

# 빔 공간 MIMO 통신시스템에서 고레벨 변조 설계와 평가

김 봉 준\*, 유 흥 균<sup>o</sup>

## Design and Evaluation of Higher Level Modulation in Beam Space MIMO Communication System

Bong-Jun Kim\*, Heung-Gyoon Ryu<sup>o</sup>

### 요 약

ESPAR(Electronically Steerable Parasitic Array Radiator) 안테나는 기존의 다중 안테나 시스템이 가지는 다중 RF-체인으로 인한 공간적인 제한과 에너지 효율의 문제를 극복하는 기술이다. 다중 안테나와 다중 RF-체인을 사용함으로써 발생하는 문제를 해결하기 위해 단일 RF 체인을 갖는 ESPAR 안테나를 사용하여 다수의 데이터를 동시에 전송할 수 있는 빔 공간 MIMO 시스템이 제안되었다. 기존 연구에서는 PSK 변조 계열에서의 빔 공간 MIMO 시스템에 대해 제안되었다. 본 논문에서는 1개의 능동소자와 2개의 기생소자를 가지는 ESPAR 안테나를 사용하여 PSK 변조뿐만 아니라 QAM 변조에서도 빔 공간 MIMO 시스템이 가능하다는 것을 밝히기 위해 16, 64-QAM 변조방식을 이용한 2x2 빔 공간 MIMO 시스템을 제안하고 성능을 평가하였다. ESPAR 안테나의 기생소자의 리액턴스를 조절하여 리액턴스 셋을 생성하여 QAM 계열의 심볼을 생성할 수 있다는 것을 확인하고 시뮬레이션을 통해 이를 전송하여 빔 공간 MIMO 시스템의 통신성능이 기존의 MIMO 시스템과 유사하게 되는 것을 확인하였다.

**Key Words** : ESPAR antenna, Beamspace MIMO, QAM modulation, Reactance set, Single RF chain

### ABSTRACT

ESPAR(Electronically Steerable Parasitic Array Radiator) antenna is the technique for overcoming the problems of space limitation and energy efficiency due to the multiple RF-chain. Conventional MIMO system with multiple antenna requires a large number of RF-chain for transmitting the multiple data because it transmits the data in proportion to the number of antenna. Beamspace MIMO system using the ESPAR antenna which has single RF-chain was proposed for solving the problems caused by using the multiple antenna and RF-chain. In this paper, therefore we propose 2x2 beamspace MIMO system using the 16, 64-QAM modulation and evaluate the performance of this system to reveal that it is possible that beamspace MIMO system can use not only PSK modulation but also QAM modulation. We confirm that QAM symbol can be generated by adjusting reactance of parasitic elements and making reactance set and also we confirm that performance of beamspace MIMO system is similar to the conventional MIMO system by transmitting the QAM symbol made by reactance set through the simulation.

※ 이 논문은 2013년도 충북대학교 학술연구지원사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

\* First Author : Chungbuk National University Department of Electronic Engineering, willfriends7@gmail.com, 학생회원

<sup>o</sup> Corresponding Author : Chungbuk National University Department of Electronic Engineering, ecomm@cbnu.ac.kr, 정회원

논문번호 : KICS2013-12-526, Received December 10, 2013; Revised April 16, 2014; Accepted May 7, 2014

## 1. 서 론

최근 통신 기술의 발전으로 고품질, 고용량의 콘텐츠의 보급이 증가함에 따라 고속 데이터 전송의 요구가 증가하고 있다. 이러한 고속 데이터 전송의 요구에 발맞추어 다중 안테나를 이용한 MIMO 기술이 연구되고 있다. MIMO 시스템은 기존의 단일 안테나 전송 시스템과 달리 송수신부에 다수의 안테나를 사용하여 스펙트럼 효율을 높이는 기술로서 안테나 수의 증가에 따라 데이터 전송률이 증가한다. MIMO 시스템에서  $N_T$ 개의 송신 안테나와  $N_R$ 개의 수신 안테나를 사용하는 경우의 채널 용량은 다음과 같이 정의될 수 있다<sup>[1]</sup>.

$$C = \min(N_R, N_T) \log_2(1 + SNR \frac{N_R}{N_T})$$

이러한 수식에 따라 채널 용량은 안테나의 수에 비례하여 증가하게 된다. 이렇듯 MIMO 시스템은 안테나의 개수에 비례하여 채널 용량이 증가하는 장점을 가지고 있지만, 안테나 수의 증가로 인해 각 안테나를 작동시키기 위해 안테나의 수만큼의 RF 체인을 필요로 하게 된다. 여기서 RF 체인이란 고전력 증폭기, 디지털 아날로그 변환기, 믹서, 주파수 합성기, 저잡음 전력 증폭기, 아날로그 디지털 변환기 등을 의미한다. 따라서 안테나의 수가 증가하게 되면 그만큼 RF 체인의 수가 증가하므로 전체 시스템의 크기와 복잡도, 전체 비용이 증가하게 되는 결과를 초래한다<sup>[2]</sup>. 이는 매우 작은 크기를 가지는 모바일 장치에 적용하기가 매우 어렵다는 것을 뜻하게 된다. 따라서 기존에는 지국 같이 크기가 큰 장치에서는 다수의 안테나를 사용하고 크기가 작은 모바일 장치에서는 적은 수의 안테나를 사용하여 시스템을 설계하였다. 이러한 안테나 개수의 차이로 인해 기존의 MIMO 시스템에서는 크기가 작은 장치에서 완전한 MIMO 시스템의 구현이 어려웠다. 이러한 물리적 크기제한의 단점을 극복하기 위해 단일 능동소자를 가지는 ESPAR 안테나가 제안되었다<sup>[3]</sup>. ESPAR 안테나는 안테나의 중앙에 단일 급전 소자를 가지며 그 주위에 기생소자를 배열한 구조로 되어있으며, 각 기생소자는 바랙터 다이오드에 의해 리액턴스를 조절할 수 있게 되어있다. 이러한 기생소자의 리액턴스 조절을 통해 빔을 형성할 수 있다.

이러한 ESPAR 안테나를 사용하여 모바일 장치와 같은 공간이 제한된 시스템에서 MIMO 시스템을 구

현하고 다중 RF 체인으로 인한 높은 전력 소모와 시스템 복잡도 증가의 문제점을 극복하기 위해 빔 공간 MIMO 시스템이 연구되었다<sup>[4]</sup>.

빔 공간 MIMO 시스템은 기존의 MIMO 시스템에서 여러 데이터를 동시에 전송하기 위해 다수의 안테나가 사용되는 단점을 해소하기 위해 연구된 시스템으로 단일 능동 소자와 단일 RF 체인을 사용하는 ESPAR 안테나를 이용하여 구현할 수 있다. 빔 공간 MIMO 시스템은 ESPAR 안테나를 통해 데이터 신호를 빔 도메인에 맵핑하여 전송한다. ESPAR 안테나의 단일 능동소자를 데이터 송신에 사용하고 능동소자 주위의 기생소자의 리액턴스를 변화하는 방법을 통해 빔을 형성하여 빔을 통해 두 번째 심볼을 편별함으로써 MIMO 시스템을 구현한다. 빔 공간 MIMO 시스템에서 사용되는 ESPAR 안테나는 단일 능동 소자를 가지기 때문에 단일 RF 체인을 갖게 된다. 이러한 특성으로 인해 빔 공간 MIMO 시스템은 기존의 MIMO 시스템에서 다수의 RF 체인이 소모하는 전력을 줄일 수 있고, 다중 안테나를 사용할 때 보다 RF 체인의 수가 감소하기 때문에 안테나 소자 간 거리를 감소시킬 수 있는 장점이 있다. 따라서 ESPAR 안테나를 이용한 빔 공간 MIMO 시스템은 모바일 장치와 같이 공간이 제한된 장치에서도 MIMO 시스템을 사용할 수 있다는 장점이 있다. 기존의 논문들에서는 통해 3개의 소자를 가지는 ESPAR 안테나를 사용하여 빔 공간 MIMO 시스템을 제안해 BPSK와 QPSK 변조에 대해 MIMO 전송이 가능하다는 것을 보였다<sup>[5]</sup>. 특히 <sup>[4]</sup>에서는 단일 RF 체인을 사용하여 고차 PSK 변조의 2x2 빔 공간 MIMO 전송이 가능하다는 것을 보였다.

또한 능동소자와 기생소자의 거리 변화에 의해 ESPAR 안테나의 성능이 변화하게 되는데, 이를 리액턴스 값의 조절을 통해 성능을 보상할 수 있으며<sup>[6]</sup>, 기생소자의 수가 증가하면 동시에 보낼 수 있는 MIMO 스트림의 수가 증가하는 것으로 알려져 있다<sup>[7]</sup>.

기존 연구의 경우 부성저항을 사용하여 16-QAM 변조를 구현하는 경우를 보인바가 있으나<sup>[8]</sup>, 부성저항의 경우 구현하기가 매우 어려운 기술이다. 이렇듯 기존 연구에서는 아직 고차 QAM 변조에 대해서는 빔 공간 MIMO 시스템에 대해 실제적으로 적용한 바가 없기 때문에 본 논문에서는 기존 논문에서 밝힌 PSK 변조뿐만 아니라 QAM 변조에 대해서도 실제적으로 빔 공간 MIMO 시스템이 가능하다는 것을 밝히고, 단일 RF 체인을 사용하는 ESPAR 안테나를 이용하여 16, 64-QAM 변조를 이용한 빔 공간 MIMO 시스템의 성능을 평가하고 분석하였다.

## II. ESPAR 안테나

본 논문에서는 그림 1과 같이 3개의 소자를 가지는 ESPAR 안테나를 사용하였다. 3개의 소자를 가지는 ESPAR 안테나는 안테나의 중앙에 단일 능동소자가 있고 그 주위에 2개의 기생소자를 가진다<sup>9)</sup>. 여기서 중앙의 능동소자로 데이터를 생성하고 기생소자에서 바랙터 다이오드(Varactor diode)에 의해 리액턴스를 조절하여 빔을 형성하고 방향을 조향하게 된다<sup>10)</sup>.

$$\begin{aligned} G(\theta) &= \mathbf{i}^T \mathbf{s}(\theta) \\ \mathbf{i} &= [i_0 \ i_1 \ i_2]^T \\ \mathbf{s}(\theta) &= [s_0(\theta) \ s_1(\theta) \ s_2(\theta)]^T \\ &= [1 \ e^{ja \cos(\theta)} \ e^{ja \cos(\theta - \pi)}]^T \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)에서  $G(\theta)$ 는 ESPAR 안테나에 의해 생성되는 빔 패턴을 의미하고  $\mathbf{i}$ 는 각 소자에 흐르는 전류를 나타낸다. 여기서  $\mathbf{i}$ 는 다음과 같이 표현 가능하다<sup>11)</sup>. 또한,  $\mathbf{s}(\theta)$ 는 기생 소자에 의한 조향 벡터로서, 기생 소자의 위치와 그 수에 따라  $\mathbf{s}(\theta)$ 의 행렬의 크기와 지수항이 정의될 수 있으며, 여기서  $a = 2\pi d/\lambda$ 로 여기서  $d$ 는 능동소자와 기생소자 간의 거리를 의미하고  $\lambda$ 는 파장을 의미한다. 따라서 안테나 간 거리에 의해  $a$ 가 변화하게 되므로 안테나간 거리가 감소하면  $\mathbf{s}(\theta)$ 의 크기가 감소하게 된다.

$$\begin{aligned} \mathbf{i} &= \mathbf{v}_s (\mathbf{Z} + \mathbf{X})^{-1} \mathbf{u}_0 \\ \mathbf{Z} &= \begin{bmatrix} Z_{00} & Z_{01} & Z_{02} \\ Z_{10} & Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{20} & Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix} \\ \mathbf{X} &= \text{diag}[R_0 \ jX_1 \ jX_2] \\ \mathbf{u}_0 &= [0 \ 0 \ 1]^T \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)에서  $\mathbf{Z}$ 는 상호 임피던스 행렬을 나타내고,

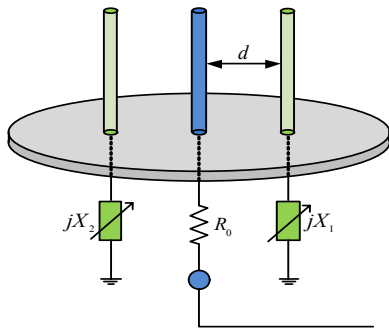


그림 1. 3개의 소자를 가지는 ESPAR 안테나  
Fig. 1. 3-element ESPAR antenna.

ESPAR 안테나 소자의 수에 의해 크기가 결정된다. 그리고  $\mathbf{X}$ 는 바랙터 다이오드에 의해 변하는 리액턴스 값을 의미한다. 이러한 리액턴스  $jX_1$ 과  $jX_2$ 의 변화에 의해 빔패턴이 변화하게 된다. 또한, 여기서  $R_0$ 는 일반적으로  $50\Omega$ 이 된다.

## III. 빔공간 MIMO 시스템

빔 공간 MIMO 시스템은 단일 RF 체인을 사용하는 ESPAR 안테나를 사용하여 다중 안테나를 사용하여 각 안테나 별로 데이터를 전송하는 기존의 MIMO 시스템과는 달리 기생소자의 리액턴스를 변화시켜 빔을 변화함으로써 단 한 개의 능동 소자와 RF 체인을 가지고 다중 데이터 전송이 가능하다<sup>12)</sup>. 빔 공간 MIMO 시스템은 단일 능동소자에 첫 번째 심볼을 맵핑하고 두 번째 심볼에 해당하는 리액턴스 값을 이용해 패턴의 모양을 바꿈으로써 패턴을 수신하였을 때 패턴의 모양에 따라 두 번째 심볼을 판별할 수 있다.

식 (1)의 조향벡터  $\mathbf{s}(\theta)$ 를 통해 ESPAR 안테나의 기생소자의 위치를 정의할 수 있다. 3개의 소자를 가지는 ESPAR 안테나의 경우는 능동 소자의 좌우에 기생소자를 배치하게 되므로  $0^\circ$ 와  $180^\circ$ 의 위치를 가지는 것을 알 수 있다. 이를 이용하여 빔패턴  $G(\theta)$ 를 나타내면 다음과 같다.

$$G(\theta) = i_0 + i_1 e^{ja \cos(\theta)} + i_2 e^{ja \cos(\theta - \pi)} \quad (3)$$

식 (3)에서  $i_0$ 는 단일 능동소자에 흐르는 전류를 나타내고,  $i_1$ 과  $i_2$ 는 각 기생소자에 흐르는 전류는 나타낸다.  $G(\theta)$ 를 오일러 공식으로 전개하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} G(\theta) &= i_0 + (i_1 + i_2) \cos(ja \cos(\theta)) \\ &\quad - j(i_1 - i_2) \sin(ja \cos(\theta)) \end{aligned} \quad (4)$$

앞의 식 (4)를 실제 능동소자에 인가되는 전류  $i_0$ 를 이용해 묶어주면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} G(\theta) &= i_0 (B_o + (\frac{i_1}{i_0} + \frac{i_2}{i_0}) B_\Sigma(\theta)) \\ &\quad - j(\frac{i_1}{i_0} - \frac{i_2}{i_0}) B_\Delta(\theta) \\ G(\theta) &= i_0 ((1 + (\gamma_1 + \gamma_2) \varepsilon) B_o(\theta) \\ &\quad - j(\gamma_1 - \gamma_2) B_\Delta(\theta)) \\ G(\theta) &= i_0 (1 + (\gamma_1 + \gamma_2) \varepsilon \\ &\quad (B_o(\theta) - j \frac{\gamma_1 - \gamma_2}{1 + (\gamma_1 + \gamma_2) \varepsilon} B_\Delta(\theta))) \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)에서  $B_o(\theta)$ 는 무지향성 빔패턴을 의미하고  $B_\Sigma(\theta) = \cos(a \cos(\theta))$ ,  $B_\Delta(\theta) = \sin(a \cos(\theta))$  이다. 실제 능동소자에 인가되는 항인  $i_0(1+(\gamma_1+\gamma_2)\varepsilon)$ 에 의해 첫 번째 심볼을 결정할 수 있고, 두 번째 기저  $B_\Delta$ 에 의해 빔 패턴의 모양이 결정되므로 이를 이용하여 두 번째 심볼을 결정할 수 있다. 그리고  $\varepsilon$ 은  $B_\Sigma(\theta)$ 와  $B_o(\theta)$ 의 비율을 나타낸다.  $\varepsilon$ 은 다음과 같은 식을 통해 구할 수 있다.

$$\varepsilon^2 = \frac{1}{2\pi} \oint |\cos(a \cos(\theta))|^2 d\theta \quad (6)$$

식 (6)을 통해 안테나 간 거리가  $\lambda/16$ 일 때의  $\varepsilon$ 를 구하면 0.9623이 되는 것을 알 수 있다<sup>[13]</sup>.

여기서  $B_\Sigma$ 와  $B_\Delta$ 를 그림으로 표현하면 그림 2와 같다. 그림 2에서 실선은  $B_\Sigma(\theta)$ 를 나타내고 점선은  $B_\Delta(\theta)$ 를 나타낸다. 또한 점실선은  $B_\Delta(\theta)$ 를  $B_\Sigma(\theta)$ 와  $B_\Delta(\theta)$ 의 전력차이만큼 보상하여 그린 패턴이다. 여기서  $B_\Sigma(\theta)$ 와  $B_\Delta(\theta)$ 의 전력 차이는 식 (7)과 같이 구할 수 있다.

$$\Delta_P = \left( \frac{|\gamma_1 - \gamma_2|}{|1 + (\gamma_1 + \gamma_2)\varepsilon|^2} \right) \left( \frac{\frac{1}{2\pi} \oint |B_\Delta(\theta)|^2 d\theta}{\frac{1}{2\pi} \oint |B_\Sigma(\theta)|^2 d\theta} \right) \quad (7)$$

식 (7)에 의해 두 기저의 전력차이  $\Delta_P$ 를 구해보면 3.67이 나오게 되는데, 실제로 기저는 보상이 불가능하기 때문에, 심볼을  $\Delta_P$ 만큼 크게 하여 전송함으로써

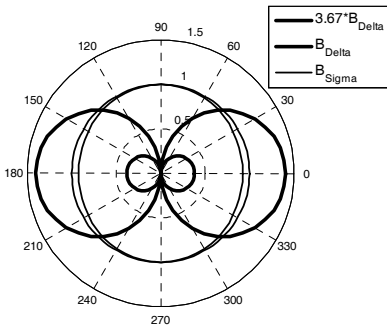


그림 2. 각 기저별 패턴  
Fig. 2. Patterns of each basis.

전력 불균형을 보상할 수 있다.

또한  $\gamma_1$ 과  $\gamma_2$ 는 기생소자의 전류에 관한 식으로서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\gamma_1 = \frac{Z_{12}Z_{01} - Z_{01}(Z_{11} + jX_2)}{(Z_{11} + jX_1)(Z_{11} + jX_2) - Z_{12}^2} \quad (8)$$

$$\gamma_2 = \frac{Z_{12}Z_{01} - Z_{01}(Z_{11} + jX_1)}{(Z_{11} + jX_1)(Z_{11} + jX_2) - Z_{12}^2}$$

식 (5)를 전류에 관한 식에서 심볼에 관한 식으로 정리하면 다음과 같다.

$$G(\theta) = x_1(B_o(\theta) + \chi B_\Delta(\theta)) \quad (9)$$

여기서  $\chi = x_2/x_1$ 이며, 단일 능동소자를 통해 심볼  $x_1$ 이 인가되고 두 개의 기생소자를 통해  $\chi$ 를 생성할 수 있다.  $\lambda$ 를 리액턴스 값의 변화를 통해 심볼을 의미하도록 하여 그에 따른 빔패턴을 조향하고 빔 공간 MIMO 시스템이 가능하게 된다<sup>[14]</sup>. 또한, 식 (9)에 임의의 심볼을 인가하였을 때 나타나는 패턴은 다음과 같이 그려진다.

여기서 실선에 사용된 심볼은 1+j와 3+j이고 점선에 사용된 심볼은 1+j와 -1-j이다. 패턴을 통해 한 심볼의 부호가 바뀔 경우 패턴의 방향이 바뀌므로 패턴을 통해 두 번째 심볼을 판별할 수 있음을 알 수 있다.

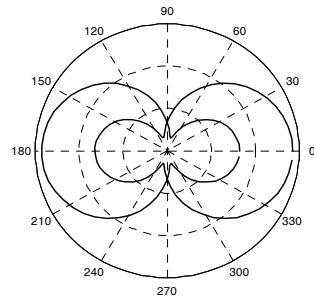


그림 3. 임의의 심볼에 의한 패턴  
Fig. 3. Patterns due to arbitrary symbols.

#### IV. 시뮬레이션 및 분석

본 논문에서는 3개의 요소를 가지는 ESPAR 안테나를 통해 16, 64-QAM 변조방식을 사용하여 빔 공간 MIMO 시스템을 설계하였다. 표 1은 시뮬레이션에서 사용한 변수를 나타낸 표로서, 변조 방식은 16, 64-QAM을 사용하였고, ESPAR 안테나의 소자 수는

표 1. 시뮬레이션 변수  
Table. 1. Simulation parameters.

Parameters	Values
Modulation	16-QAM
# of antenna elements	3
Inter-element distance	$\lambda/16$
Detection rule	ZF detection

3개로 하였다. 능동소자와 기생소자간 거리는  $\lambda/16$ 로 하였으며, 검출 방식은 ZF (Zero- Forcing)와 ML (Maximum-Likelihood) 검출 방식으로 진행하였다.

식 (9)를 통해  $\chi$ 로 두 번째 심볼을 만들 수 있는데,  $\chi$ 는 기생소자의 리액턴스에 의해 변하게 되므로 기생소자의 리액턴스에 따라 변화하는  $\chi$ 의 값을 그림으로 나타내면 다음과 같다.

그림 4는 안테나간 거리가  $\lambda/16$ 일 경우에 리액턴스 값을  $-j100\Omega$  부터  $j100\Omega$ 까지 변화시키면서  $\chi$ 를 표현한 그림이다. 그림 4를 통해 리액턴스가 변화함에 따라  $\chi$ 의 값이 변화하는 것을 알 수 있으며  $\chi$ 의 값이 약  $0 \sim \pm 5 \pm j5$ 사이에서는 값이 세밀하게 분포하고 있는 것을 알 수 있고  $\chi$ 가 커질수록 존재하는 점의 수가 줄어드는 것을 알 수 있다. 또한  $0 \sim \pm 5 \pm j5$  범위에서 실수와 허수가 부호가 같은 부분에서는 다른 부분에 비해 분포가 매우 적은 것을 알 수 있다.

그림 5는 전체  $\chi$ 값들 중 16-QAM 변조에 해당하는 심볼을 택하여 나타낸 그림이다. 그림 5를 통해 16-QAM 변조에 대한 심볼이 모두 존재하는 것을 확인 하였고, 각 심볼에 따라 리액턴스 값을 바꾸면서 두 번째 심볼을 인가할 수 있다. 또한 그림 2에서 나

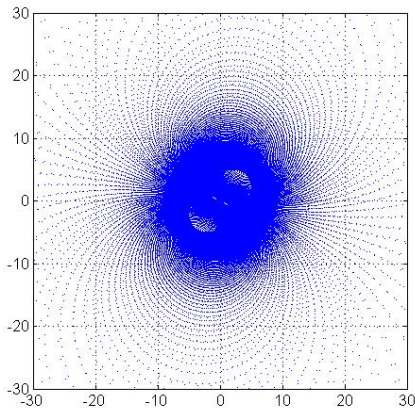


그림 4. 리액턴스 값에 따른  $\chi$  값 ( $X_1, X_2 = -100 \sim 100$ )  
Fig. 4.  $\chi$  values according to the reactance values ( $X_1, X_2 = -100 \sim 100$ ).

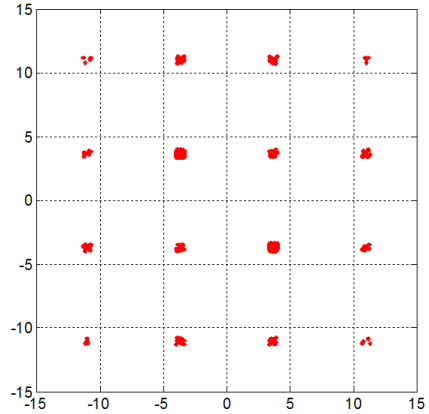


그림 5. 16-QAM 변조를 위한  $\chi$  값  
Fig. 5.  $\chi$  values for 16-QAM modulation.

타난  $B_{\Sigma}(\theta)$ 와  $B_{\Delta}(\theta)$ 의 전력차이 때문에  $\chi$ 가 의미하는 심볼을 3.67배하여 전력차이를 극복하였다. 그림 5에서 보듯이 리액턴스의 변화에 따른 심볼을 그림으로 나타내면 한 심볼에서 여러 개의 리액턴스 셋이 발생하는 것을 알 수 있다.

그림 6은 64-QAM 변조에 대해서 각 심볼에 해당하는  $\chi$ 를 나타낸다. 그림 4에서 보듯이 심볼의 크기가 커질수록 해당 심볼의 근처에 존재하는  $\chi$ 의 개수가 줄어들기 때문에 해당 심볼에 대한  $\chi$ 가 존재하지만 약간의 오차가 발생하는 것을 알 수 있다.

표 2는 각 심볼 별 리액턴스 셋을 나타낸다. 그림 5와 같이 각 심볼에 해당하는 점을 일정 오차를 두어 찾은 후 본래의 심볼과 가장 근사한 값을 가지는 리액턴스 값을 찾아내었다. 표에 해당하는 리액턴스 값을 사용할 경우 해당하는 심볼을 생성할 수 있다. 또한, 16-QAM 변조의 경우 64-QAM 변조의 심볼에 대한 리액턴스 셋을 모두 구하면 함께 구할 수 있는 것을 표를 통해 알 수 있다. 또한 해당 심볼을 사용하는 변조 차수를  $M$ 으로 나타내었다.

표 2. 각 심볼 별 리액턴스 셋  
Table. 2. Reactance set of each symbol.

$\chi$	$jX_1$	$jX_2$	$M$
-7+j7	j11.9	-j12.1	64
-7+j5	j11.3	-j12	64
-7+j3	-j11.1	j12.7	64
-7+j1	-j11.5	j14.2	64
-7-j1	-j12	j15.7	64
-7-j3	j7.9	-j10.5	64
-7-j5	-j12.5	j16.3	64
-7-j7	j8.3	-j10.4	64
-5+j7	j12.7	-j12.4	64

-5+j5	-j10.5	j10.8	64
-5+j3	j10.7	-j12.1	64
-5+j1	-j11.4	j15	64
-5-j1	-j12.4	j18.4	64
-5-j3	-j12.9	j19	64
-5-j5	-j12.9	j17.7	64
-5-j7	-j12.8	j16.6	64
-3+j7	j14	-j12.8	64
-3+j5	-j12.4	j18.4	64
-3+j3	j12.3	-j13	16, 64
-3+j1	j8.1	-j11.8	16, 64
-3-j1	-j13.5	j26.9	16, 64
-3-j3	-j14	j24	16, 64
-3-j5	-j13.5	j19.5	64
-3-j7	-j13.1	j17.2	64
-1+j7	-j9.9	j8.4	64
-1+j5	j17.1	-j13.8	64
-1+j3	j19.6	-j15.1	16, 64
-1+j1	j14.7	-j17	16, 64
-1-j1	j0.8	-j6.8	16, 64
-1-j3	-j15.6	j28.9	16, 64
-1-j5	-j14	j19.8	64
-1-j7	-j13.2	j16.7	64
1+j7	j16.7	-j13.2	64
1+j5	j19.8	-j14	64
1+j3	j28.9	-j15.6	16, 64
1+j1	-j6.8	j0.8	16, 64
1-j1	-j17	j14.7	16, 64
1-j3	-j15.1	j19.6	16, 64
1-j5	-j13.8	j17.1	64
1-j7	j8.4	-j9.9	64
3+j7	j17.2	-j13.1	64
3+j5	j19.5	-j13.5	64
3+j3	j24	-j14	16, 64
3+j1	j26.9	-j13.5	16, 64
3-j1	-j11.8	j8.1	16, 64
3-j3	-j13	j12.3	16, 64
3-j5	-j13	j13.8	64
3-j7	-j12.8	j14	64
5+j7	j16.6	-j12.8	64
5+j5	j17.7	-j12.9	64
5+j3	j19	-j12.9	64
5+j1	j18.4	-j12.4	64
5-j1	j15	-j11.4	64
5-j3	-j12.1	j10.7	64
5-j5	j10.8	-j10.5	64
5-j7	-j12.4	j12.7	64
7+j7	-j10.4	j8.3	64
7+j5	j16.3	-j12.5	64
7+j3	-j10.5	j7.9	64
7+j1	j15.7	-j12	64
7-j1	j14.2	-j11.5	64
7-j3	j12.7	-j11.1	64
7-j5	-j12	j11.3	64
7-j7	-j12.1	j11.9	64

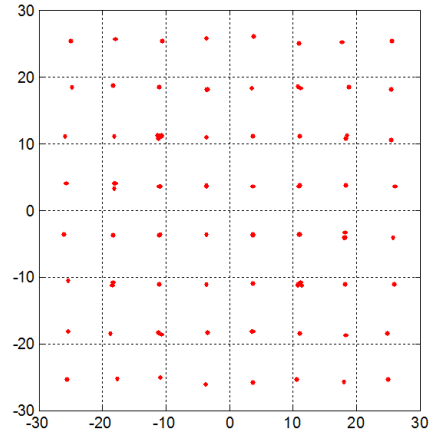


그림 6. 64-QAM 변조를 위한  $\chi$  값  
Fig. 6.  $\chi$  values for 64-QAM modulation.

그림 7은 ZF 검출 방식을 사용한 16-QAM과 16-PSK 빔 공간 MIMO 시스템의 BER 성능 비교한 그래프이다. 그림 7의 그래프를 통해 기존의 MIMO 시스템을 사용하였을 때와 같이 16-PSK 변조방식보다 16-QAM 변조 방식이 더 좋은 BER 성능을 보이는 것을 알 수 있으며 30dB에서 약  $9 \times 10^{-2}$ 의 BER 성능차이가 발생하는 것을 알 수 있다.

그림 8은 ZF 검출 방식을 사용한 16-QAM 변조의 빔 공간 MIMO 시스템의 BER 성능을 나타낸 것이다. 그림 8을 보면 20dB 이전까지는 빔 공간 MIMO 시스템이 BER 성능이 약간 좋은 것을 알 수 있으나, 20~25dB까지는 거의 동일한 것이 보이고 그 이후에는 기존의 다중 안테나 MIMO 시스템이 BER 성능이 더 좋은 것을 알 수 있다. 그림 8을 통해 16-QAM 변조의 기존의 다중 안테나 MIMO 시스템과 빔 공간

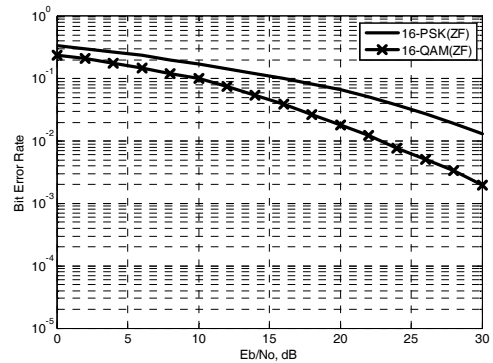


그림 7. ZF 검출 방식을 사용한 16-QAM과 16-PSK 빔 공간 MIMO 시스템의 BER 성능 비교  
Fig. 7. Comparison of BER performance of beamspace MIMO systems for 16-QAM modulation and 16-PSK modulation using the ZF detection.

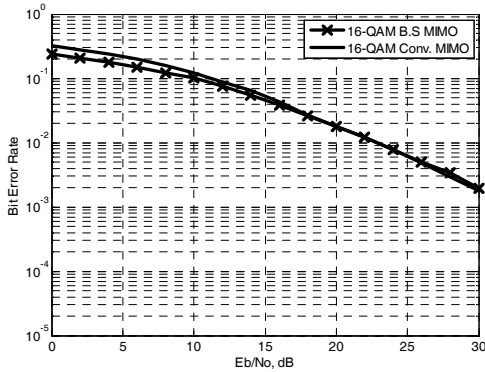


그림 8. ZF 검출 방식을 사용한 16-QAM 빔 공간 MIMO 시스템의 BER 성능  
 Fig. 8. BER performance of beamspace MIMO systems for 16-QAM modulation using the ZF detection.

MIMO 시스템의 BER 성능이 유사하게 나오는 것을 알 수 있다.

그림 9는 16-QAM과 64-QAM 변조를 사용한 빔 공간 MIMO 시스템에서 ZF 검출 방식을 사용하였을 때 BER 성능을 비교한 것이다. 변조 차수가 16에서 64로 증가함에 따라 BER 성능이 약  $6 \times 10^{-2}$  정도 열화되는 것을 알 수 있다.

그림 10은 ZF와 ML 검출방식을 통해 64-PSK와 64-QAM 변조의 빔 공간 MIMO 시스템의 성능을 비교한 것이다. 점선의 그래프는 64-PSK 변조를 사용했을 때의 그래프이고, 실선은 64-QAM 변조를 사용했을 경우의 그래프이다. 또한 O 기호를 사용한 그래프는 ZF 검출방식을 사용한 경우의 성능을 의미하고, X 기호를 사용한 그래프는 ML 검출방식을 사용한 경우의 성능을 의미한다. 그림 10과 같이 64-PSK 변조방

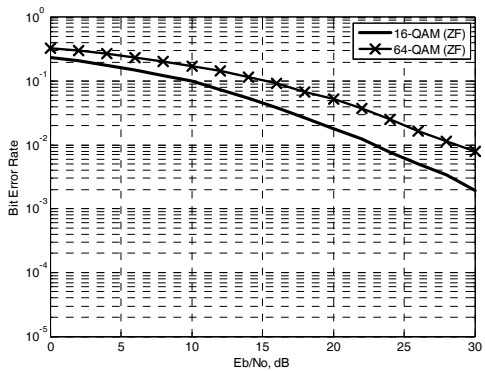


그림 9. ZF 검출 방식을 사용한 16-QAM과 64-QAM 빔 공간 MIMO 시스템의 BER 성능비교  
 Fig. 9. Comparison of BER performance between 16-QAM and 64-QAM modulation beamspace MIMO systems using the ZF detection.

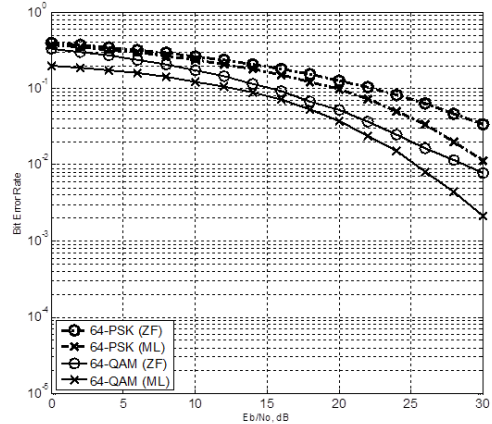


그림 10. ZF, ML 검출 방식을 사용한 64-PSK, 64-QAM 변조의 빔 공간 MIMO 시스템의 BER 성능비교  
 Fig. 10. Comparison of BER performance between 64-PSK and 64-QAM modulation beamspace MIMO systems using the ZF and ML detection.

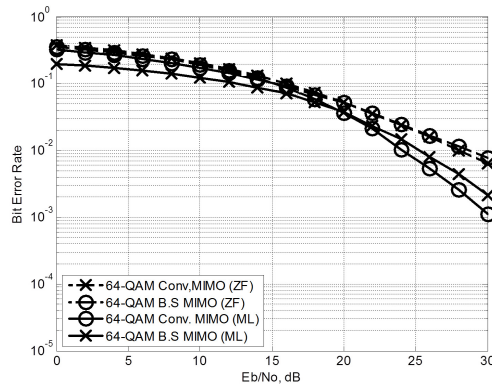


그림 11. ZF, ML 검출 방식을 사용한 64-QAM 변조의 빔 공간 MIMO 시스템의 BER 성능비교  
 Fig. 11. Comparison of BER performance of 64-QAM modulation beamspace MIMO systems using the ZF and ML detection.

식보다 64-QAM 변조방식이 성능이 더 좋은 것을 알 수 있고, ZF 검출방식보다 ML 검출 방식에서 더 좋은 BER 성능이 나오는 것을 알 수 있다.

### V. 결 론

본 논문에서는 1개의 능동소자와 2개의 기생소자를 가지는 ESPAR 안테나를 사용하여 16-QAM 변조 방식과 64-QAM 변조방식을 이용한  $2 \times 2$  빔 공간 MIMO 시스템을 구현하고 성능을 평가하였다. 두 개의 기생소자의 리액턴스를 변화시켜 16-QAM과 64-QAM 심볼에 해당하는 리액턴스 값을 찾고 이를

셋으로 만들어 빔 공간 MIMO 시스템의 성능을 확인하였다. 시뮬레이션을 통해 BER 성능을 확인한 결과, 그림 7을 통해 16-PSK 변조를 사용한 빔 공간 MIMO 시스템에 비해 16-QAM 변조방식을 사용하였을 경우 30dB에서 약  $9 \times 10^{-2}$ 의 BER 성능 향상을 보일 수 있었고, 그림 8을 통해 20dB 이전에는 기존 MIMO 시스템보다 약간 더 좋은 BER 성능을 보이고 25dB 이후에는 BER 성능이 조금 열화 되었지만, 기존의 다중 안테나를 사용하는 MIMO 시스템과 유사한 성능을 보이는 것을 확인하였다. 그리고 그림 10에서는 같은 검출 방식을 사용하였을 경우 빔 공간 MIMO 시스템에서 64-QAM 변조보다 16-QAM 변조가 더 좋은 성능을 보이는 것을 확인하였다. 그림 10을 통해 64-PSK 변조보다 64-QAM 변조의 성능이 더 좋은 것을 확인하고, ZF 검출방식보다 ML 검출방식이 성능이 더 좋은 것을 확인하였다. 그림 11에서는 각 검출방식에서 빔 공간 MIMO 방식이 기존 다중 안테나 MIMO 방식보다 약 20dB 이전에는 조금 더 좋은 성능을 보이나, 25dB 이상에서는 빔 공간 MIMO의 성능이 더 열화되는 것을 알 수 있었다.

### References

- [1] A. Goldsmith, S. A. Jafar, N. Jindal, and S. Vishwanath, "Capacity limits of MIMO channels," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 21, no. 5, pp. 684-702, Jun. 2003.
- [2] J. Weber, C. Volmer, K. Blau, R. Stephan, and M. A. Hein, "Miniaturized antenna arrays using decoupling networks with realistic elements," *IEEE Trans. Microw. Theory Tech.*, vol. 54, no. 6, pp. 2733 - 2740, Jun. 2006.
- [3] M. Taromaru and T. Ohira, "Electronically steerable parasitic array radiator antenna-principle, control theory and its applications-," *Elect. Commun. in Japan*, vol. 87, no. 10, pp. 25-45, Sept. 2004.
- [4] V. Barousis, A. G. Kanatas, and G. Eftymoglou, "A complete MIMO system built on a single RF communication ends," *PIERS Online*, vol. 6, no. 6, pp. 559-563, 2010.
- [5] A. Kalis, C. Papadias, and A. G. Kanatas, "An ESPAR antenna for beam-space-MIMO systems using PSK modulation schemes," *IEEE Trans. Commun.*, pp. 5348-5353, Jun. 2007.
- [6] B.-J. Kim and H.-G. Ryu, "Beamspace MIMO system with different elements distances in ESPAR antenna," in *Proc. ICOIN*, pp. 97-101, Phuket, Thailand, Feb. 2014.
- [7] V. I. Barousis and A. G. Kanatas, "Aerial degrees of freedom of parasitic arrays for single rf front-end mimo transceivers," *Progress In Electromagnetics Research B*, vol. 35, pp. 287-306, 2011.
- [8] B. Han, V. I. Barousis, C. B. Papadias, A. Kalis, and R. Prasad, "MIMO over ESPAR with 16-QAM Modulation," *IEEE Wirel. Comm. Lett.*, vol. 2, no. 6, pp. 687-690, Dec. 2013.
- [9] Osama N. Alrabadi, C. B. Papadias, A. Kalis, N. Marchetti, and R. Prasad, "MIMO transmission and reception techniques using three-element ESPAR Antennas," *IEEE Commun. Lett.*, vol. 13, no. 4, pp. 236-238, Apr. 2009.
- [10] S.-H. Ju, "Beam steering dipole array using reactive loading," M.S Thesis, Chungbuk National Univ, Cheongju, Korea, 2009.
- [11] E. P. Tsakalaki, D. Wilcox, E. de Carvalho, C. B. Papadias, and T. Ratnarajah, "Spectrum sensing using single-radio switched-beam antenna systems," in *Proc. CROWNCOM*, pp. 118-123, Stockholm, Jun. 2012.
- [12] A. Kalis, A. G. Kanatas, and C. B. Papadias, "A novel approach to MIMO transmission using a single RF front end," *IEEE J. Selected Areas in Commun.*, vol. 26, pp. 972-980, Aug. 2008.
- [13] O. N. Alrabadi, "MIMO communication using single feed antenna arrays," Ph.D Thesis, Aalborg Univ. Aalborg, Denmark, 2011.
- [14] O. N. Alrabadi, C. B. Papadias and A. Kalis, "A universal encoding scheme for MIMO transmission using a single active element for PSK modulation schemes," *IEEE Trans. Wirel. Commun.*, vol. 8, no. 10, pp. 5133-5142, Oct. 2009.



김 봉 준 (Bong-Jun Kim)



2013년 2월 : 충북대학교 전자  
공학과 졸업

2013년 3월~현재 : 충북대학교  
전자공학과 석사과정

<관심분야> 무선통신시스템, 스  
마트안테나, 터보등화기

유 흥 균 (Heung-Gyoon Ryu)



1988년~현재 : 충북대학교 전자  
공학과 교수

2002년 3월~2004년 2월 : 충북  
대학교 컴퓨터정보통신연구  
소 소장

1996년~현재 : IEEE, IET 논문  
심사위원

2002년 : 한국전자파학회 학술상 수상

2008년 : ICWMC 2008 국제학술대회 “Best Paper  
Award” 수상

2009년 : SPACOMM 2009 국제학술대회 “Best Paper  
Award” 수상

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