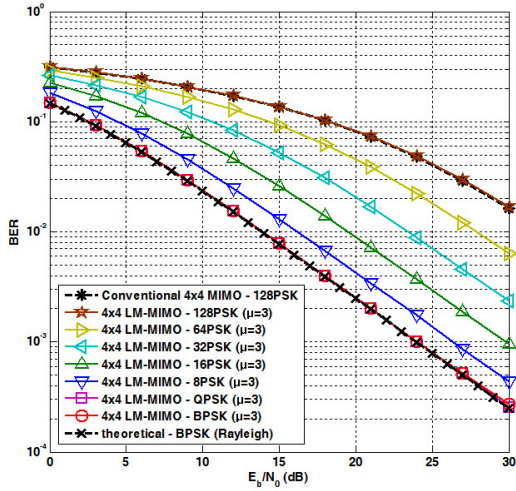


그림 11. 4x4 LM-MIMO 시스템의 m-PSK 변조에 따른 BER 성능
 Fig. 11. BER performance of 4x4 LM-MIMO system according to m-PSK modulation.

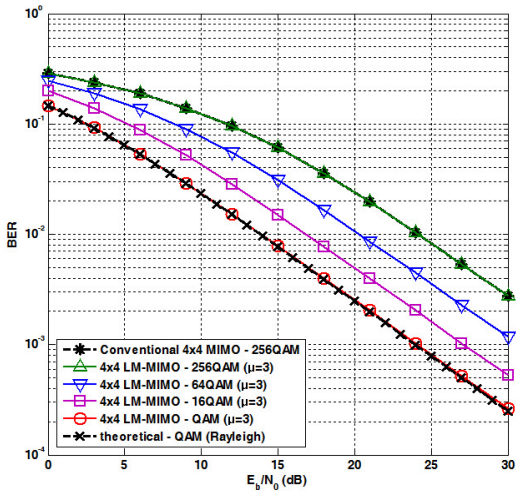


그림 12. 4x4 LM-MIMO 시스템의 m-QAM 변조에 따른 BER 성능
 Fig. 12. BER performance of 4x4 LM-MIMO system according to m-QAM modulation.

MIMO 시스템과 유사한 성능을 낼 수 있는 것을 확인할 수 있다. LM-MIMO 시스템은 데이터 심볼에 해당하는 리액턴스 집합을 Look-up 테이블에 모두 등록 시킨 후 데이터 심볼에 따라 Look-up 테이블을 참조하여 리액턴스 조절을 위한 컨트롤 신호를 각각의 부하변조 회로에 인가하게 된다. 이때 리액턴스는 심볼 구간 간격으로 변경이 이루어져야 한다. 여기에서 컨트롤 신호는 DC 전압 특성을 갖는다. 그러나 컨트롤 신호가 변경될 때 실제 시스템에서는 지연 없이 DC

전압 특성이 바뀔 수 없다. 즉, 데이터 심볼을 변경하기 위해 컨트롤 신호가 변경되는 동안 지연 시간이 발생하게 된다. 이러한 지연시간동안 원하지 않는 DC 전압이 부하변조기에 인가될 수 있으며, 결과적으로 원하지 않는 신호 성분이 발생할 수 있다. LM-MIMO 시스템은 이와 같은 문제점을 파악하고 해결하는 연구가 추가적으로 진행되어야 할 것으로 판단된다. 또한 LM-MIMO 시스템은 본 논문에서 보인 것과 같이 부하변조 회로를 이용하여 데이터 심볼을 생성 할 때 리액턴스의 가변으로 인하여 임피던스 부정합 (Impedance mismatch)가 발생할 수 있고 이때 송신 신호의 왜곡이 발생할 수 있다. 이러한 문제점 역시 LM-MIMO 시스템이 해결해야할 문제로 추가적인 연구가 요구된다.

V. 결론

본 논문에서는 단일 RF 단을 사용하여 다중 스트림을 전송할 수 있는 LM-MIMO 시스템에 대하여 알아보고, LM-MIMO 시스템에 사용되는 부하변조 방법이 고차 m-PSK 심볼이나 고차 m-QAM 심볼을 효과적으로 생성할 수 있는지 확인하였다. 본 논문의 결과로 T 모델을 사용하는 부하변조의 경우 128-PSK까지 이르는 전체적인 고차 m-PSK 심볼과 256-QAM에 이르는 고차 m-QAM 변조까지 효과적으로 지원할 수 있는 것을 확인하였다. 또한 부하변조에 의해 생성된 심볼을 4x4 LM-MIMO 시스템의 송신기에 적용하여 성능 평가를 수행하였다. 시뮬레이션 결과를 통해 기존의 이상적인 m-PSK나 m-QAM 변조를 사용하는 MIMO 시스템과 부하변조를 사용하는 LM-MIMO 시스템이 유사한 성능을 낼 수 있음을 확인하였다.

References

- [1] A. Osseiran, F. Boccardi, V. Braun, K. Kusume, P. Marsch, M. Maternia, O. Queseth, M. Schellmann, H. Schotten, H. Taoka, H. Tullberg, M. A. Uusitalo, B. Timus, and M. Fallgren, "Scenarios for 5G mobile and wireless communications: the vision of the METIS project," *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 5, pp. 26-35, May 2014.
- [2] 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 ISSSE*, pp. 295-300, Sept. 1998.

[3] L. Qinghua, L. Guangjie, W. Lee, M. Lee, D. Mazzarese, B. Clerckx, and L. Zexian, “MIMO techniques in WiMAX and LTE: a feature overview,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 48, no. 5, pp. 86-92, May 2010.

[4] J. Lorincz and D. Begušić, “Physical layer analysis of emerging IEEE 802.11n WLAN standard,” *ICACT 2006*, vol. 1, pp. 189-194, Feb. 2006.

[5] J. Fan, G. Y. Li, and X. Zhu, “Multiuser MIMO scheduling for LTE-A downlink cellular networks,” *IEEE VTC Spring*, pp. 1-5, May 2014.

[6] E. Larsson, O. Edfors, F. Tufvesson, and T. Marzetta, “Massive MIMO for next generation wireless systems,” *IEEE Commun. Mag.*, vol. 52, no. 2, pp. 186-195, Feb. 2014.

[7] M. Yousefibeiki, H. Najibi, and J. Perruisseau-Carrier, “User effects in beam-space MIMO,” *IEEE Ant. Wirel. Propag. Lett.*, vol. 12, pp. 1716-1719, 2013.

[8] C. An, S. H. Lee, and H.-G. Ryu, “Beamspace MIMO system using ESPAR antenna with single RF chain,” *J. KICS*, vol. 38, no. 10, pp. 885-892, Oct. 2013.

[9] O. Alrabadi, A. Kalis, C. Papadias, and A. G. Kanatas, “Spatial multiplexing by decomposing the far-field of a compact ESPAR antenna,” in *Proc. IEEE PIMRC 2008*, pp. 1-5, Cannes, France, Sept. 2008.

[10] M. A. Sedaghat, R. R. Mueller, R. R. Mueller, and G. Fischer, “A novel Single-RF transmitter for massive MIMO,” *Int. ITG WSA*, pp. 1-8, Erlangen, Germany, Mar. 2014.

이 동 형 (Dong-Hyung Lee)



1999년 2월 : 충북대학교 전자공학과(공학사)
 2001년 2월 : 충북대학교 전자공학과(공학석사)
 2001년~현재 : SK Telecom 근무
 2007년 3월~현재 : 충북대학교 전자공학과 박사과정

<관심분야> 무선통신 시스템

안 창 영 (Changyoung An)



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

유 흥 균 (Heung-Gyoon Ryu)



1988년~현재 : 충북대학교 전자공학과 교수
 2002년 3월~2004년 2월 : 충북대학교 컴퓨터정보통신연구소 소장
 1996년~현재 : IEEE, IET 논문 심사위원

2002년 : 한국전자과학회 학술상 수상
 2008년 : ICWMC 2008 국제학술대회 “Best Paper Award” 수상
 2009년 : SPACOMM 2009 국제학술대회 “Best Paper Award” 수상

<관심분야> 무선통신시스템, 위성통신, B4G/5G 이동통신시스템, 통신회로 설계 및 통신 신호 처리