DBpia

논문 14-39A-02-01

한국통신학회논문지(J-KICS) '14-02 Vol.39A No.02
http://dx.doi.org/10.7840/kics.2014.39A.2.69

확장 13-Element EPSAR 안테나를 사용한 7x7 MIMO 시스템

복 준 영◆, 이 승 환*, 유 흥 균°

7x7 MIMO System Using Extended 13-Element ESPAR Antenna

Junyeong Bok◆, Seung Hwan Lee*, Heung-Gyoon Ryu°

요 약

MIMO 시스템은 통신 시스템의 채널 용량을 증가시키기 위해서 다양한 분야에서 사용된다. 그러나 이러한 통신 시스템은 다수의 RF 단을 필요로 하기 때문에 안테나 소형화에 문제가 있다. 게다가 다수의 RF 단으로 인하여 아날로그 회로에서의 전력 소모가 증가하고, RF 단의 간섭으로 인하여 통신 효율이 심각하게 저하된다. 이러한 이유 때문에 단일 RF 단을 가지면서도 MIMO 통신이 가능한 BS-MIMO 통신 방식이 제안되었다. BS-MIMO 시스템은 기본적으로 ESPAR 안테나를 사용한다. 기존의 ESPAR 안테나는 5-element 구조를 가지고 있으며, 3x3 MIMO 전송 까지만 가능하다. 그러므로 MIMO 차원을 확장시키기 위해서는 ESPAR 안테나의 구조 확장이 필수적이다. 본 논문에서는 단일 원 형태의 ESPAR 안테나의 구조 확장을 통해서 BS-MIMO 의 차원을 기존 MIMO 기술처럼 증가시킬 수 있음을 보였다. 설계의 예로써, 13-ESPAR 안테나를 사용하면 7x7 BS-MIMO 전송이 가능함을 보였다. 또한 기생 배열안테나의 수가 2개씩 증가할수록 전송 가능한 MIMO 차원이 일씩 증가한다.

Key Words : BS-MIMO, ESPAR antenna, single RF chain, pattern modulation, MIMO

ABSTRACT

Multiple-input and multiple-output (MIMO) technique is used in many communication fields in order to increase the channel capacity. However, this MIMO system has difficulty of miniaturization of antenna size due to the multiple RF chains Also, multiple RF chain raises some problems which increase power consumption at RF circuit and degrade the system performance due to the interference between RF chains. Because of these reasons, beamspace MIMO (BS-MIMO) technique with only single RF chain was proposed for MIMO transmission. This BS-MIMO system basically uses electronically steerable parasitic array radiator (ESPAR) antenna. Existing ESPAR antenna has a 5-element structure. So, it is possible to do only 3X3 MIMO transmission. Therefore, in order to extend BS-MIMO dimension, extension of ESPAR antenna structure is essential. In this paper, we show that BS-MIMO dimension can be increased according to the extension of structure of the ESPAR antenna, as in the conventional MIMO techniques. For example, we show that it is possible to design the 7x7 BS-MIMO transmissions with the 13-element ESPAR antenna. Also, when the number of parasitic elements of ESPAR antenna increases by two elements, MIMO dimension is expanded by 1.

※ 이 논문은 미래창조과학부가 지원한 2013년 정보통신·방송(ICT) 연구개발사업의 연구결과로 수행되었음 (단말 안테나 고집적을 위한 Compact MIMO 기술 개발), 그리고 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임 (No.2013R1A2A2A01005849).

◆ First Author : 충북대학교 전자공학과, bjy84@nate.com, 학생회원
° Corresponding Author : 충북대학교 전자공학과, ecomm@cbu.ac.kr, 정회원
* 한국전자통신연구원, lsh@etri.re.kr

논문번호 : KICS2013-11-497, 접수일자 : 2013년 11월 15일, 심사일자 : 2014년 1월 5일, 최종논문접수일자 : 2014년 1월 20일

www.dbpia.co.kr

Ⅰ. 서 론

MIMO 시스템은 미래의 고속 데이터 통신을 위해서 높은 스펙트럼 효율과 에너지 효율, 다이버시티 이득을 얻을 수 있는 진보된 기술이다[1]. 이러한 이점으로 인하여, MIMO 기술은 WLAN, V2V, M2M, 위성통신, 4G 등 거의 모든 무선통신의 다양한 분야에서 사용 되고 있다. 또한, Massive MIMO 기술로써 확대되어 가고 있다[2-3]. 이처럼 MIMO 시스템은 현재 광범위하게 사용 되고 있다. 초고속 통신을 위한 기존 MIMO 시스템은 다수의 안테나와 RF단을 사용한다. 따라서 RF단이 매우 복잡하며 높은 전력 소모, RF단 사이의 높은 커플링등의 문제로 인하여 MIMO 성능이 저하된다. 특히, 능동 안테나간 거리가 $\lambda/2$ 보다 줄어들면 안테나 간 상관도가 급격히 증가하여 통신 성능이 심각하게 열화 된다. 게다가, 다수의 RF 단으로 인하여 다수의 배열 안테나를 사용한 MIMO 시스템은 일반적인 통신 시스템에서 사용하는 안테나보다 큰 크기를 가진다.

다수의 RF 단을 사용하는 기존 MIMO 시스템의 문제를 해결하기 위해서 많은 연구가 진행 되고 있다. 첫 번째로, 다수의 안테나 간 커플링을 줄이는 많은 연구가 진행되었다. Mutual coupling 을 줄이기 위해서 decoupling 방법과 매칭 방식이 있다[4]. 그러나 이러한 매칭 회로 설계는 커플링을 줄일 수 있으나 그 설계가 어렵고 안테나 통신 대역에 악영향을 준다[5]. 두 번째로, 다수의 RF 단을 줄이기 위해서 TDD 방식의 MIMO 시스템[6]과 SM 변조 방법 등이 연구 되었다[7]. 고속 스위치를 사용하는 TDD 방식의 MIMO 시스템은 단일 RF 체인으로도 MIMO 전송이 가능하다. 하지만 이러한 방식을 위해서는 고속 스위치인 ADC, DAC 가 필요하다. 고속 ADC를 만들기 위해서는 그 비용이 비싸며, 안테나 수가 증가 할수록 선형적으로 ADC 속도가 증가하기 때문에, 구현에 한계가 있다. SM 변조 방식도 단일 RF 체인만을 사용하여 데이터를 전송 할 수 있으며, MIMO 전송 방식에 비해서 복잡도를 급격히 줄일 수 있지만, 채널 전송 용량이 줄어드는 단점이 있다. 마지막으로, 안테나의 사이즈를 줄이면서도 MIMO 전송이 가능하도록 하는 방법이 연구 되었다[8]. 새로운Multi-mode antenna 시스템이 연구되었다. Multi-mode 안테나는 Directive angle- of-arrival 를 이용하여 다이버시티를 얻을 수 있는 기법이다. 이 시스템 모델은 동일한 조건에서의 Maxwell equations 의 다른 해결책이다. 이 방식은 다이버시티 이득을 얻기 위해서 각기 다른 모드로 수신 신호를 수신하여 결합한다. 그러나 이 방식 역시 수신 패턴이 불균형 하다는 문제점이 있다.

이러한 다수의 안테나를 사용하는 기존 MIMO 통신 방식의 문제점을 해결하기 위해서, BS-MIMO 통신 방식이 제안되었다[9]. BS-MIMO 시스템은 ESPAR 안테나를 사용하여 각각의 기저 패턴에 신호를 맵핑시켜 전송한다. BS-MIMO 전송을 위해서는 ESPAR 안테나를 이용하며, ESPAR 안테나는 중앙에 단일 능동 소자에 연결된 단일 RF 체인과 다수의 기생 소자를 가진다 [10]. 따라서 기존 MIMO 시스템에 비해서 안테나 간 커플링이 줄어들며 그로 인하여 안테나의 소형화가 가능하다. 기존 ESPAR 안테나는 주로 3, 5, 7 소자를 가지게 되기 때문에 BS-MIMO 시스템의 MIMO 차원이 제한적이다. 예를 들면 3-element ESPAR 안테나를 사용하여서는 2x2 BS-MIMO 전송이 가능할 뿐이다.

본 논문에서는 단일 원 형태의 ESPAR 안테나의 구조 확장을 통해서 BS-MIMO 의 차원을 기존 MIMO 기술처럼 증가 시킬 수 있음을 보였다. 그 한 가지 예로써, 기존 ESPAR 안테나를 13개의 소자로 확장한 13 Element ESPAR 안테나를 CST tool 을 이용하여 설계하고, 이를 이용한 7x7 BS-MIMO 통신 방식을 제안하였다. 제안한 방식은 ESPAR 안테나의 기생 배열 안테나가 2개씩 증가할 때 MIMO 차원이 증가한다. 제안된 방식을 사용하였을 경우, 다수의 안테나를 사용하는 기존 MIMO 시스템과 비교하여, 단일 안테나만을 사용한 BS-MIMO 시스템은 통신 채널 용량을 동일하게 유지하면서, 기존 다수의 안테나 시스템이 가지고 있는 문제점, 다수의 RF 체인으로 인한 높은 전력소모와 하드웨어 비용증가 문제를 해결할 수 있다. 또한, BS-MIMO 전송 기법이 기존 MIMO 전송 기법처럼 전송 신호 공간을 확장 시킬 수 있음을 보였다.

Ⅱ. BS-MIMO 전송 기법

2.1 ESPAR 안테나

본 장에서는 빔 공간 MIMO 전송 기법에 대해서 설명한다. 빔 공간 MIMO 전송기법은 ESPAR 안테나를 사용하여 각 기저에 데이터를 맵핑시켜 전송 한다.

3-element ESPAR 안테나는 그림 1과 같이 중앙에 단일 급전 능동 소자를 가지고 그 주위에 2개의 기생 배열 안테나를 가진다. 3-element ESPAR 안테나의 빔 패턴은 아래와 같이 표현한다.

www.dbpia.co.kr

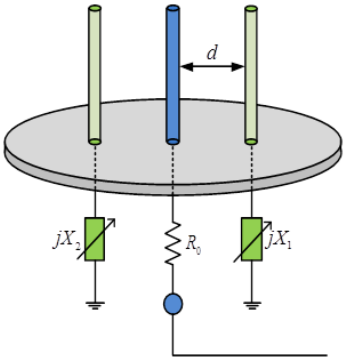


그림 1. 3개의 소자를 가지는 ESPAR 안테나.
Fig. 1. 3-element ESPAR antenna.

$$G(\theta)=\sum_{m=0}^{M-1} i_m^T \alpha_m^T(\theta) \tag{1}$$

위 수식에서 i_m는 m 번째 ESPAR 안테나의 유도 전류를 나타내고, $\alpha_m(\theta)$는 ESPAR 안테나의 조향 벡터를 나타낸다. ^{T}는 전치 행렬을 의미한다. 이때, 3-element ESPAR 안테나는 두개의 기생 안테나에 달린 리액턴스를 조절 하여서 빔을 형성 할 수 있다.

ESPAR 안테나의 유도 전류는 아래 수식과 같이 정의 된다.

$$i=v_s(Z+X)^{-1}u \tag{2}$$

여기서 X는 각 안테나의 리액턴스 값을 나타낸다. 단일 급전 능동 소자의 임피던스 값으로는 50옴이 사용된다. 따라서 $X=diag[50, jx_1,\cdots,jx_{M-1}]$의 값을 가진다. Z는 상호 임피던스 값이다. 상호 임피던스 값은 안테나 설계에 의해서 결정된다. $u=[1,0,\cdots,0]^T$ 의 값을 가진다.

2.2 2x2 BS-MIMO 전송

빔 공간 MIMO 시스템은 직교 기저 패턴을 사용하여 공간 다중화를 실현한다. 서로 직교 하는 빔의 기저에 서로 다른 데이터를 맵핑시켜 동시에 전송 할 수 있다. 빔 공간 MIMO 전송의 이해를 돕기 위해서 아래와 같은 MIMO 채널 환경을 정의 한다[12].

$$H=\sum_{i=1}^{L} b_i a_R(\theta_{R,i}) a_T^H(\theta_{T,i}) = A_R(\widehat{\theta_R}) H_b A_T^H(\widehat{\theta_T}) \tag{3}$$

위 식에서 L 은 빔 공간에서 송수신기 사이의 경로의 개수를 나타낸다. H_b 는 각 경로에 대한 복소 이득으로 b_i 로 구성된 LxL 대각 행렬이다. $A_T(\widehat{\theta_T})$와 $A_R(\widehat{\theta_R})$ 는 각각 송수신기의 조향 행렬이다. $\widehat{\theta_T}$ 와 $\widehat{\theta_R}$ 은 각각 신호의 송수신 각도에 대한 방향 벡터이다.

송신기에서 빔 공간 송신기를 사용하고, 수신기로 일반적인 선형 배열 안테나 수신기를 사용하게 되면 채널 행렬은 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$H=A_R(\widehat{\theta_R}) H_b B_T \tag{4}$$

위 수식에서 B_T는 $M_T \times L$ 크기의 행렬이고 각 행렬은 직교 기저 패턴의 L 표본을 포함한다. 빔 공간 송수신기를 사용하게 될 경우, 채널에 대한 위 수식은 아래와 같이 표현 할 수 있다.

$$H_{bs}=B_R^H H_b B_T \tag{5}$$

B_T 는 송신 빔 패턴을 나타내며, H_b 는 빔 공간의 채널 이득을 나타난다. B_R^H는 수신기에서의 수신 빔 패턴의 허미션을 나타낸다. 빔 공간에서의 채널은 송수신기의 직교 기저 패턴과 채널로 표현 할 수 있다. 빔 공간 MIMO 시스템의 수신신호를 수식으로 표현 하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} y &= H_{bs}x+n \\ &= B_R^H H_b B_T x+n \\ &= B_R^H H_b P_T^x(\widehat{\theta_T})+n \end{aligned} \tag{6}$$

식에서 $P_T^x(\widehat{\theta_T})=B_T x$로 전송 각에 대한 ESPAR 안테나의 방사 패턴을 나타낸다. 방사 패턴 샘플은 각각의 직교 기저 패턴의 선형 결합을 통해서 이루어진다.

$$P_T^x(\widehat{\theta_T})=[B_{T,1}(\widehat{\theta_T}),\cdots,B_{T,M_T}(\widehat{\theta_T})]\begin{bmatrix} x_1 \\ \vdots \\ x_{M_T} \end{bmatrix} \tag{7}$$

위 수식에서 $B_{T,k}(\hat{\theta})$는 M_T개의 직교 기저 패턴을 나타낸다 ($k=1,\cdots,M_T$). $X=[x_1,,x_{M_T}]^T$ 로 M_T개의 송신 데이터 심볼을 나타낸다. 빔 공간 MIMO 통신을 하기 위해 송신기에서는 먼저 직교 기저 패턴과 데이터 심볼의 선형 결합을 통해서 데이터를 전송한다. 3-element ESPAR 안테나의 빔패턴은 아래와 같은 수식으로 표현할 수 있다.

www.dbpia.co.kr

$$G(\theta) = i_0 + i_1 e^{j\psi\cos(\theta)} + i_2 e^{j\psi(\theta-\pi)} = \underbrace{i_0 + (i_1+i_2)\cos(\psi\cos(\theta))}_{B_{T1}} \underbrace{- j(i_1-i_2)\sin(\psi\cos(\theta))}_{B_{T2}} \quad (8)$$

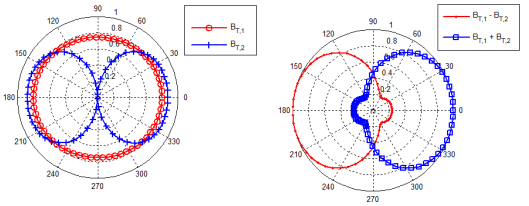
위 수식에서 $\psi = \frac{2\pi d}{\lambda}$이고, $i_{0,1,2}$ 는 각 안테나 소자에 유도 전류이며, d는 안테나 소자간 거리이다. λ 는 파장 길이를 나타낸다.

수식 (8)은 두 개의 기저 패턴을 포함하고 있다. 이 두 기저 패턴 $B_{T,1}$과 $B_{T,2}$는 서로 직교 관계에 있다[11]. 빔공간 MIMO 전송은 이 두 기저에 데이터 신호를 맵핑시켜 전송 한다. 예를 들어, BPSK 신호를 전송하게 되면 기생 안테나의 리액턴스 값을 서로 변경 시킨다. 만약 jx_1과 jx_2의 값을 서로 변경 시키면 기저 의 부호가 변경된다. 그림 2 (b)에서 형성된 빔 패턴과 같이 서로 다른 방향으로 빔 지향이 되게 된다. 이는, ESPAR 안테나를 사용하여 형성된 빔 패턴이 공간상에서 DoF(Degree of Freedom) 를 형성 하는 것을 보여준다.

각 기저에 두 데이터 신호 d_1,d_2를 맵핑시키면 아래 수식과 같이 표현 할 수 있다.

$$\begin{aligned} G_T(\theta) &= d_1 B_{T,1}(\theta) + d_2 B_{T,2}(\theta) \\ &= d_1 (B_{T,1}(\theta) + \frac{d_2}{d_1} B_{T,2}(\theta)) \\ &= d_1 (B_{T,1}(\theta) + (-1)^{d_1 \oplus d_2} B_{T,2}(\theta)) \end{aligned} \quad (9)$$

식 (9)를 확인 하면 ESPAR 안테나의 단일 급전 능동 소자를 통해서 데이터 d_1이 전송되고 빔의 패턴은 d_1 데이터와 d_2 데이터의 XOR 연산을 통해서 결정된다.



a)Two basis patterns (b)Two transmit beam patterns

그림 2. 두 기저 패턴과 빔 패턴.
Fig. 2. Two basis patterns and beam patterns

Ⅲ. 제안하는 MxM BS-MIMO 전송 기법

이전 장에서 3-element ESPAR 안테나를 사용한 2x2 BS-MIMO 전송 기법에 대해서 설명하였다. 본 장에서는 확장된 MxM 의 BS-MIMO 전송 기법에 대해서 제안한다. MxM BS-MIMO 전송을 위해서는 ESPAR 안테나의 구조 확장이 필요하다. 5-Element ESPAR 안테나를 사용해서는 3x3 MIMO 전송이 가능하다. 5-element ESPAR 안테나의 빔 패턴은 아래와 같은 수식으로 표현 할 수 있다.

$$G(\theta) = i_0 + i_1 e^{j\psi\cos(\theta)} + i_2 e^{j\psi(\theta-\frac{\pi}{2})} + i_3 e^{j\psi(\theta-\pi)} + i_4 e^{j\psi(\theta-\frac{3\pi}{2})} = \underbrace{i_0 + (i_1+i_2)\cos(\psi\cos(\theta)) + (i_3+i_4)\cos(\psi\sin(\theta))}_{B_{T1}} \underbrace{- j(i_1-i_2)\sin(\psi\cos(\theta))}_{B_{T2}} \underbrace{- j(i_3-i_4)\sin(\psi\cos(\theta))}_{B_{T3}} \quad (10)$$

식 (10)을 보면 세 가지 기저 패턴을 확인 할 수 있다. 이는 세 개의 기저 패턴에 동시에 서로 다른 신호를 맵핑시켜 전송이 가능함을 의미한다. 이때, 두 기저인 $B_{T,2}$ 과 $B_{T,3}$는 기생 안테나의 리액턴스 값을 서로 변화 시키면 전류가 변화되어 부호가 변경된다. 3X3 BS-MIMO 시스템을 아래 수식과 같이 표현 할 수 있다.

$$\begin{aligned} G_T(\theta) &= d_1 B_{T,1}(\theta) + d_2 B_{T,2}(\theta) + d_3 B_{T,3}(\theta) \\ &= d_1 (B_{T,1}(\theta) + \frac{d_2}{d_1} B_{T,2}(\theta) + \frac{d_3}{d_1} B_{T,3}(\theta)) \\ &= d_1 (B_{T,1}(\theta) + (-1)^{d_1 \oplus d_2} B_{T,2}(\theta) + (-1)^{d_1 \oplus d_3} B_{T,3}(\theta)) \end{aligned} \quad (11)$$

ESPAR 안테나의 단일 급전 능동 소자에 첫 번째 데이터 d_1이 인가되고, d_1 데이터와 다른 두 데이터 d_2, d_3의 XOR 연산을 통해서 3x3 MIMO 전송이 가능하다. 그림 3은 확장된 3x3 BS-MIMO 시스템 구성도와 기저 패턴을 나타낸다.

4x4 MIMO 전송을 하기 위해서는 7-element ESPAR 안테나가 사용된다. 7-Element ESPAR 안테나의 빔 패턴은 아래 수식과 같이 표현된다.

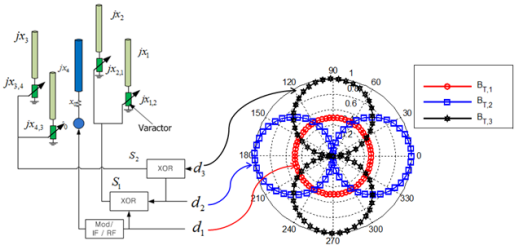


그림 3. 3x3 BS-MIMO 전송 기법과 기저 패턴.
Fig. 3. 3x3 BS-MIMO system and basis pattern.

www.dbpia.co.kr

$$
\begin{aligned}
G(\theta) = i_0 &+ (i_1+i_4)\cos(\psi\cos(\theta)) \\
&+ (i_2+i_5)\cos\left(\frac{\psi}{2}(\cos(\theta)+\sqrt{3}\sin(\theta))\right) \\
&+ \underbrace{(i_3+i_6)\cos\left(\frac{\psi}{2}(\sqrt{3}\cos(\theta)+\sin(\theta))\right)}_{B_{T1}} \\
&- j\underbrace{(i_1-i_4)\sin(\psi\cos(\theta))}_{B_{T2}} \\
&- j\underbrace{(i_2-i_5)\sin\left(\frac{\psi}{2}(\cos(\theta)+\sqrt{3}\sin(\theta))\right)}_{B_{T3}} \\
&- j\underbrace{(i_3-i_6)\sin\left(\frac{\psi}{2}(\sqrt{3}\cos(\theta)+\sin(\theta))\right)}_{B_{T4}}
\end{aligned} \tag{12}
$$

7-element ESPAR 안테나를 사용해서는 식 (13)과 같이 4개의 기저 패턴을 생성할 수 있다. 4가지의 기저 패턴에 데이터 신호를 맵핑시켜 전송이 가능하다. 첫 번째 데이터 d_1는 능동 소자를 통해서 전송되며 나머지 데이터$d_{2,3,4}$는 각 기저에 맵핑되어서 빔 패턴을 결정한다. 4x4 BS-MIMO 시스템을 수식 적으로 표현하면 아래와 같이 확장 할 수 있다.

$$
\begin{aligned}
G_T(\theta) &= d_1 B_{T,1}(\theta) + d_2 B_{T,2}(\theta) + d_3 B_{T,3}(\theta) + d_4 B_{T,4}(\theta) \\
&= d_1\left(B_{T,1}(\theta) + \frac{d_2}{d_1}B_{T,2}(\theta) + \frac{d_3}{d_1}B_{T,3}(\theta) + \frac{d_4}{d_1}B_{T,4}(\theta)\right) \\
&= d_1\left(B_{T,1}(\theta) + (-1)^{d_1\oplus d_2}B_{T,2}(\theta)\right. \\
&\quad \left. + (-1)^{d_1\oplus d_3}B_{T,3}(\theta)) + (-1)^{d_1\oplus d_4}B_{T,4}(\theta)\right)
\end{aligned} \tag{13}
$$

그림 4는 4x4 BS-MIMO 시스템과 이를 위한 각각의 기저 패턴 그림을 나타낸다. 각 데이터 스트림 신호는 각각의 기저에 맵핑되어 패턴을 결정하고, 빔공간으로 전송된다. 이처럼 ESPAR 안테나를 사용한 BS-MIMO 전송기법은 2개의 기생 배열 안테나를 추가함으로써 안테나 차원을 올릴 수 있다.

기존의 ESPAR 안테나는 주로 3, 5, 7개의 소자를 가진다. 그러므로 BS-MIMO 의 차원을 증가시키기 위해서는 ESPAR 안테나 구조의 확장이 필요하다. ESPAR 안테나를 확장하기 위해서는 중앙에 단일 급

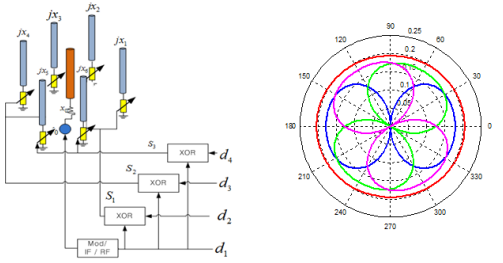


그림 4. 4x4 BS-MIMO 전송 기법과 기저 패턴.
Fig. 4. 4x4 BS-MIMO system and basis pattern.

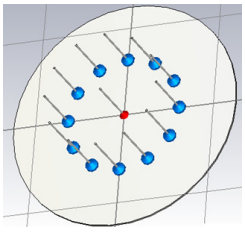


그림 5. 13-element ESPAR 안테나.
Fig. 5. 13-element ESPAR antenna.

전 능동소자에서 동일한 거리만큼 떨어진 기생 안테나의 수를 증가 시키면서 확장할 수 있다.

본 논문에서는 안테나 구조 확장을 위해서 CST Studio tool을 사용하였다. 13-Element ESPAR 안테나는 한 개의 중앙 급전 능동 소자와 12개의 기생 안테나로 구성된다. 기생 안테나간 거리는 동일하다. 이런 구조의 ESPAR 안테나 빔 패턴은 아래와 같은 수식으로 표현할 수 있다.

$$
\begin{aligned}
&G_T(\theta) = \\
&i_0 + (i_1+i_7)\cos(\psi\cos(\theta)) + (i_2+i_8)\cos(\psi\cos(\theta-\pi/6)) \\
&\quad\vdots \\
&\underbrace{+(i_6+i_{12})\cos(\psi\cos(\theta-5\pi/6))}_{B_{T,1}} \\
&+ j\underbrace{(i_1-i_7)\sin(\psi\cos(\theta))}_{B_{T,2}} + j\underbrace{(i_2-i_8)\sin(\psi\cos(\theta-\pi/6))}_{B_{T,3}} \\
&+ j\underbrace{(i_3-i_9)\sin(\psi\cos(\theta-2\pi/6))}_{B_{T,4}} + j\underbrace{(i_4-i_{10})\sin(\psi\cos(\theta-3\pi/6))}_{B_{T,5}} \\
&+ \underbrace{(i_5-i_{11})\sin(\psi\cos(\theta-4\pi/6))}_{B_{T,6}} + \underbrace{(i_6-i_{12})\sin(\psi\cos(\theta-5\pi/6))}_{B_{T,7}}
\end{aligned} \tag{14}
$$

그림 6과 같이 7개의 기저에 전송 신호를 맵핑시켜 전송하면 7x7 MIMO 전송이 가능하다

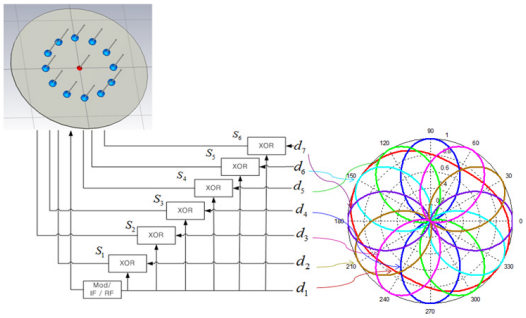


그림 6. 7x7 BS-MIMO 시스템과 기저 패턴.
Fig. 6. 7x7 BS-MIMO system and basis pattern.

Ⅳ. 시뮬레이션 및 결과

본 논문에서는 ESPAR 안테나를 이용한 BS-MIMO 시스템을 설계하고, 기존의 다수의 RF 체인을 쓰는 MIMO 시스템과의 수신 BER 성능을 분석하였

www.dbpia.co.kr

다. 또한, 2x2, 3x3, 4x4 으로 BS-MIMO 시스템의 차원을 증가 시키면서 수신 성능을 분석하였다. 표 1은 시뮬레이션 환경을 나타낸다. 수신 BER 성능 분석을 위해서는 BPSK 변조를 사용 하였으며, ZF 방식의 MIMO 검출 방식을 사용하였다. MIMO 검출 방식은 참고논문 [11]의 방식을 사용하였다. 채널은 Rayleigh MIMO 채널 환경을 고려하였다.

그림 7은 기존의 다수의 RF 체인을 가지는 MIMO 시스템과 BS-MIMO 시스템의 수신 BER 성능을 비교 하였다. 기존 MIMO 시스템은 데이터 심볼이 각각의 안테나에 맵핑되어 전송된다. 그러나 BS-MIMO 시스템은 첫 번째 데이터는 능동 소자를 통해 전송되며, 첫 번째 데이터와 두 번째 데이터의 XOR 연산에 의해서 리액턴스 값을 서로 변경 시켜 빔 패턴을 형성 시킨다(그림 2(b)). 두 번째 데이터 스트림은 빔의 패턴을 결정짓는데 중요한 역할을 한다. BS-MIMO 전송 기법은 기존의 MIMO 기법과 거의 유사한 수신 BER 성능을 얻는 것을 확인 할 수 있다. 그러나 BS-MIMO 시스템은 기존 MIMO 시스템과 다르게 단일 능동 소자만을 사용하고, 첫 번째 데이터만 능동 소자를 통해서 전송되기 때문에 기존 MIMO 시스템과 동일한 수신 BER 성능이 나타나지는 않는다.

표 1. 시뮬레이션 환경
Table 1. Simulation parameters.

Modulation	BPSK
No. element of ESPAR antenna	3, 5, 7-element
Distance of between elements	$\lambda/8$
Channel	(i.i.d) Rayleigh MIMO fading
MIMO decision rule	Zero Forcing

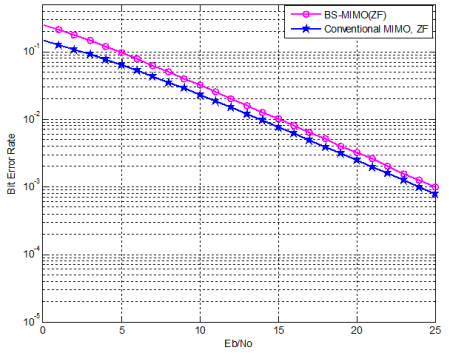


그림 7. 기존 MIMO 와 BS-MIMO 의 BER 성능 비교 (2x2).
Fig. 7. BER performance of BS-MIMO and conventional MIMO (2x2).

BS-MIMO 전송 기법의 경우 SNR 이 낮은 구간에서 약 1~2dB 의 열화가 발생하였다. 이러한 시뮬레이션 결과를 통해서 BS-MIMO 시스템은 기존 MIMO 시스템에 비해서 잡음에 민감한 특성을 보임을 확인 할 수 있다. 그러나 일반적인 통신을 위해서는 10dB이상의 SNR 이 유지 되기 때문에 이는 문제가 되지 않는다.

그림 8은 기존 3x3 MIMO 시스템과 확장된 3x3 BS-MIMO 통신 방식의 수신 BER 성능을 분석 한 것이다. 3x3 BS-MIMO 전송 기법의 경우 수신 BER 성능이 2x2 BS-MIMO 전송과 거의 비슷한 경향을 보이는 것을 확인 할 수 있다. 확장된 3x3 BS-MIMO 전송 기법이 유용한 것을 확인 할 수 있다. BER 성능 10^{-3}을 만족하기 위해서 두 시스템은 약 24dB의 SNR 이 요구되는 것을 확인 할 수 있다. 동일한 수신 BER 성능을 유지 하면서도 BS-MIMO 전송 기법의 경우 단일 RF 체인만을 사용하므로, 3개의 RF 체인을 사용하는 기존 MIMO 시스템에 비해서 하드웨어 구성

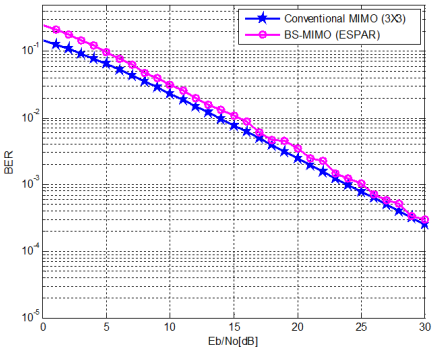


그림 8. 기존 MIMO 와 BS-MIMO 의 BER 성능 비교 (3x3).
Fig. 8. BER performance of BS-MIMO and conventional MIMO (3x3).

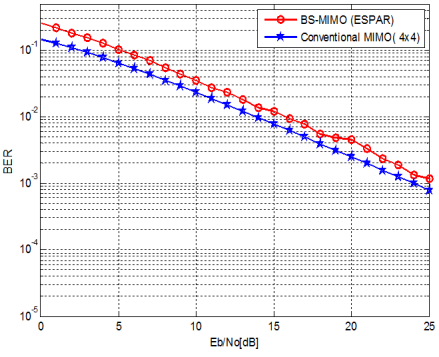


그림 9. 기존 MIMO 와 BS-MIMO 의 BER 성능 비교 (4x4).
Fig. 9. BER performance of BS-MIMO and conventional MIMO (4x4).

www.dbpia.co.kr

을 위한 복잡도가 크게 줄어들 것으로 기대된다.

그림 9는 단일 RF 단을 가지는 7-ESPAR 안테나를 사용한 4x4 BS-MIMO 시스템과 기존의 4개의 송수신 안테나를 사용하는 MIMO 시스템의 수신 BER 성능을 분석한 것이다. 4x4 빔 공간 MIMO 전송 기법과 기존 MIMO 전송 기법은 유사한 수신 BER 성능을 얻는 것을 확인 하였다. 그러나 기존 MIMO 시스템은 4x4 MIMO 를 위해서 4개의 RF 단이 요구되지만, BS-MIMO 전송 기법은 1개의 RF 단 만을 사용하여 MIMO 전송이 가능하므로 이로 인한 RF 체인에서의 전력 소모와 RF 단 간의 간섭을 줄일 수 있다. 시뮬레이션 7, 8, 9의 결과를 통해서 빔 공간 MIMO 전송을 MxM 으로 확장함에 따라서 수신 BER 성능이 변화가 없는 것을 확인 하였으며, 이를 통해서 7x7 BS-MIMO 시스템의 경우 수신 BER 성능은 유사할 것으로 예상된다. 또한, LTE-Advanced 에서 요구하는 8x8 MIMO 전송을 위해서는 15- element ESPAR 안테나를 사용한 빔공간 MIMO 전송 방식이 설계되어야 할 것이다.

V. 결 론

기존의 MIMO 전송 기법은 다수의 안테나에 신호를 맵핑시켜 전송함으로써, 안테나 수와 동일한 RF 단이 필요한 문제점이 있다. 이러한 문제점을 해결하기 위해서 단일 RF 단만을 가지는 ESPAR 안테나를 사용한 빔 공간 MIMO 시스템을 구성 하고, MxM 으로 MIMO 공간을 확장하는 방법을 제안하였다. 제안된 MxM 빔 공간 MIMO 전송 기법은 단일 RF 단만을 가진다. 따라서 기존의 MIMO 통신 방식에 비해서 RF 단을 매우 간단하게 할 수 있고, RF 단에서의 전력 소모를 줄일 수 있으며, 안테나 커플링을 줄일 수 있다. 이러한 장점을 유지하면서 수신 BER 성능을 기존 MIMO 전송 방식과 비슷하게 유지 할 수 있다. 시뮬레이션 결과, 빔 공간 MIMO 통신 방식은 기존 MIMO 시스템과 유사한 수신 BER 성능을 얻을 수 있었다. 게다가, 2x2, 3x3, 4x4 로 빔 공간 MIMO 를 확장함에도 수신 BER 성능은 유사한 결과를 얻을 수 있었다. 이를 통해서 단일 RF 단만을 사용하여서도 확장된 MIMO 전송이 가능함을 확인 하였다. 또한, 기존의 ESPAR 안테나를 13-ESPAR 안테나로의 구조 확장을 통해서 BS-MIMO 전송 차원을 증가 시킬 수 있었다. 이는 BS-MIMO를 기존 MIMO 시스템과 동일하게 MIMO 차원을 확장 시킬 수 있음을 확인 하였다. 그 한 예로써, 13-element ESPAR 안테나를 사용한 7x7 MIMO 시스템을 구성 하였다. 제안된 빔 공간 MIMO 확장 기법은 1개의 차원을 늘리기 위해서 2개의 기생 안테나가 필요한 문제점이 있다. 따라서 차후에는 하나의 기생 안테나를 증가 시키면서 MIMO를 확장 시킬 수 있는 시스템 연구가 필요하다.

References

[1] H. Lee, Q. Yang, and K. Kwak, “Performance evaluation for linear space-time coded MIMO-OFDM system considering diversity-spatial multiplexing,” *J. KICS,* vol. 29, no. 3A, pp. 240 - 247, Mar. 2004.

[2] H. Taewon, Y. Chenyang, W. Gang, and L. Shaoqian “OFDM and its wireless applications: A survey,” *IEEE Trans. Veh. Technol.,* vol. 58, no. 4, pp. 1673-1694, May 2009.

[3] P. R. King and S. Stavrou, “Land mobile-satellite MIMO capacity predictions,” *Electron. Lett.*, vol. 41, no. 13, pp. 749-751, Jun. 2005.

[4] M. A. Jensen and J. W. Wallace. “Termination-dependent diversity performance of coupled antennas: Network theory analysis,” *IEEE Trans. Antennas and Propagation,* vol. 52, no. 1. pp. 98-105, Jan. 2004.

[5] A. F. Molisch, G. Kristensson, J. B. Andersen, and B. K. Lau. “Impact of matching network on bandwidth of compact antenna arrays,” *IEEE Trans. Antennas and Propagation,* vol. 54, no. 11, pp. 3225-3238, Nov. 2006.

[6] R.Y. Mesleh, H. Haas, S. Sinanovic, A. Chang Wook, and Y. Sangboh, “Spatial modulation,” *IEEE Trans. Veh. Technol.,* vol.57, no.4, pp. 2228-2241, Jul. 2008.

[7] R. Rajashekar, K.V.S. Hari, and L. Hanzo, “Antenna selection in spatial modulation systems,” *IEEE Commun. Lett.,* vol. 17, no. 3, pp. 521-524, Mar. 2013.

[8] J. Yoon and S. Lee, “Compact meander-type antenna with a two layer structure for bluetooth operation,” *J. KICS,* vol. 35, no. 4, pp. 89-93, Apr. 2010.

[9] A. Kalis, A. G. Kanatas, and C. Papadias, “A novel approach to MIMO transmission using a single rf front end” *IEEE J. Selected Areas in*

www.dbpia.co.kr

Commun., vol. 26, no. 6, pp. 972-980, Aug. 2008.

[10] C. Y. 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.

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

[12] V. Barousis, A. G. Kanatas, and A. Kalis, "Single RF MIMO systems: Exploiting the capabilities of parasitic antennas," *IEEE Veh. Technol. Conf. (VTC Fall)*, pp. 1-5, Sept. 2011.

복 준 영 (Junyeong Bok)

2010년 2월 : 충북대학교 전자공학과 (공학사)
2012년 2월 : 충북대학교 전자공학과 (공학석사)
2012년 3월~현재 : 충북대학교 전자공학과 박사과정
<관심분야> 무선 통신 시스템

이 승 환 (Seung Hwan Lee)

1995년 2월 : 고려대학교 전자공학과 (공학사)
1997년 2월 : 고려대학교 전자공학과 (공학석사)
2007년 2월 : University of Edinburgh (공학박사)
2001~현재 : 한국전자통신연구원 무선간섭인지연구팀팀장
2010년~현재 : 과학기술연합대학원대학교 교수
<관심분야> Small cell networks, Compact MIMO, Cognitive Radio

유 흥 균 (Heung-Gyoon Ryu)

1988년~현재 : 충북대학교 전자공학과 교수
2002년 3월~2004년 2월 : 충북대학교 컴퓨터정보통신연구소 소장
1996년~현재 : IEEE, IET 논문심사위원
2002년 : 한국전자파학회 학술상 수상
2008년 : ICWMC 2008 국제학술대회 "Best Paper Award" 수상
2009년 : SPACOMM 2009 국제학술대회 "Best Paper Award" 수상
<관심분야> 무선 통신 시스템, 위성통신, B3G/4G 이동통신 시스템, 통신회로 설계 및 통신 신호처리

www.dbpia.co.kr