

## 빔공간 MIMO 시스템에 기반한 OFDM 전송방법

최진규\*, 안창영\*, 유흥균<sup>o</sup>

## OFDM Transmission Method Based on the Beam-Space MIMO System

Jinkyu Choi\*, Changyoung An\*, Heung-Gyoon Ryu<sup>o</sup>

## 요약

빔 공간 Multiple-Input Multiple Output(MIMO) 시스템은 단일 Radio Frequency(RF)-체인을 가지는 Electronically Steerable Parasitic Array Radiator(ESPAR) 안테나를 이용하여 다수의 데이터를 동시에 전송할 수 있는 시스템이다. 단일 안테나, 단일 RF-체인을 사용하는 ESPAR 안테나의 특성에 의해 빔 공간 MIMO 시스템은 기존 MIMO 시스템에 비해 시스템의 복잡도가 줄어들고 안테나의 소형화가 가능하다. 기존에는 빔 공간 MIMO 시스템을 사용하여 단일 반송파를 전송하는 연구만이 진행되었다. 따라서 본 논문에서는 다중 반송파를 전송하기 위해 Orthogonal Frequency Division Multiplexing(OFDM) 기반의 빔 공간 MIMO 시스템을 제안하고 성능을 분석하였다. 제안하는 빔 공간 MIMO 시스템은 기생소자의 리액턴스 값에 의해 Bit Error Rate(BER) 성능이 변화하기 때문에 최적의 성능을 가지는 리액턴스 값을 찾고, 이때의 BER 성능이 기존의 MIMO OFDM 시스템의 성능과 유사한 것을 확인하였다.

**Key Words** : Beam-space MIMO, OFDM, ESPAR Antenna, Single RF-Chain, Parasitic Element

## ABSTRACT

Beam-space Multiple-Input Multiple Output(MIMO) system can transmit multiple data by using Electronically Steerable Parasitic Array Radiator(ESPAR) antenna which has single Radio Frequency(RF)-chain. Beam-space MIMO system can reduce complexity of the system and size of antenna in comparison with the conventional MIMO system because of characteristic of ESPAR antenna using the single antenna and the RF-chain. Heretofore, only the research of transmitting single-carrier has been conducted by the use of beam-space MIMO system. Therefore, in this paper, we propose beam-space MIMO system based on Orthogonal Frequency Division Multiplexing(OFDM) for transmitting the multi-carrier and analysis the performance of this system. We find a proper reactance value which has good performance because proposed system changes the performance by the reactance values of parasitic elements. and we confirm that performance of the proposed system is similar to conventional MIMO system based on OFDM.

※ 이 논문은 2012년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2012017339) 그리고 이 논문은 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No.2013R1A2A2A01005849) 그리고 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신기술진흥센터의 정보통신·방송 연구개발 사업의 일환으로 수행하였음(14-000-04-001, 고집적 Compact MIMO 안테나 개발).

♦ First Author : Smart Radio Research Team, Electronics and Telecommunications Research Institute, jkchoi@etri.re.kr, 정희원

° Corresponding Author : Department of electronics engineering, Chungbuk National University, ecomm@cbu.ac.kr, 정희원

\* Department of electronics engineering, Chungbuk National University, acy890217@naver.com, 학생회원

논문번호 : KICS2014-10-438, Received October 30, 2014; Revised March 2, 2015; Accepted March 2, 2015

## I. 서 론

현재 Multiple-Input Multiple Output(MIMO) 전송 기술은 모든 무선 통신 분야에서 사용되고 있다<sup>[1,2]</sup>. MIMO 전송 기술은 무선 통신 분야에서 채널 용량을 증가시킬 수 있는 좋은 성능을 가지고 있다. 그러나 이러한 시스템은 공간이 제한되는 단말에서 사용하기에는 어려움이 있다<sup>[3,4]</sup>.

공간이 제한되는 단말에서 MIMO 전송 기술을 사용하기 위해서 빔 공간 MIMO 전송 방식이 제안되었다<sup>[5]</sup>. 빔 공간 MIMO 전송 기술은 단일 RF 단을 가지는 Electronically Steerable Parasitic Array Radiator(ESPAR) 안테나를 사용하여 MIMO 전송이 가능하다. ESPAR 안테나는 Ohira 교수에 의해서 제안되었다<sup>[6]</sup>. 이 안테나는 단일 RF 단에 연결된 능동 안테나 소자와 가변 캐패시터가 연결된 다수의 기생 안테나 소자로 구성 되어 있다. ESPAR 안테나는 다수의 기생 안테나 소자에 달린 가변 캐패시터를 사용하여 빔을 형성 할 수 있다<sup>[7]</sup>. 빔 공간 MIMO 전송 기법은 ESPAR 안테나의 기저 패턴에 데이터를 맵핑시켜 전송함으로써 다중화 이득을 얻을 수 있다<sup>[8]</sup>.

참고 문헌 [9]에서는 3개의 소자를 가지는 ESPAR 안테나를 사용하여 빔 공간 MIMO 전송이 가능함을 실험적으로 증명하였다. 실험실 환경에서 빔 공간 MIMO 전송 방식은 일반적인 MIMO 전송 기법과 유사한 수신 Bit Error Rate(BER) 성능을 얻었다. 그러나 이러한 연구는 Binary Phase Shift Keying(BPSK) 변조에 제한되는 단점이 있다. 이를 해결하기 위해서 참고 문헌 [10]에서는 Phase Shift Keying(PSK) 변조가 가능한 빔 공간 MIMO 전송 기법에 대해서 제안하였다. PSK 변조를 하기 위해서는 빔 공간에서 서로 다른 빔을 형성 할 수 있도록 기생소자의 리액턴스 값을 변경시켜준다. 참고문헌 [10]에서는 16-PSK 변조에 따른 서로 다른 리액턴스 값을 어떻게 찾는지에 대해서 자세히 기술하였다. 하지만 이러한 연구 결과는 QAM 변조로 확장시키지 못하였다.

참고 논문 [11]에서는 Quadrature Amplitude Modulation(QAM) 신호를 빔 공간 MIMO 기법으로 전송하기 위해서는 부성 저항 회로가 필요함을 밝혔다. 이 부성 저항 회로를 사용하기 위해서는 임피던스 매칭 회로를 사용한다. 임피던스 매칭 회로를 사용하게 되면 안테나 크기가 증가하고 회로 설계가 복잡해 진다는 단점이 있지만, 빔 공간 MIMO 전송 기법은 기존 MIMO 전송 기법의 대체 가능성을 확인하였다.

이렇듯 빔 공간 MIMO 전송 기법에 대한 많은 연

구가 진행되었지만, 기존 연구들은 단일 반송파 전송 기반에 제한되며 다중 반송파 기반 빔 공간 MIMO 전송 기법에 대해서는 아직까지 연구되지 않았다. 따라서 본 논문에서는 다중 반송파 전송기반 빔 공간 MIMO 통신 시스템을 제안하고, 이에 따른 송수신기를 설계한다. 본 논문의 기여도는 빔 공간에서 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) 신호의 송수신을 가능케 하는 시스템 설계에 있다.

## II. 빔 공간 MIMO 시스템

빔 공간 MIMO 시스템은 서로 다른 데이터를 안테나 빔의 기저에 맵핑하여 동시에 데이터 전송을 할 수 있다. 안테나 기저에 데이터를 맵핑시키면 안테나의 방사 패턴이 변화하게 된다. 따라서 물리적으로는 기생소자의 리액턴스를 조절하여 안테나의 방사 패턴을 조절할 수 있다. 서로 다른 방사 패턴은 공간상에서 공간 자유도를 형성할 수 있다. 이러한 공간 자유도를 이용하여 빔 공간 MIMO 전송이 가능하다.

단일 능동 소자와 단일 기생 안테나 소자를 가지는 안테나의 전송 빔 패턴은 아래 수식과 같이 표현 할 수 있다<sup>[9]</sup>.

$$G_T(\varphi) = I_0 + I_1 e^{j\alpha \cos(\varphi)} + I_2 e^{j\alpha \cos(\varphi - \pi)}$$

$$= I_0 + (I_1 + I_2) \cos(j\alpha \cos(\varphi))$$

$$- j \frac{\phi_1}{\phi_2} (I_1 - I_2) \sin(j\alpha \cos(\varphi))$$
(1)

여기서  $I_m$ 은  $m$  번째 안테나 소자의 유도 전류를 나타내며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I = v_s (\mathbf{Z} + \mathbf{X})^{-1} u_0$$

$$\mathbf{Z} = \begin{bmatrix} Z_{00} & Z_{01} & Z_{02} \\ Z_{10} & Z_{11} & Z_{12} \\ Z_{20} & Z_{21} & Z_{22} \end{bmatrix}$$
(2)

$$\mathbf{X} = \text{diag}[R_0, jX_1, jX_2]$$

$$u_0 = [0 \ 0 \ 1]^T$$

식 (2)에서  $\mathbf{Z}$ 는 상호 임피던스 행렬을 나타내고, 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 빔 패턴이 변화하게 된다. 또한, 여기서  $R_0$ 는 일반적으로  $50\Omega$ 이 된다. 그리고  $a = 2\pi d/\lambda$ 를 나타내며,  $\lambda$ 는 파장,  $d$ 는 인접 안테나 소자 간 거리를 나타낸다.  $\cos$  과  $\sin$  항은 서로 직교 하므로, 안테나의 두 개의 기저 패턴( $\phi_1, \phi_2$ )은 서로 직교한다. 두 기저 패턴에 서로 다른 데이터를 맵핑시켜 전송하려면 그림 1과 같은 송신기 구성도가 필요하다.

그림 1과 같이 두 개의 BPSK 신호가 전송되면, 첫 번째 데이터 스트림은 단일 RF 체인을 통해서 전송된다. 또한, 첫 번째 데이터 스트림과 두 번째 데이터 스트림의 XOR 연산에 의해서 전송 빔 패턴이 결정된다<sup>[9]</sup>. 이러한 방법으로 빔 공간 MIMO 전송 기법은 단일 RF 체인만을 가지고도 서로 다른 두 데이터를 동시에 전송할 수 있다.

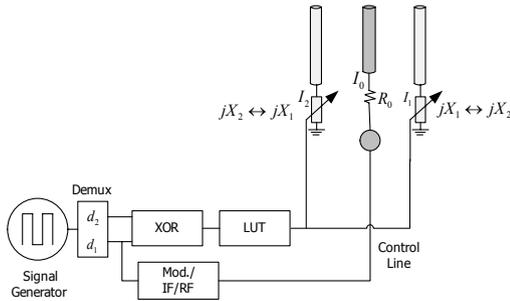


그림 1. 2X2 빔 공간 MIMO 시스템의 블록도.  
Fig. 1. Block diagram of 2X2 Beamspace MIMO system.

### III. OFDM 기반의 빔 공간 MIMO 시스템

본 장에서는 OFDM 기반 빔 공간 MIMO 전송 기법에 대해서 제안한다. 이 때 OFDM 기반 빔 공간 MIMO 전송 시스템의 개념도는 그림 2와 같다. 그림 2는 단일 RF 체인과 두 개의 기생소자를 사용한 빔 공간 MIMO 전송 개념을 생각한다.

$M-1$ 개의 기생 안테나 소자를 가지는 안테나의 전송 빔 패턴은 아래 수식과 같이 표현 할 수 있다.

$$G_T(\varphi) = \sum_{n=0}^{M-1} w_n \phi_n(\varphi) \quad (3)$$

여기서,  $\phi_n$ 은 각 안테나의 기저 패턴을 의미한다.  $w_n$ 은 안테나 기저에 맵핑되는 데이터를 의미한다.

단일 RF 체인과 두개의 기생 안테나 소자를 가지는 안테나( $M=2$ )의 방사 패턴은 아래 수식으로 표현할

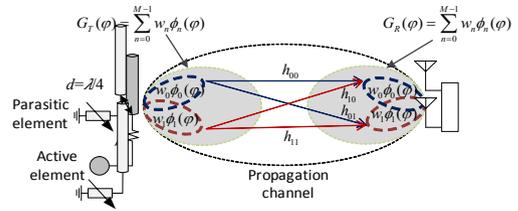


그림 2. 2X2 ESPAR 안테나를 통한 OFDM 기반의 MIMO 시스템의 개념도.  
Fig. 2. The proposed concept of MIMO based on OFDM over ESPAR antenna.

수 있다.

$$\begin{aligned} G_T(\varphi) &= \sum_{n=0}^1 w_n \phi_n(\varphi) \\ &= w_0 \phi_0(\varphi) + w_1 \phi_1(\varphi) \\ &= w_0 (\phi_0(\varphi) + \frac{w_1}{w_0} \phi_1(\varphi)) \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)에서 두 개의 기저 패턴  $\phi_0(\varphi), \phi_1(\varphi)$ 은 식 (1)의 기저 패턴  $\phi_1(\varphi), \phi_2(\varphi)$ 과 동일하다. 위 수식을 살펴보면  $w_0$ 는 단일 RF 체인을 통해 전송되는 데이터를 나타낸다.  $w_1/w_0$ 의 관계에 의해서 빔 공간 MIMO의 전송 빔 패턴이 결정된다. OFDM 기반 빔 공간 MIMO 전송을 하기 위해 OFDM 신호를 살펴본다.  $N$ 개의 부반송파를 가지는 OFDM 신호의 출력신호  $x(n)$ 은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$x(n) = \sum_{k=0}^{N-1} x_{1,k} e^{j \frac{2\pi}{N} kn}, \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad (5)$$

여기서  $x_{1,k}$ 는 첫 번째 데이터 스트림의 변조된 정보 신호이다. OFDM 신호는 단일 RF 체인을 통해서 전송된다. OFDM 신호의 전송 빔 패턴은 두 전송 데이터 신호의 관계로 결정된다. 따라서 최종 전송되는 신호의 빔 패턴은 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$G_T(\varphi) = x_n(\phi_0(\varphi) + \frac{x_{2,k}}{x_{1,k}} \phi_1(\varphi)) \quad (6)$$

여기서  $x_{1,k}$ 와  $x_{2,k}$ 는 반송파 주파수 영역에서 두 데이터 스트림이다.

그림 3은 OFDM 기반 빔 공간 MIMO 전송을 위한 시스템 블록도이다. 첫 번째 데이터 스트림인  $x_{1,k}$

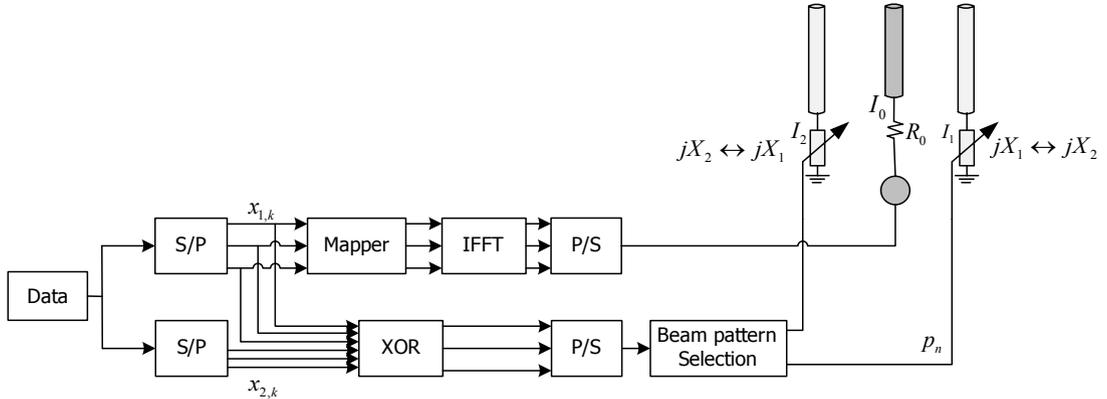


그림 3. OFDM 기반 빔 공간 MIMO 시스템 송신기 블록도.  
Fig. 3. Block diagram of beamspace MIMO system transmitter based on OFDM.

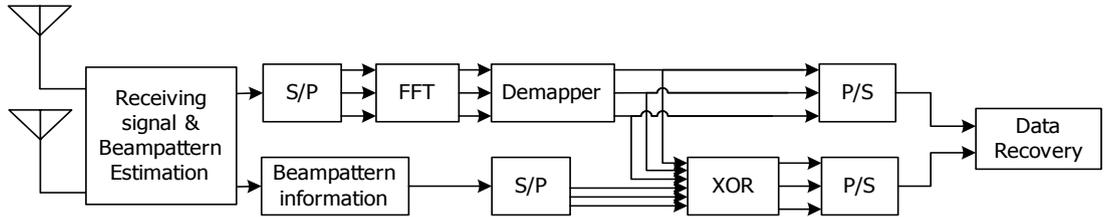


그림 4. OFDM 기반 빔 공간 MIMO 시스템 수신기 블록도.  
Fig. 4. Block diagram of beamspace MIMO system receiver based on OFDM.

는 Inverse Fast Fourier Transform(IFFT) 과정을 거친 후 단일 RF 체인을 통해서 전송된다. 첫 번째 데이터 스트림과 두 번째 데이터 스트림인  $x_{1,k}$ 와  $x_{2,k}$ 의 XOR 연산을 통해서 빔 패턴을 결정한다.

$$p_n = p_{k+1} = (x_{1,k} \oplus x_{2,k}), 0 \leq k \leq N-1 \quad (7)$$

전송 데이터 신호가 BPSK 신호라고 가정하면, 전송 가능한 빔 패턴은 두 가지가 된다<sup>[10]</sup>. 송신기는 송신 빔 패턴을 변경 하면서 OFDM 데이터를 전송한다.

그림 4는 BPSK 전송을 할 경우 OFDM 기반 빔 공간 MIMO 시스템의 수신기 블록도를 나타낸다. 본 논문에서는 선형 배열 안테나를 사용하였다.

표 1은 OFDM 기반 빔 공간 MIMO 시스템의 빔 패턴과 전송 심볼을 나타낸다.

OFDM 변조 신호는 단일 안테나를 통해서 서로 다른 빔 공간으로 전송된다. 송신 신호는 MIMO 채널을 통과하며 이를 선형 배열 안테나를 이용하여 수신한다. 이 때, 채널은 다음과 같이 모델링이 가능하다.

$$H_{bs} = \Phi_R^H(\varphi) H_b \Phi_T(\varphi) \quad (8)$$

표 1. 입력 비트 별 빔 패턴과 전송 심볼  
Table 1. Beam pattern and transmitted symbol by input bits

Input Bits	Pattern Number	Transmit Symbol
[0 0]	0	-1
[0 1]	0	1
[1 1]	1	1
[1 0]	1	-1

여기서  $\Phi_T(\varphi) = [\phi_1(\varphi) \phi_2(\varphi)]$ ,  $H_b$  는 MIMO 채널,  $\Phi_R = \Phi_T$ 을 의미한다<sup>[12]</sup>.

#### IV. 시뮬레이션 및 분석

본 논문에서는 3개의 요소를 가지는 ESPAR 안테나를 통해 OFDM 기반의 빔 공간 MIMO 시스템을 설계하고 BER 성능을 분석하였다. 표 2는 시뮬레이션에서 사용한 변수를 나타낸 표로서, 변조 방식은 OFDM을 사용하였고, ESPAR 안테나의 소자 수는 3개로 하였다. 능동소자와 기생소자간 거리는  $\lambda/4$ 로

표 2. 시뮬레이션 변수  
Table 2. Simulation parameters

Parameters	Values
Modulation	OFDM
# of antenna elements	3
Inter-element distance	$\lambda/4$
Detection rule	ML detection
Reactance [ $\Omega$ ]	$jX_1 = -j54, jX_2 = j26$

하였으며, 검출 방식은 Maximum-Likelihood(ML) 검출 방식으로 진행하였다.

그림 5는 리액턴스를  $jX_1 = -j54, jX_2 = j26$  값을 사용했을 때의 ESPAR 안테나의 직교기저를 나타낸 것이다. 실선은  $\phi_1(\varphi)$ 을 나타내고 점선은  $\phi_2(\varphi)$ 를 나타낸다. 이 그림을 통해 두 기저의 전력이 균형이 맞는 것을 알 수 있다.

그림 6은  $jX_1 = -j54, jX_2 = j26$ 의 리액턴스를 사용하고 그림 5의 직교기저를 가질 때의 BER 성능을 나타낸다. □ 부호의 그래프는 다수의 RF 체인과 기존의 선형 배열 안테나를 사용하는 기존의 OFDM 기반 MIMO 시스템의 BER 성능을 나타내고, X 부호의 그래프는 새롭게 제안하는 단일 RF 체인 구조의 ESPAR 안테나를 사용하여 설계한 OFDM 기반의 빔공간 MIMO 시스템의 BER 성능을 나타낸다. 즉, ESPAR 안테나를 사용하는 빔 공간 MIMO 시스템에서 기존의 단일 반송파가 아닌 OFDM 변조를 사용할 수 있도록 하는 새로운 방식의 제안하는 시스템의 성능을 나타낸다. 이 때, 빔 공간 MIMO 시스템의 채널은  $H_{bs} = \Phi_R^H(\varphi)H_b\Phi_T(\varphi)$ 로 하였다. 그림 6에서 제안하는 OFDM 기반 빔 공간 MIMO 시스템의 성능이 기존의 선형 배열 안테나를 사용하는 OFDM 기반

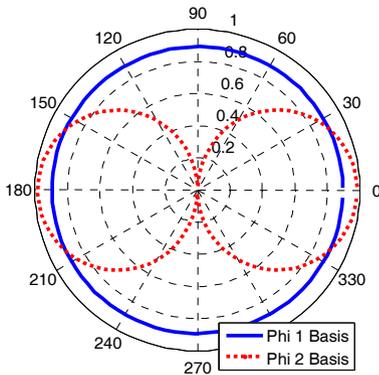


그림 5. ESPAR 안테나의 직교기저.  
Fig. 5. The orthogonal basis of ESPAR antenna.

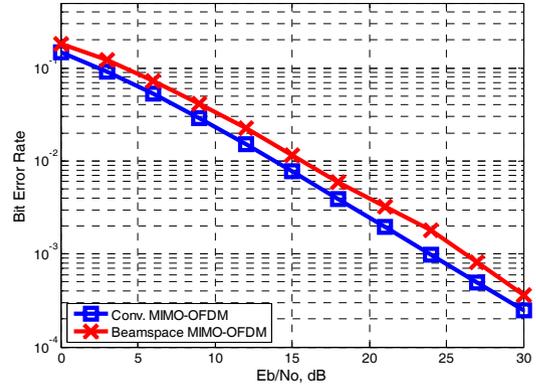


그림 6. 기존 MIMO 시스템과 빔 공간 MIMO 시스템의 BER 성능비교  
Fig. 6. BER performance between conventional MIMO and beamspace MIMO system.

MIMO 시스템에 비하여 약 3dB 열화 되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 이유는 제안하는 시스템에서 능동 소자로 인가되는 OFDM 신호는 단일 반송파 시스템에 비하여 Peak to Average Power Ratio(PAPR)이 크기 때문에 크기가 매우 작은 신호가 방사될 수도 있고 크기가 매우 큰 신호가 방사될 수도 있다. 여기에서 크기가 작은 신호가 안테나를 통해 방사될 경우 수신기에서 어떤 빔 공간을 통해서 수신기에 도달했는지 추정하기가 매우 어렵기 때문에 수신기에서 신호가 통과한 빔 공간 판정에 실패하여 시스템의 성능 열화가 발생할 수 있다. 즉, 빔 공간 MIMO 시스템의 경우 능동 소자를 통해 송신되는 신호뿐만 아니라 신호가 통과한 빔 공간의 특성 또한 판별할 수 있어야 다중 스트림을 전송할 수 있다. 제안하는 시스템은 다음과 같이 해결해야 할 점이 존재하지만, 단일 RF 체인

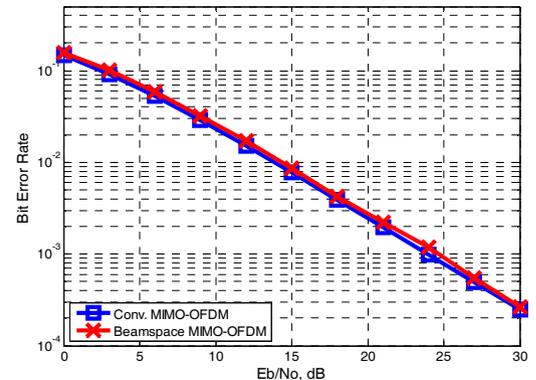


그림 7. 기존 MIMO 시스템과 빔 공간 MIMO 시스템의 BER 성능비교  
Fig. 7. BER performance between conventional MIMO and beamspace MIMO system.

을 이용하여 다수의 OFDM 스트림을 동시에 전송한다는 것이 큰 장점으로, 이러한 구조를 이용할 경우 전력 소비와 시스템의 폼팩터를 소형화 할 수 있는 장점이 있다.

그림 7은 그림 6과 같은 리액턴스를 사용하고 빔 공간 MIMO의 채널을  $\mathbf{H}_{bs} = \mathbf{1} \cdot \mathbf{H}_b \Phi_T(\varphi)$ 로 하여 수신단을 균일하게 모두 수신한다고 가정하였을 때의 기존 OFDM 기반의 MIMO 시스템과 OFDM 기반의 빔 공간 MIMO 시스템의 BER 성능을 비교한 것이다. 그림 6에 비해  $\Phi_R$ 이 증가함으로써 인해 BER 성능이 기존 OFDM 기반 MIMO 시스템과 더 유사한 것을 알 수 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 기존 단일 반송과 기반의 빔 공간 MIMO 시스템에서 나아가 다중 반송과 환경을 고려하기 위해 OFDM 기반의 빔 공간 MIMO 시스템을 제안하고 성능을 확인하였다.

빔 공간 MIMO 시스템의 경우 빔 패턴을 통해 데이터를 구별하기 때문에 빔을 결정하는 리액턴스의 역할이 매우 중요하다. 따라서 적절한 리액턴스를 정하지 않으면 BER 성능이 매우 열화되고, 이를 위해 적절한 리액턴스를 찾는 작업을 필요로 하게 된다. 따라서 성능 열화를 막기 위해 적절한 리액턴스 값을 찾고, 적절한 리액턴스를 사용하였을 때의 BER 성능을 확인하였다. 또한, 빔 공간 MIMO의 채널환경에 따라서도 BER 성능을 확인하였다.

## References

[1] L. Zheng and D. N. C. Tse, "Diversity and multiplexing: A fundamental tradeoff in multiple-antenna channels," *IEEE Trans. Inf. Theory*, vol. 49, no. 5, pp. 1073-1096, May 2003.

[2] A. Goldsmith, S. A. Jafar, N. Jindal, and S. Vishwanath, "Capacity limits of MIMO channels," *IEEE J. Selected Areas in Commun.*, vol. 21, no. 5, pp. 684-702, Jun. 2003.

[3] D. W. Browne, M. Manteghi, M. P. Fitz, and Y. Rahmat-Samii, "Experiments with compact antenna arrays for MIMO radio

communications," *IEEE Trans. Antennas and Propag.*, vol. 54, no. 11, pp. 3239-3250, Nov. 2006.

- [4] C.-Y. Chiu and R. D. Murch, "Compact four-port antenna suitable for portable MIMO devices," *IEEE, Antennas and Wirel. Propag. Lett.*, vol. 7, pp. 142-144, 2008.
- [5] A. Kalis and C. Papadidas, "An ESPAR antenna for beam-space-MIMO systems using PSK modulation schemes," *IEEE Int. Conf. Commun.*, pp. 5348-5353, Jun. 2007.
- [6] H. Kawakami and T. Ohira, "Electrically steerable passive array radiator (ESPAR) antennas," *IEEE Antennas and Propag. Mag.*, vol. 47, no. 2, pp. 43-50, Apr. 2005.
- [7] R. Schlub, Lu Junwei, and T. Ohira, "Seven-element ground skirt monopole ESPAR antenna design from a genetic algorithm and the finite element method," *IEEE Trans. Antennas and Propag.*, vol. 51, no. 11, pp. 3033-3039, Nov. 2003.
- [8] V. Barousis, A. G. Kanatas, A. Kalis, and C. Papadidas, "A limited feedback technique for beam-space MIMO systems with single RF front-end," *IEEE 19th Int. Symp. Personal Indoor and Mob. Radio Commun.*, pp. 1-5, Sept. 2008.
- [9] O. N. Alrabadi, C. B. Papadidas, 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] O. N. Alrabadi, C. B. Papadidas, A. Kalis, and R. Prasad, "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.
- [11] B. Han, V. I. Barousis, C. B. Papadidas, A. Kalis, and R. Prasad, "MIMO over ESPAR with 16-QAM Modulation," *IEEE Wirel. Commun. Lett.*, vol. 2, no. 6, pp. 687-690, Dec. 2013.
- [12] R. Mesleh, H. Haas, C. W. Ahn, and S. Yun, "Spatial modulation: A new low-complexity

spectral efficiency enhancing technique,” in *Proc. China-Com*, pp. 1-5. Oct. 2006.

**최진규 (Jinkyu Choi)**



1999년 : 한양대학교 전자공학과 학사  
2001년 : 한양대학교 전파통신 전자공학과 석사.  
2001년~현재 : 한국전자통신연구원 선임연구원.

<관심분야> MIMO-OFDM, digital RF transceiver, SDR, CR

**유흥균 (Heung-Gyoon Ryu)**



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

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

**안창영 (Changyoung An)**



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