

# 단일 RF chain을 갖는 전자 빔 조향 기생 배열 안테나를 사용한 빔 공간 MIMO 시스템

안창영\*, 이승환\*, 유흥균<sup>o</sup>

## Beamspace MIMO System Using ESPAR Antenna with single RF chain

Changyoung An\*, Seung Hwan Lee\*, Heung-Gyoon Ryu<sup>o</sup>

요 약

최근 기존의 배열 안테나를 사용하는 MIMO(multi-input multi-output) 시스템의 단점을 극복하기 위하여 1개의 능동 소자와 주변의 기생 소자를 이용하는 ESPAR(electronically steerable parasitic array radiator) 안테나에 대한 연구가 이루어지고 있다. 이 안테나의 가장 큰 장점은 단지 1개의 RF(radio frequency) chain만을 사용하는 것이다. 단일 RF chain을 사용하기 때문에 하드웨어 복잡도가 높지 않다. ESPAR 안테나를 사용하는 빔 공간 MIMO 시스템의 경우 각각의 직교 기저 패턴에 심볼을 맵핑하여 송신한다. 본 논문에서는 저 복잡도, 저 전력의 MIMO 시스템을 위해 단일 RF chain을 사용하는 ESPAR 안테나를 이용하여 시스템을 구성하고 각각의 위상 편이 변조에 따른 성능을 분석한다. 빔 공간 MIMO 시스템은 기존의 MIMO 시스템과 유사한 성능을 낸다. BPSK(binary phase shift keying), QPSK(quadrature phase shift keying), 8PSK, 16PSK, 32PSK의 고차 변조에 대한 시스템 성능을 분석한 결과, 빔 공간 MIMO 시스템이 저 복잡도와 저 전력소비로 기존 신호 도메인의 MIMO 시스템과 유사한 성능 특성을 가지는 것을 확인하였다.

**Key Words** : beamspace MIMO, ESPAR, single RF chain, MIMO communication, orthogonal basis

### ABSTRACT

The main advantage of ESPAR antenna is that ESPAR antenna requires only a single RF chain for reduction of transceiver's hardware complexity, as compared to conventional MIMO system. In conventional MIMO system, each data symbol is mapped to each antenna. But, each data symbol is mapped to each orthogonal basis pattern in ESPAR antenna system. In this paper, we design beamspace MIMO system using ESPAR antenna with single RF chain for MIMO system of low-complexity and low power consumption. And then, we analyze performance of beamspace MIMO according to each PSK modulation. Performance of beamspace MIMO system is similar to performance of conventional MIMO system. As a result of analyzing the performance of beamspace MIMO system using higher-order PSK modulation, we can confirm that performance characteristic of beamspace MIMO system with low complexity and low power consumption is similar to digital communication of signal domain.

\* 본 연구는 미래창조과학부가 지원한 2013년 정보통신·방송(ICT) 연구개발사업의 연구결과로 수행되었음  
(단말 안테나 고집적화를 위한 Compact MIMO 기술 개발).

◆ First Author : 충북대학교 전자공학과, acy890217@naver.com, 학생회원

◦ Corresponding Author : 충북대학교 전자공학과, ecomm@cbu.ac.kr, 정회원

\* 한국전자통신연구원, lsh@etri.re.kr

논문번호 : KICS2013-07-311, 접수일자 : 2013년 7월 29일, 최종논문접수일자 : 2013년 10월 4일

## I. 서 론

일반적인 배열 안테나를 이용하여 데이터 속도를 향상시키는 MIMO 기술에 대해서는 이미 잘 알려져 있다. 기존의 MIMO 기술은 안테나를 확장할 경우 RF chain도 함께 증가하여 하드웨어 복잡도를 증가시킨다. 또한 RF chain의 증가는 전력 소비 또한 증가시킨다. 이러한 특징은 전력이 제한 적인 모바일 단말기에서 큰 단점으로 작용한다. 따라서 더 빠른 속도를 가지도록 MIMO 시스템을 확장하기가 어렵다. 그러나 모바일 단말기에서의 데이터 사용량은 지속적으로 증가하고 있고 더 빠른 속도를 요구하고 있다<sup>[1]</sup>.

최근 기존의 선형 배열 안테나를 사용하는 MIMO 시스템의 단점을 극복하기 위하여 1개의 능동 소자와 주변의 기생 소자를 이용하는 ESPAR(electronically steerable parasitic array radiators) 안테나에 대한 연구가 이루어지고 있다. 이 안테나의 가장 큰 장점은 단지 1개의 RF chain만을 사용하는 것이다<sup>[2]</sup>. 단일 RF chain을 사용하기 때문에 하드웨어 복잡도가 높지 않다.

기존의 선형 배열 안테나를 사용하는 MIMO 시스템의 경우 각각의 안테나에 데이터 심볼을 맵핑하여 송신한다. 그러나 ESPAR 안테나를 사용하는 빔 공간 MIMO 시스템의 경우 각각의 직교 기저 패턴에 심볼을 맵핑하여 송신한다<sup>[3]</sup>. 기존의 배열 안테나 시스템은 데이터 속도를 향상시키기 위해 안테나의 개수를 늘려서 더 많은 데이터 심볼을 맵핑한다. 이러한 방법은 안테나가 증가함에 따라 RF chain도 증가한다. 그러나 빔 공간 MIMO 시스템의 경우 데이터 전송 속도를 증가시키기 위해 RF chain이 연결되는 능동 소자는 1개를 유지하면서 주변의 기생 소자들을 증가시킨다. 기생 소자의 개수를 증가시키면 그에 따라 직교 기저 패턴의 수도 증가하며 더 많은 데이터 심볼을 더 많은 직교 기저 패턴에 맵핑할 수 있다. 데이터 속도의 향상을 위해 소자를 확장하여도 RF chain은 단 하나만을 사용하기 때문에 기존 MIMO 시스템과 비교하여 복잡도가 적다<sup>[4]</sup>.

본 논문에서 저 복잡도, 저 전력의 MIMO 시스템을 위해 단일 RF chain을 사용하는 ESPAR 안테나를 이용하여 시스템을 구성하고 각각의 BPSK, QPSK, 8PSK, 16PSK, 32PSK의 위상 편이 변조에 따른 성능을 전체적으로 비교하여 확인하고 분석한다. 또한 성능을 분석함에 있어서 여러 개의 RF 체

인을 사용하는 기존 MIMO 시스템의 성능과 단일 RF 체인을 사용하는 빔 공간 MIMO 시스템의 BPSK부터 32PSK까지에 이르는 PSK계열 변조방식에서 성능 특성을 비교하여 빔 공간 MIMO 시스템의 성능 특성이 기존 MIMO 시스템의 디지털 통신 특성과 유사한지 확인하고 분석한다. 본 논문에서는 I장의 서론에 이어서 II장에서 ESPAR 안테나의 기본 구조를 설명한다. 그리고 III장에서는 빔 공간의 MIMO 시스템을 설명하고 IV장에서 빔 공간 MIMO 시스템의 각 위상 편이 변조에 따른 성능을 분석할 것이다. 마지막으로 V장에서 결론을 낸다.

## II. ESPAR antenna

ESPAR 안테나는 M-1개의 기생 소자와 1개의 능동 소자로 구성되어 있다. 기생 소자는 리액턴스 부하에 연결되어 있고 능동 소자는 단일 RF chain에 연결되어 있다. 일반적으로 사용하는 배열 안테나의 경우와 비교하여 ESPAR 안테나는 더 적은 안테나 공간을 요구한다. 능동 소자에서 신호가 발생될 때 기생 소자의 가변적인 리액턴스 부하의 사용으로 신호의 방사 패턴이 바뀔 수 있다. 3개의 소자를 가지는 ESPAR 안테나의 구조는 다음과 같다<sup>[5,6]</sup>.

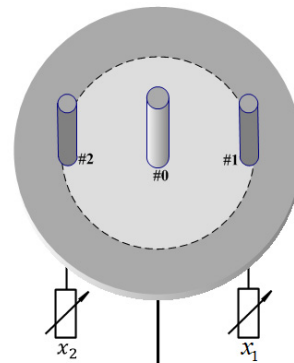


그림 1. 3소자 ESPAR 안테나  
Fig. 1. 3-element ESPAR antenna

M 개 소자 ESPAR 안테나는 1개의 능동소자 M-1개의 기생 소자로 이루어져 있으며 각각의 기생 소자에는 리액턴스 부하가 인가된다.

각 소자에 인가되는 전류는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

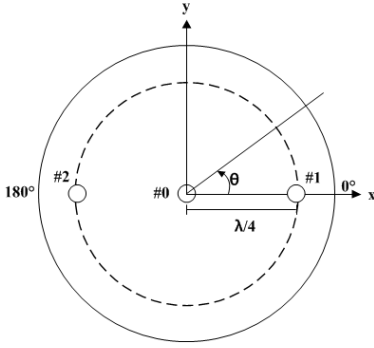


그림 2. 3소자 ESPAR 안테나의 구조  
Fig. 2. Structure of 3-element ESPAR antenna

$$\mathbf{i} = v_s (\mathbf{Z} + \mathbf{X})^{-1} \mathbf{u} \quad (1)$$

여기에서  $\mathbf{Z}$ 는  $M \times M$  행렬이며  $Z_{ij}$ 의 원소로 구성되고 각각의 원소는  $i$ 번째와  $j$ 번째 소자의 상호 어드미턴스를 나타낸다.  $\mathbf{X}$ 는 각 소자의 리액턴스 행렬로 구성되어 대각 행렬로 구성된다.

$$\mathbf{X} = \text{diag}[50 \quad jx_1 \quad \dots \quad jx_{M-1}] \quad (2)$$

여기에서 50은 능동 소자의 50옴 부하를 나타내며, 1부터  $M-1$ 까지의 리액턴스 값은 ESPAR 안테나의 빔 패턴을 조절한다.  $\mathbf{u}$ 는  $M$ 개의 원소를 가지는 벡터로 다음과 같이 나타내어진다.

$$\mathbf{u} = [1 \quad 0 \quad \dots \quad 0]^T \quad (3)$$

여기에서  $v_s$ 는 능동 소자에 인가되는 복소 전압을 나타낸다. 마지막으로 ESPAR 안테나의 방사 패턴은 다음과 같이 표현된다<sup>7)</sup>.

$$G(\theta) = \mathbf{i}^T \mathbf{s}(\theta) = \sum_{m=0}^{M-1} i_m s_m(\theta) \quad (4)$$

$$\mathbf{s}(\theta) = [s_0(\theta) \quad \dots \quad s_{M-1}(\theta)]^T \quad (5)$$

식 (4)에서  $\mathbf{i}$ 는 식 (1)의 전류 벡터를 나타낸다.  $\mathbf{s}(\theta)$ 는 조향 벡터로 식 (5)와 같이 구성되어있다. 식 (4)에서  $i_m$ 은 전류 벡터의  $m$ 번째 원소를 나타내고,  $s_m(\theta)$ 는 조향 벡터의  $m$ 번째 원소를 나타낸다.

### III. Beamspace MIMO

본 논문에서는 단일 RF chain 구조의 ESPAR 안테나를 사용하는 MIMO 시스템에서 각각의 위상 편이 변조에 따른 성능을 분석한다. 성능을 분석하기 위해 빔 공간을 사용하는 MIMO 시스템 구조를 설계한다. 기존의 MIMO 시스템은 각각의 안테나에 다른 데이터 심볼을 맵핑하여 공간 다중화를 실현하였지만, 빔 공간 MIMO 시스템은 직교 기저 패턴을 사용하여 빔 공간 영역에 데이터 심볼을 맵핑하여 공간 다중화를 실현한다. 빔 공간 MIMO 시스템을 구성하기 위해 앞에서 설명한 ESPAR 안테나를 사용한다.

우선 MIMO 시스템에서는 다음과 같은 채널 환경을 고려할 수 있다<sup>11)</sup>.

$$\begin{aligned} \mathbf{H} &= \sum_{i=1}^L b_i \mathbf{a}_R(\theta_{R,i}) \mathbf{a}_T^H(\theta_{T,i}) \\ &= \mathbf{A}_R(\hat{\theta}_R) \mathbf{H}_b \mathbf{A}_T^H(\hat{\theta}_T) \end{aligned} \quad (6)$$

여기에서  $L$ 은 빔 공간 송신기와 수신기 사이의 경로의 개수를 나타낸다.  $\mathbf{a}_T$ ,  $\mathbf{a}_R$ 은 각각 송신기와 수신기의 조향 벡터이다.  $\hat{\theta}_T$ ,  $\hat{\theta}_R$ 은 각각 신호가 출발하는 각도와 도착하는 각도의 방향 벡터이다.  $H_b$ 는 경로에 대한 복소 이득  $b_i$ 로 구성된  $L \times L$  대각 행렬이다. 또한  $\mathbf{A}_T(\hat{\theta}_T)$ ,  $\mathbf{A}_R(\hat{\theta}_R)$ 은 각각 송신기와 수신기의 조향 행렬이다.

빔 공간 송신기와 균일한 선형 배열 안테나 수신기를 사용하는 경우에 채널 행렬은 다음과 같다<sup>4)</sup>.

$$\mathbf{H} = \mathbf{A}_R(\hat{\theta}_R) \mathbf{H}_b \mathbf{B}_T \quad (7)$$

여기에서  $\mathbf{B}_T$ 는  $M_T \times L$  크기의 행렬이고 각각의 행은 각각의 직교 기저 패턴의  $L$  표본을 포함한다. 이를 전체 빔 공간 MIMO 시스템에 적용하면 다음과 같다.

$$\mathbf{H}_{bs} = \mathbf{B}_R^H \mathbf{H}_b \mathbf{B}_T \quad (8)$$

빔 공간 MIMO 시스템에서 수신 신호는 다음과 같은 관계를 가지고 있다<sup>[2]</sup>.

$$\begin{aligned} \mathbf{y} &= \mathbf{H}_{bs} \mathbf{x} + \mathbf{n} & (9) \\ \Leftrightarrow \mathbf{y} &= \mathbf{B}_R^H \mathbf{H}_b \mathbf{B}_T \mathbf{x} + \mathbf{n} \\ \Leftrightarrow \mathbf{y} &= \mathbf{B}_R^H \mathbf{H}_b P_T^{(\mathbf{x})}(\hat{\theta}_T) + \mathbf{n} \end{aligned}$$

여기에서  $P_T^{(\mathbf{x})}(\hat{\theta}_T) = \mathbf{B}_T \mathbf{x}$  각 시간에서 실제로 송신되는 방사 패턴의 각에 대한 표본을 나타낸다. 여기에서 송신 패턴의 샘플은 각각의 직교 기저 패턴에 송신 심볼이 선형 결합으로 이루어진다. 따라서 데이터 스트림을 각각의 직교 기저 패턴에 결합시켜 동시에 결합 할 수 있다. 빔 공간 송신 패턴의 샘플은 다음과 같이 나타내어진다<sup>[3]</sup>.

$$P_T^{(\mathbf{x})}(\hat{\theta}_T) = [B_{T,1}(\hat{\theta}_T) \cdots B_{T,M_T}(\hat{\theta}_T)] \begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_{M_T} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$P_T^{(\mathbf{x})}(\hat{\theta}_T) = \sum_{k=1}^{M_T} x_k B_{T,k}(\theta) \quad (11)$$

여기에서  $B_{T,k}(\theta)$ ,  $k = 1, \dots, M_t$  는 직교 기저 패턴을 나타내며,  $\mathbf{x} = [x_1 \cdots x_M]^T$  는 송신하고자 하는 심볼 벡터를 나타낸다. 이 심볼 벡터는 직접적으로 위상 편이 변조를 사용할 수 있다.

빔 공간으로 송신된 데이터를 수신하기 위하여 수신기에서는 빔 공간으로 방사된 신호를 수신하고 이를 이용하여 송신 빔 패턴을 추정하고 추정된 빔 패턴에서 송신 데이터를 수신할 수 있다. ESPAR 안테나는 1개의 능동 안테나가 존재하기 때문에 송신 신호를 표본화 하여 수신하여 빔 패턴 추정을 위한 표본을 획득해야 한다. 수신기에서는 심볼의 한 주기 동안 빔의 방향을 회전시켜서 방사된 빔 패턴의 표본을 획득하게 된다. 빔 공간 MIMO 통신을 하기 위해 송신기에서는 먼저 직교 기저 패턴과 데이터 심볼의 선형 결합의 모든 패턴을 송신하고 수신기에서 이를 수신하여 각 심볼 데이터에 대한 모든 채널응답을 구한다.

그 다음 빔 공간으로 송신 되는 패턴을 표본화하여 수신한 후 미리 구한 채널응답 값과 ML(maximum likelihood)을 방식으로 비교하여 가장 근접한 빔 패턴을 획득하고 이 빔 패턴에서 데이터를 추출한다.

본 논문에서는 빔 공간 MIMO 시스템의 각각 위상 편이 변조에 따른 성능을 분석하기 위해 3개의 소자를 가지는 ESPAR 안테나를 사용하며 내부 소자간의 간격  $d = \lambda/4$ 로 고려하였다. 송신기의 방사패턴은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} G(\theta) &= \mathbf{i}^T \mathbf{s}(\theta) & (12) \\ &= i_0 + i_1 e^{j \cos(\theta)} + i_2 e^{-j \cos(\theta)} \\ &= i_0 + (i_1 + i_2) \cos(\theta) \\ &\quad + j(i_1 - i_2) \sin(\theta) \end{aligned}$$

여기에서  $a = 2\pi d/\lambda$ 이고, 각 소자에 인가되는 전류 벡터  $\mathbf{i}$ 와 조향 벡터  $\mathbf{s}(\theta)$ 는 다음과 같다.

$$\mathbf{i} = [i_0 \quad i_1 \quad i_2]^T \quad (13)$$

$$\mathbf{s}(\theta) = [1 \quad e^{j \cos(\theta)} \quad e^{-j \cos(\theta)}]^T \quad (14)$$

여기에서  $i_0$ 는 능동 소자에 흐르는 전류를 나타내고,  $i_1, i_2$ 는 수동 소자에 흐르는 전류를 나타낸다.

3개의 소자를 사용하는 ESPAR 안테나의 직교 기저 패턴은 다음과 같이 나타내어진다.

$$\begin{aligned} B_{T,k}(\theta) &= B_{R,k}(\theta) \\ &= \begin{cases} i_0 + (i_1 + i_2) \cos(\theta) & k = 1 \\ (i_1 - i_2) \sin(\theta) & k = 2 \end{cases} \end{aligned} \quad (15)$$

위의 직교 기저 패턴에 데이터 심볼  $\mathbf{x}$ 를 각각 선형 결합하여 빔 공간으로 방사하게 된다. 이러한 빔 공간을 이용한 MIMO 시스템의 경우 ESPAR 안테나를 사용하기 때문에 1개의 RF chain을 사용하여 기존의 MIMO 시스템에 비해 복잡도를 크게 줄일 수 있다.

#### IV. 시뮬레이션 및 분석

본 논문에서는 3개의 소자를 갖는 ESPAR 안테나를 이용한 빔 공간 MIMO 시스템을 설계하고 각각의 위상 편이 변조에 따른 성능을 분석하였다. 시뮬레이션을 위한 세부 사항은 다음과 같다. 성능 비교를 위하여 BPSK 변조를 사용하고 ML 방식의 판정기를 사용한 기존의 MIMO 시스템의 성능을 확인하였다<sup>8)</sup>.

표 1. 시뮬레이션 환경  
Table 1. Simulation parameters

Modulation	BPSK, QPSK, 8-PSK, 16-PSK, 32-PSK
Number of element	3-element ESPAR
Inter-element distance	$\lambda/4$
Number of path	2
Channel	i.i.d.(independent and identically distributed)
Decision rule	ML

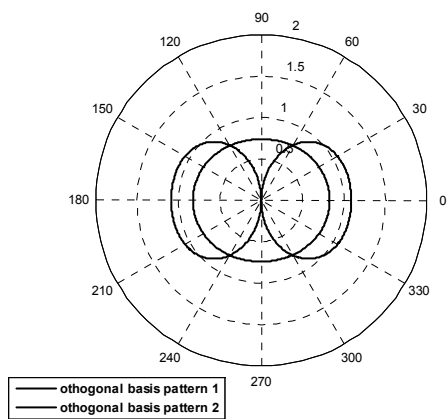


그림 3. 3소자 ESPAR 안테나의 직교 기저 패턴  
Fig. 3. Orthogonal basis patterns of 3-element ESPAR antenna

그림 3는 식 (15)의 직교 기저 패턴을 나타낸다. 직교 기저 패턴 1은 식 (15)의  $k=1$ 일 때를 나타내며, 직교 기저 패턴2는  $k=2$ 일 때를 나타낸다. 3소자 ESPAR 안테나의 경우 2개의 직교 기저패턴을 사용할 수 있다. 각각의 기저 패턴에 데이터 심볼이 결합된 후 선형 결합이 된 빔 패턴이 형성되

어 2개의 데이터 스트림을 송신되게 된다<sup>9)</sup>.

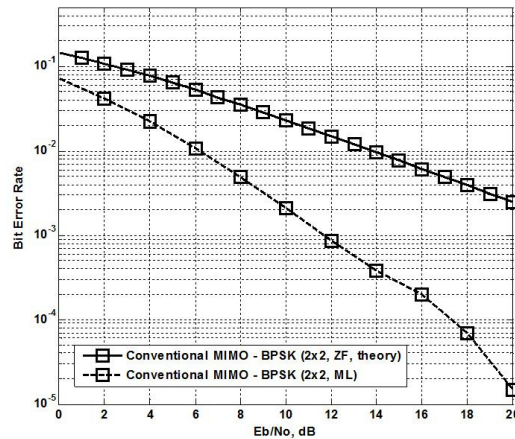


그림 4. 기존의 2x2 MIMO 시스템에서 BPSK 변조를 사용하였을 때 성능  
Fig. 4. BER performance of conventional 2x2 MIMO system using BPSK modulation

그림 4는 기존 배열 안테나를 사용하는 MIMO 시스템에서 BPSK 변조를 하고 추정된 채널을 이용하여 Pseudo inverse 행렬을 구하여 이를 수신된 신호에 곱해주는 방식의 ZF(zero-forcing) 판정 방법과 ML 판정 방법을 사용하였을 경우의 BER 성능을 나타낸다. ML 판정 방법이 ZF 판정 방법보다 성능이 좋은 것을 확인할 수 있다. ML 판정을 사용하였을 경우 17dB에서  $10^{-4}$ 의 성능을 내는 것을 확인할 수 있다.

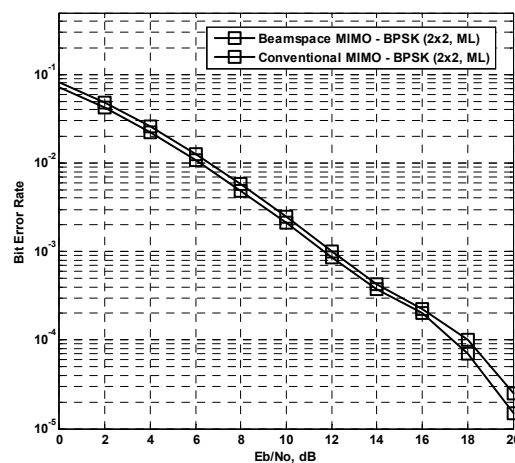


그림 5. 빔 공간 MIMO 시스템과 기존 시스템의 BPSK 변조를 사용하였을 경우의 성능 비교  
Fig. 5. Comparison of BER performance with BPSK modulation of beamspace MIMO system and conventional MIMO system

그림 5의 경우 빔 공간 MIMO 시스템에서 BPSK 변조를 사용하여 ML 방식으로 판정하였을 경우의 성능을 나타낸다. 기존의 MIMO 시스템은 각각의 데이터 심볼이 각각의 안테나를 통해 송신된다. 그러나 빔 공간 MIMO 시스템의 경우 하나의 데이터 심볼은 능동 소자에 인가하며 나머지 데이터 심볼은 그에 해당하는 리액턴스 값을 변화시켜 빔 패턴을 형성하여 송신한다. 따라서 기존의 MIMO 시스템의 경우 2개의 RF 체인을 사용하는 2개의 안테나를 통해 두 신호를 동시에 송신하고 빔 공간 MIMO 시스템의 경우 1개의 RF 체인을 사용하는 1개의 능동 소자를 이용하여 신호를 다른 빔 공간으로 송신하므로 두 시스템이 다중 스트림 통신을 지원하지만 두 시스템의 통신 방식이 다르기 때문에 성능이 완벽하게 동일할 수는 없다. 하지만 다중 스트림을 지원하며 유사한 성능 특성을 나타내는 것을 확인할 수 있다. 빔 공간 MIMO 시스템은 18dB에서  $10^{-4}$ 의 성능을 낸다.

그림 6에서는 빔 공간 MIMO 시스템의 BPSK 변조를 사용했을 경우와 QPSK 변조를 사용했을 경우의 성능을 나타낸다. 빔 공간 MIMO 시스템에서 BPSK 변조의 경우 12dB에서  $10^{-3}$ 의 성능을 내고, QPSK 변조의 경우 16.5dB에서  $10^{-3}$ 의 성능을 낸다.

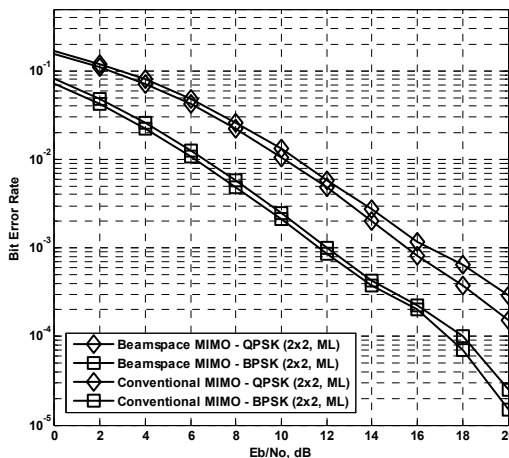


그림 6. 빔 공간 MIMO 시스템에서 QPSK 변조를 사용하였을 때 성능  
Fig. 6. BER performance of beamspace MIMO system using QPSK modulation

$10^{-3}$ 의 성능을 내는데 4.5dB의 차이가 난다. 빔 공간 MIMO 시스템의 경우 더 높은 위상 편이 변조를 적용할수록 직교 기저 패턴과 데이터 심볼

의 선형 결합으로 만들어지는 빔 패턴의 수가 더 많이 형성되게 되고 한 정된 빔 공간을 더 많은 빔 패턴이 분할하므로 높은 위상 편이 변조를 사용할 수록 성능이 감소되는 것을 확인할 수 있다.

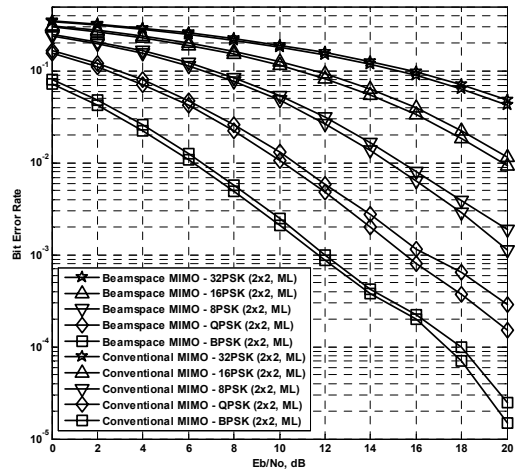


그림 7. 빔 공간 MIMO 시스템에서 8PSK, 16PSK, 32PSK 변조를 사용하였을 때 성능  
Fig. 7. BER performance of beamspace MIMO system according to 8PSK, 16PSK and 32PSK modulation

그림 7은 빔 공간 MIMO 시스템에서 8PSK, 16PSK 그리고 32PSK 변조를 사용하였을 때의 성능을 나타낸다. 그림 6과 같이 더 높은 위상 편이 변조를 사용할 경우 성능이 감소되는 것을 확인할 수 있다. 빔 공간 MIMO 시스템의 경우 8PSK 변조를 사용할 경우 15.5dB에서  $10^{-2}$ 의 성능을 낸다. 16PSK 변조를 사용할 경우 20dB 근처에서  $10^{-2}$ 의 성능을 내는 것을 확인할 수 있다. 8PSK와 16PSK 변조에서  $10^{-2}$ 의 성능을 내는데 약 4.5dB의 차이가 나는 것을 확인할 수 있다. 마지막으로 32PSK 변조를 사용할 경우 16dB에서  $10^{-1}$ 의 성능을 내는 것을 확인할 수 있다.

### V. 결 론

기존의 배열 안테나를 사용하는 MIMO 시스템과 비교하여 단일 RF chain을 사용하는 ESPAR 안테나를 사용하여 빔 공간 MIMO 시스템을 구성할 수 있음을 확인하였고, 각 위상 편이 변조에 따른 성능을 확인하였다. 빔 공간 MIMO 시스템은 더 높은 속도를 지원하기 위해 안테나 소자를 확장하더라도 RF chain을 사용하는 능동 소자는 1개를 사용하기

때문에 복잡도가 크게 증가하지 않는다. 빔 공간 MIMO 시스템에서 BPSK 변조를 사용했을 경우 18dB에서  $10^{-4}$ 의 성능을 내며 기존의 MIMO 시스템과 유사한 성능을 낸다. BPSK, QPSK, 8PSK, 16PSK 그리고 32PSK의 고차 변조를 사용한 시스템의 성능을 분석한 결과, 저 복잡도와 저 전력소비 특성을 갖는 빔 공간 MIMO 시스템이 기존 신호도메인의 MIMO 시스템과 유사한 성능 특성이 나타나는 것을 확인하였다.

### References

[1] V. Barousis, A. G. Kanatas, and A. Kalis, "Single RF MIMO systems: exploiting the capabilities of parasitic antennas," in *Proc. IEEE Veh. Technol. Conf. (VTC Fall)*, pp. 1-5, San Francisco, U.S.A., Sep. 2011.

[2] 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 19th Int. Symp. Personal, Indoor, Mobile Radio Commun. (PIMRC 2008)*, pp. 1-5, Cannes, France, Sep. 2008.

[3] A. Kalis, A. G. Kanatas, and C. Papadias, "An ESPAR antenna for beamspace-MIMO systems using PSK modulation schemes," in *Proc. IEEE Int. Conf. Commun. (ICC '07)*, pp. 5348-5353, Glasgow, U. K., June 2007.

[4] A. Kalis, A. G. Kanatas, and C. Papadias, "A novel approach to MIMO transmission using a single RF front end," *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 26, no. 6, pp. 972-980, Aug. 2008.

[5] J. Lu, D. Ireland, and R. Schlub, "Development of ESPAR antenna array using numerical modelling techniques," in *Proc. 3rd Int. Conf. Computational Electromagn. Its Applicat. (ICCEA)*, pp. 182-185, Beijing, China, Nov. 2004.

[6] T. Ohira and K. Gyoda, "Electronically steerable passive array radiator antennas for low-cost analog adaptive beamforming," in *Proc. IEEE Int. Conf. Phased Array Syst.*

*Technol.*, pp. 101-104, Dana Point, U.S.A., May 2000.

[7] V. Barousis, A. G. Kanatas, A. Kalis, and C. B. Papadias, "Closed-loop beamspace MIMO systems with low hardware complexity," in *Proc. IEEE Veh. Technol. Conf (VTC Spring 2009)*, pp. 1-5, Barcelona, Spain, Apr. 2009.

[8] H.-G. Jeon, J. Bae, and D. Lee, "Prior maximum likelihood detection verifier design in MIMO receivers," *J. Korean Inst. Commun. Inform. Sci. (KICS)*, vol. 33, no. 11, pp. 1063-1071, June 2008.

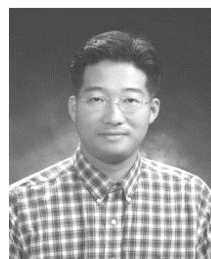
[9] O. N. Alrabadi, J. Perruisseau-Carrier, and A. Kalis, "MIMO transmission using a single RF source: theory and antenna design," *IEEE Trans. Antennas Propag.*, vol. 60, no. 2, pp. 654-664, Feb. 2012.

### 안창영 (Changyoung An)



2013년 2월 충북대학교 전자공학과(공학사)  
 2013년 3월~현재 충북대학교 전자공학과 석사과정  
 <관심분야> 무선통신시스템, 신호처리

### 이승환 (Seung Hwan Lee)



1995년 2월 고려대학교 전자공학과 (공학사)  
 1997년 2월 고려대학교 전자공학과 (공학석사)  
 2007년 2월 University of Edinburgh (공학박사)  
 2001~현재 한국전자통신연구원

원 무선간섭인지연구팀팀장  
 2010년~현재 과학기술연합대학원대학교 교수  
 <관심분야> Small cell networks, Compact MIMO, Cognitive Radio

**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 한국전자과학회 학술상 수상

2008년 ICWMC 2008 국제학술대회 “Best Paper  
Award” 수상

2009년 SPACOMM 2009 국제학술대회 “Best  
Paper Award” 수상

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