

ESPAR 안테나를 사용하는 카오스 QPSK 빔 공간 MIMO 시스템을 위한 리액턴스 조합과 성능 평가

Reactance Set and Performance Evaluation of Chaos QPSK Beamspace MIMO System Using ESPAR Antenna

이준현 · 이동형 · 금홍식 · 유흥균

Jun-Hyun Lee · Dong-Hyung Lee · Hong-Sik Keum · Heung-Gyoon Ryu

요약

대용량, 초고속 통신으로 인해 MIMO 시스템에 대한 연구가 활발하게 진행 중이다. 하지만 MIMO 시스템은 다수의 배열 안테나를 사용하기 때문에 다수의 RF 체인이 존재한다. 이로 인해 복잡도와 전력 소모가 증가하고, 안테나의 소형화가 불가능하다는 단점을 가진다. 이런 단점을 극복하기 위해 ESPAR 안테나를 사용하는 Beamspace MIMO 기술이 제안되었다. ESPAR 안테나를 사용하는 빔 공간 MIMO 시스템은 단일 능동 소자와 다수의 기생 소자로 구성되어 있기 때문에, 단일 RF 체인으로 구성되어 있기 때문에 복잡도와 전력 소모를 감소시킬 수 있다. 본 논문에서는 ESPAR 안테나를 사용하는 QPSK 변조 방식의 빔 공간 MIMO 시스템에 보안성 향상을 위해 최초로 카오스 통신 알고리즘을 적용시킨다. 이 시스템을 카오스 빔 공간 MIMO 시스템이라고 정의하고, 통신 성능을 평가한다. 또한, ESPAR 안테나는 기생 소자의 리액턴스를 조절하여 리액턴스 셋을 생성함으로써 QPSK 심볼을 만들고, 이를 이용한 통신 성능을 평가한다.

Abstract

Recently, researches about MIMO(Multi-Input Multi-Output) system are being studied actively due to high-capacity and high-speed communication. However, MIMO system has many RF(Radio Frequency) chains according to many array antennas. So, MIMO system has disadvantages such as high-complexity and high-power-consumption. Also, it is impossible to miniaturize the antenna dimension. In order to solve these problems, beamspace MIMO system using ESPAR(Electronically Steerable Parasitic Array Radiator) antenna was proposed. It is possible to reduce the complexity and the power-consumption, because it has single RF chain by using one active antenna and several parasitic elements. In this paper, in order to improve the security, for the first time, chaos communication algorithm is applied to QPSK modulated beamspace MIMO system using ESPAR antenna. We define as chaos QPSK beamspace MIMO system, and evaluate the SER performance. Also, we confirm that QPSK symbols can be made by changing the reactance values of parasitic elements, and evaluate the SER performance of this system.

Key words: Chaos Beamspace MIMO, ESPAR Antenna, Security, Reactance Set, Single RF Chain.

「이 논문은 2012년도, 2013년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구사업임(No. 2012017339), (No.2013R1A2-A2A01005849).」

충북대학교 전자공학과(Department of Electronics and Engineering, Chungbuk National University)

· Manuscript received March 21, 2014 ; Revised May 28, 2014 ; Accepted June 3, 2014. (ID No. 20140321-031)

· Corresponding Author: Heung-Gyoon Ryu (e-mail: ecomm@cbu.ac.kr)

I. 서 론

다양한 콘텐츠의 증가로 인해 무선 통신 분야는 콘텐츠의 원활한 서비스를 위해 대용량 통신과 초고속 통신이 중요한 문제로 부각되고 있다. 시대의 흐름에 따라 급격히 증가하는 데이터 트래픽을 해결하여 원활한 통신 서비스를 실시하기 위해 MIMO 시스템의 필요성이 중요해지고, 이를 이용한 많은 연구가 진행 중에 있다. MIMO 시스템은 다수의 배열 안테나를 사용하여 채널 용량을 증가시킬 수 있지만, 배열 안테나의 개수가 증가함에 따라 RF 체인의 수도 비례하여 많아지는 문제점을 가진다. RF 체인의 개수가 증가하면 복잡도와 전력 소모가 커지며, 하드웨어 크기의 최소화도 굉장히 어려워진다^[1]. 이러한 문제점을 극복하기 위해 ESPAR 안테나를 사용하는 빔 공간 MIMO 시스템에 대한 연구가 활발히 진행 중이다^[2].

ESPAR 안테나를 사용하는 빔 공간 MIMO 시스템은 하나의 능동 소자와 다수의 기생 소자로 구성되어 있으며, 단일 능동 소자를 사용하기 때문에 단일 RF 체인으로 구성되어 있다. 기존 MIMO 시스템과는 다르게 빔 공간 MIMO 시스템은 채널 용량을 늘리기 위해 기생 소자의 개수만 증가시키기 때문에 RF 체인의 증가 없이 채널 용량을 늘릴 수 있다^{[3][4]}. ESPAR 안테나로 MIMO 통신이 가능하며, 단일 RF 체인으로 구성되어 있기 때문에 복잡도와 전력 소모를 줄일 수 있고, 안테나의 소형화가 가능하다는 장점을 가지기 때문에 ESPAR 안테나에 대한 연구는 굉장히 중요하며, 지속적인 연구가 필요하다^[5].

무선 통신 서비스에서 대용량 통신, 초고속 통신과 더불어 보안 통신의 중요성도 부각되고 있다. 무선 통신 서비스뿐만 아니라, 기본적으로 통신의 모든 분야에서는 보안성이 굉장히 중요한 요인으로 자리 잡고 있으며, 데이터의 보안성을 향상시키기 위해 데이터의 암호화 알고리즘에 대한 연구가 계속 수행되고 있다^[6]. 일반적으로 카오스 통신 알고리즘은 보안성을 향상시킬 수 있는 보안 통신 시스템 중에 하나이다. 카오스 통신 시스템은 비선형성, 비예측성, 비주기성, 구현의 용이성 등의 특성을 가진다. 또한, 카오스 신호는 비선형적이고 불규칙하게 생성되는 신호로써, 카오스 맵의 종류나 초기값, 매개 변수

에 의해 완전히 다른 신호로 변하기 때문에 초기 조건에 민감한 특징을 가진다. 이런 특징들로 인해, 카오스 통신 시스템은 디지털 통신 시스템보다 더 좋은 보안성을 가진다^[7]. 카오스 신호를 이용하여 데이터를 전송할 때, 데이터는 카오스 신호로 인해 다른 매핑점으로 사상된 후에 전송되며, 이 과정을 통해 데이터를 숨겨서 전송할 수 있다. 따라서 제 3자가 데이터를 도중에 가로채더라도 데이터를 복구할 수 없는 것이다. 또한, 카오스 신호에 대한 정보를 정확히 알지 못한다면 데이터를 복구할 수 없기 때문에 오로지 카오스 신호에 대한 정보를 공유하고 있는 통신 사용자들만 데이터를 송수신할 수 있다.

빔 공간 MIMO 시스템은 많은 장점들로 인해 활발히 연구되는 토픽 중에 하나이다. 하지만 아직 기초 연구가 많이 필요한 상황이며, 국내에서는 연구가 활발히 진행되지 않고 있다. ESPAR 안테나를 사용한 빔 공간 MIMO 시스템은 능동 소자를 이용하여 홀수 번째 데이터를 전송하며, 능동 소자로부터 전송된 신호와 빔 패턴을 통해 짝수 번째 데이터를 알 수 있는 구조를 가지고 있다. 즉, 제 3자가 능동 소자에서 전송된 데이터를 가로채고 빔 패턴 모양을 파악할 수 있다면, 데이터는 바로 복구가 가능하다. 하지만 제 3자가 빔 패턴 방향과 모양을 알고 있더라도, 능동 소자에서 전송된 데이터를 알지 못한다면 데이터는 복구될 수 없다. 따라서 능동 소자에서 전송하는 데이터를 안전하게 전송할 수 있다면, ESPAR 안테나를 사용하는 빔 공간 MIMO 시스템의 보안성을 향상시킬 수 있다.

빔 공간 MIMO 시스템에 대한 연구나 카오스 시스템에 대한 연구는 활발히 진행 중이지만, 빔 공간 MIMO 시스템의 보안성 향상을 위해 카오스 시스템을 적용하는 연구는 이루어지지 않고 있다. 따라서 본 논문에서는 능동 소자에서 전송하는 데이터의 보안성을 향상시키기 위해 최초로 ESPAR 안테나를 사용하는 QPSK 변조 방식의 카오스 빔 공간 MIMO 시스템을 제안한다. 카오스 통신 시스템은 대역 확산을 사용하기 때문에 넓은 대역을 필요로 하는데, 최근 주파수 대역의 부족으로 인해 넓은 대역을 사용할 수 없는 환경이 많다. 이런 이유로 인해, 대역 확산을 사용하지 않으면서도 데이터의 보안성을 향상시킬 수 있는 카오스 통신 알고리즘을 적용한다. 그 후, 이

시스템의 SER 성능을 평가하고, ESPAR 안테나의 기생 소자의 리액턴스를 조절하여 리액턴스 셋을 생성함으로써 얻을 수 있는 QPSK 심볼을 이용한 통신 성능을 평가한다.

II. 시스템 개요

2-1 ESPAR 안테나를 사용하는 빔 공간 MIMO 시스템

ESPAR 안테나는 단일 능동 소자와 다수의 기생 소자로 구성되어 있으며, 능동 소자는 하나이기 때문에 ESPAR 안테나는 단일 RF 체인으로 구성된다. 단일 능동 소자와 2개의 기생 소자로 구성된 3-소자 ESPAR 안테나를 사용하는 빔 공간 MIMO 시스템의 경우에는 2x2 MIMO 통신이 가능하다. 빔 공간 MIMO 시스템은 첫 번째 심볼을 능동 소자에 사상시켜 전송을 하며, 두 번째 심볼은 ESPAR 안테나에서 생성한 빔 기저에 사상시켜 방사 패턴의 방향과 모양을 결정하고, 빔 패턴을 통해 전송한다. 따라서 ESPAR 안테나를 사용하는 빔 공간 MIMO 시스템은 기생 소자의 개수를 증가시킴으로써 채널 용량을 크게 만들 수 있다. 기생 소자의 개수가 늘어나면 빔 기저의 개수도 늘어나기 때문에 빔 기저 개수만큼 심볼을 한 번에 전송할 수 있다. 이런 이유로 인해, ESPAR 안테나를 사용하는 빔 공간 MIMO 시스템은 단일 RF 체인으로 구성되어 있어도 MIMO 통신이 가능한 것이다.

그림 1은 3-소자 ESPAR 안테나의 구조를 나타낸다. 3-소자인 경우, 단일 능동 소자와 2개의 기생 소자로 구성

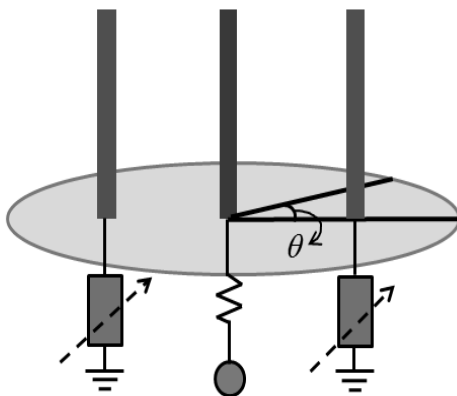


그림 1. 3-소자 ESPAR 안테나
Fig. 1. 3-Element ESPAR antenna.

된다. 능동 소자는 단일 RF 체인에 연결되며, 기생 소자는 리액턴스 부하와 연결된다.

$$\begin{aligned} i &= [i_0 \ i_1 \ i_2]^T \\ a(\theta) &= [a_0(\theta) \ a_1(\theta) \ a_2(\theta)]^T \\ G(\theta) &= i^T a(\theta) = \sum_{m=0}^2 i_m a_m(\theta) \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)은 각 소자에 대한 전류 벡터(i)와 빔 조향 기생 배열 안테나의 조향 벡터($a(\theta)$)를 의미한다. 3-소자 ESPAR 안테나인 경우에는 전류 벡터와 조향 벡터는 각각 소자의 개수만큼 존재한다. 각각 i_0, i_1, i_2 는 능동 소자에 흐르는 전류와 2개의 기생 소자에 흐르는 전류를 의미하며, $G(\theta)$ 는 방사 패턴을 나타내는 수식을 의미한다^[8]. 여기서 θ 는 $0 \sim 2\pi$ 까지 변화시킬 수 있는 임의의 각도를 의미한다. ESPAR 안테나의 패턴을 보기 위하여 $0 \sim 2\pi$ 까지 θ 값을 변화시키면서 각도에 따른 이득(Gain)을 구하고, 이 이득을 토대로 패턴을 그린다.

$$\begin{aligned} i &= v_s (Z + X)^{-1} u \\ u &= [1 \ 0 \ 0]^T \\ X &= [50, \ jx_1, \ jx_2] \end{aligned} \quad (2)$$

i 는 3-소자 ESPAR 안테나인 경우의 빔 조향 기생 배열 안테나의 전류를 수식으로 나타낸 것이다. 식 (2)에서, Z 는 상호 임피던스 행렬을 의미하며, ESPAR 안테나의 소자 개수에 따라 크기가 달라진다. 그리고 v_s 와 u 는 능동 소자에 인가되는 복소 전압과 3개의 원소를 가지는 벡터를 나타낸다. 또한, X 는 가변 리액턴스를 의미하는데, 일반적으로 능동 소자의 부하 저항은 50 Ω이 사용된다. ESPAR 안테나의 빔 패턴은 가변 리액턴스의 값을 변화시킴으로써 변화시킬 수 있으며, 이를 이용하여 임의의 방향으로 빔을 형성할 수 있다.

그림 2는 ESPAR 안테나를 사용하는 3-소자 빔 공간 MIMO 시스템의 구조를 나타낸다. b_{2n-1} 과 b_{2n} 은 각각 홀수 번째 데이터와 짝수 번째 데이터를 의미한다. 홀수 번째 데이터는 능동 소자에 매핑하여 전송된다. 그리고 짝수 번째 데이터는 리액턴스를 조절하여 패턴을 형성하고, 그 패턴을 통해 전송된다^[3].

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

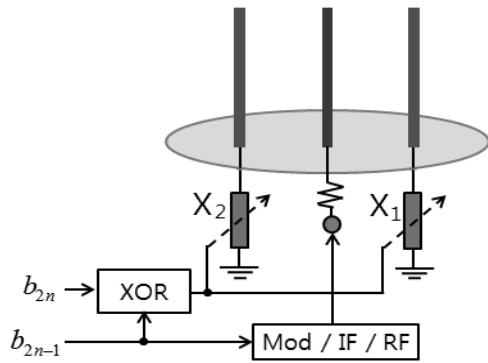


그림 2. 안테나를 사용하는 3-소자 빔 공간 MIMO 시스템
Fig. 2. 3-Element beamspace MIMO system using ESPAR antenna.

식 (3)은 식 (1)과 마찬가지로 ESPAR 안테나에서 생성하는 방사 빔 패턴을 수식으로 나타낸 것이다. 식 (1)에서는 $a_0(\theta)$, $a_1(\theta)$, $a_2(\theta)$ 로 조향 벡터를 간단하게 표현하였는데, 이 조향 벡터를 풀면 1 , $e^{ja \cos(\theta)}$, $e^{ja \cos(\theta - \pi)}$ 로 표현되고, 이를 자세한 수식으로 나타낸 것이 식 (3)이다. 또한, 식 (3)에서 사용하는 각 전류는 능동 소자에 유도되는 전류와 기생 소자에 유도되는 전류를 의미한다.

$$G(\theta) = i_0 + (i_1 + i_2)\cos(ja \cos(\theta)) - j(i_1 - i_2)\sin(ja \cos(\theta)) \quad (4)$$

식 (3)을 오일러 공식으로 전개하면 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다. 식 (4)를 보면, $i_0 + (i_1 + i_2)\cos(ja \cos(\theta))$ 와 $-j(i_1 - i_2)\sin(ja \cos(\theta))$ 는 각각 B_1 기저와 B_2 기저를 의미한다는 것을 알 수 있다. 3-소자 ESPAR 안테나에서는 2개의 기저가 존재하는데, 각 기저는 서로 직교 관계에 있다. 이 두 개의 기저는 데이터 심볼과 결합을 통해 방사 빔 패턴의 모양과 방향이 형성되며, 이를 빔 공간으로 방사하여 데이터 심볼을 전송한다^[12].

$$G(\theta) = b_1 B_1(\theta) + b_2 B_2(\theta) = b_1 \left(B_1(\theta) + \frac{b_2}{b_1} B_2(\theta) \right) = b_1 (B_1(\theta) + (-1)^S B_2(\theta)), S = b_1 \oplus b_2 \quad (5)$$

방사 빔 패턴의 수식을 심볼에 관한 수식으로 나타내면 식 (5)와 같다. 3-소자 빔 공간 MIMO 시스템은 2x2 MIMO 통신이 가능하기 때문에 2개의 데이터를 동시에

송수신한다. b_1 과 b_2 는 각각 첫 번째, 두 번째 심볼을 의미한다. 첫 번째 데이터는 능동 소자를 통해 전송되며, 두 번째 데이터는 리액턴스 값의 조절을 통해 방사 빔 패턴을 형성한 후에 전송된다^[9].

만약 BPSK 신호가 [-1, -1]이나 [1, 1]이 전송된다면, XOR 연산 결과로 0이 출력되며, 빔 패턴은 $B_1 + B_2$ 로 형성된다. 이 때, 능동 소자를 통해서 첫 번째 데이터가 전송된다. 즉, 각각의 빔의 기저인 B_1 과 B_2 는 서로 다른 데이터를 전송하게 된다. 이 때, 형성되는 빔을 변화시켜 각각의 기저에 서로 다른 데이터를 전송함으로써, MIMO 전송을 하게 한다.

2.2 카오스 신호

카오스 통신 시스템에서 사용하는 카오스 신호는 비선형적이며, 불규칙하게 생성되는 신호이다. 또한, 카오스 신호는 카오스 맵의 종류와 초기 조건에 따라 완전히 다른 신호로 변한다. 즉, 카오스 신호는 초기 조건에 민감한 특징을 가진다. 이런 이유로 인해, 카오스 통신 시스템은 비주기성, 비예측성, 구현의 용이성 그리고 초기 조건에 민감하다는 특징을 가지고 있다. 따라서 카오스 통신 시스템은 디지털 통신 시스템에 비해 보안성이 우수하다. 그렇기 때문에 무선 통신 시스템에 카오스 통신 알고리즘을 적용함으로써 보안성을 향상시킬 수 있다. 본 연구에서는 카오스 맵으로 Tent map을 사용한다.

$$x_{n+1} = \begin{cases} \alpha x_n & \text{for } x_n < \frac{1}{2} \\ \alpha(1 - x_n) & \text{for } \frac{1}{2} \leq x_n \end{cases} \quad (6)$$

식 (6)은 Tent map 방정식을 나타낸다. Tent map 방정식은 현재의 입력 값으로 이전의 출력 값을 사용하는 비선형 방정식이다. Tent map 방정식은 매개 변수 α 값이 1.01보다 작다면 선형적인 특성을 가지며, 1.01보다 큰 값을 가져야 하며, 이때의 출력의 궤적은 더 큰 폭으로 변화한다.

Tent map 방정식에서 초기 값이 0.1이고, 매개 변수 α 값이 1.99999일 때는 그림 3과 같은 궤적을 그린다. 그림 3에서 x축은 x_n , y축은 x_{n+1} 을 의미하며, 삼각형 모양으

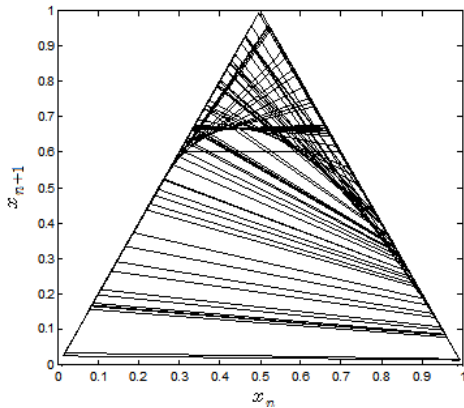


그림 3. Tent map의 궤적
Fig. 3. Trajectory of Tent map.

로 궤적이 나타나는 것을 알 수 있다.

III. Chaos 빔 공간 MIMO 시스템

기존의 카오스 통신 알고리즘은 카오스 신호를 이용하여 데이터를 확산시킨 후 전송하는 방식으로, 대역 확산을 통해 데이터를 전송하는 방식이기 때문에 넓은 대역을 필요로 한다. 하지만 본 논문에서 데이터는 카오스 신호를 이용하여 예측이 불가능한 다른 매핑점으로 사상시킨 후 전송하는 방식을 사용한다. 이 방식은 카오스 신호를 이용하여 데이터를 숨기지만 할 뿐 대역 확산 기법은 사용하지 않는다. 즉, 이번 연구에서 최초로 대역 확산을 사용하지 않으면서 데이터의 보안성을 향상시킬 수 있는 카오스 통신 알고리즘을 빔 공간 MIMO 시스템에 적용한다. 그리고 이 시스템은 카오스 빔 공간 MIMO 시스템이라 정의한다.

그림 4는 ESPAR 안테나를 사용하는 카오스 QPSK 빔 공간 MIMO 시스템의 구조를 나타낸다. 일반적으로, 빔 공간 MIMO 시스템의 홀수 번째 데이터는 능동 소자를 통해 전송이 되며, 짝수 번째 데이터는 ESPAR 안테나의 기생 소자에서 생성된 빔 기저에 사상되어 전송된다. 그리고 능동 소자를 통해 전송된 홀수 번째 데이터와 빔 패턴과 방향을 모두 알아야만 짝수 번째 데이터를 복구할 수 있는 구조로 되어 있다. 즉, 능동 소자를 통해 전송된 홀수 번째 데이터를 안전하게 송수신할 수 있다면, 모든 데이터의 보안성을 향상시킬 수 있는 것이다. 따라서 능

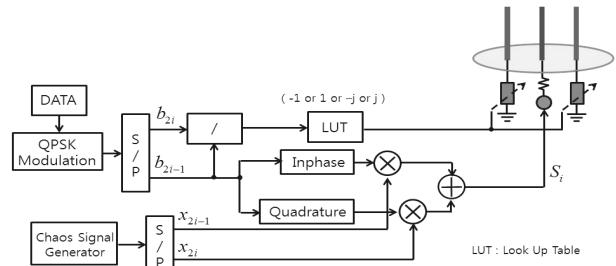


그림 4. ESPAR 안테나를 사용하는 카오스 QPSK 빔 공간 MIMO 시스템
Fig. 4. Chaos QPSK beamspace MIMO system using ESPAR antenna.

동 소자를 통해 전송하는 심볼은 카오스 신호를 이용하여 다른 점으로 매핑시킨 후에 전송된다. 이런 이유로 인해, 능동 소자를 통해 전송되는 홀수 번째 심볼에만 카오스 신호를 곱하는 것이다. 본 논문에서는 대역 확산을 사용하지 않으면서도 데이터를 숨길 수 있는 카오스 통신 알고리즘을 사용한다. 대역 확산을 사용하지 않기 위해 카오스 신호도 짝수 번째 값과 홀수 번째 값으로 나눈 후에, QPSK 홀수 번째 심볼의 실수부는 홀수 번째 카오스 신호와 곱하며, 허수부는 짝수 번째 카오스 신호와 곱하는 과정을 거친다. 이 후, 평균 신호 전력을 1로 만드는 Normalization 과정을 거친 후에 능동 소자를 통해 전송된다. 즉, QPSK 홀수 번째 심볼은 카오스 신호를 이용하여 다른 점으로 사상된 후에 능동 소자를 통해 전송된다. QPSK 짝수 번째 심볼은 기생 소자를 통해 패턴을 형성하여 전송되며, 홀수 번째 심볼과 빔 패턴을 통해 QPSK 짝수 번째 심볼을 복구한다. QPSK 짝수 번째 데이터는 QPSK 홀수 번째 데이터의 나눈 값을 기준으로 빔 패턴이 형성되는데, 나눈 값은 $-1, 1, -j, j$ 의 경우로 나누어진다. 예를 들어 $(1+j)$ 심볼이 능동 소자를 통해 수신되고, 이때의 빔 패턴으로 -1 이라는 나눈 값을 알 수 있다면, $(1+j)$ 심볼의 다음 심볼로 $(-1-j)$ 를 수신 받는다. 따라서 한번 전송할 때, $[(1+j)(-1-j)]$ 와 같이 총 2개의 데이터를 수신 받기 때문에, MIMO 통신 환경과 같다. 하지만 실제로 기생소자에 $-1, 1, -j, j$ 가 인가되는 것이 아니다. 따라서 $-1, 1, -j, j$ 를 구성하기 위한 리액턴스 셋을 생성하여 조절함으로써 $-1, 1, -j, j$ 를 구성하고, 이를 기반으로 패턴을 형성한다. 즉, 짝수 번째 심볼은 리액턴스를

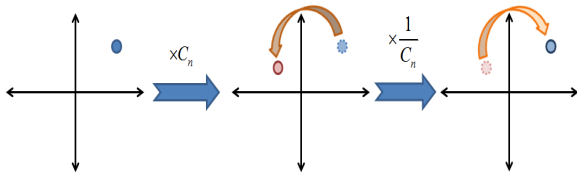


그림 5. 대역 확산을 사용하지 않는 카오스 알고리즘
Fig. 5. Chaos communication algorithm without spread spectrum.

조절하여 패턴을 형성하고, 이를 통해 전송된다.

본 논문에서는 대역 확산을 사용하지 않으면서 데이터의 보안성을 향상시킬 수 있는 카오스 통신 알고리즘을 적용하였다. 그림 5를 보면, QPSK 심볼을 카오스 신호(C_n)를 곱하여 예측 불가능한 매핑점으로 사상시켜 전송을 하고, 다시 카오스 신호의 역수를 곱하여 원래의 심볼로 복구하는 방식으로 대역 확산이 없는 카오스 통신 알고리즘을 구성하였다.

리액턴스 값은 캐패시터($1/j\omega C$) 값과 인덕터($j\omega L$) 값을 통해서 제어할 수 있다. 리액턴스 값이 음수인 경우에는 캐패시터 값을 조절하여 리액턴스 값을 제어하며, 리액턴스 값이 양수인 경우에는 인덕터 값을 조절하여 리액턴스 값을 제어한다.

$$S_i = I(b_{2i-1})x_{2i-1} + Q(b_{2i-1})x_{2i} \quad (7)$$

식 (7)은 능동 소자를 통해 전송되는 신호를 수식으로 나타낸 것이다. 홀수 번째 심볼은 카오스 신호와 곱해진 후에 전송된다. 위의 수식을 보면 알 수 있듯이, 홀수 번째 심볼의 실수부는 홀수 번째 카오스 신호와 곱해지고, 허수부는 짝수 번째 카오스 신호와 곱하고, 그 신호가 전송되는 것을 알 수 있다. 이 때, x_{2i-1} 와 x_{2i} 은 각각 홀수 번째, 짝수 번째 카오스 신호를 의미하며, b_{2i-1} 은 QPSK 홀수 번째 심볼을 의미한다. 그리고 $I(\)$ 와 $Q(\)$ 는 각각 Inphase와 Quadrature를 나타낸다.

만약 $1+j$ 를 나타내는 심볼에 카오스 신호가 곱해짐에 따라 $0.44-j0.17$ 로 변한다면, 변한 심볼을 통해 $1+j$ 를 알 수 없으며, 이는 데이터를 숨길 수 있다. 즉, 데이터를 숨길 수 있기 때문에 보안성을 향상시킬 수 있으며, 대역 확산을 사용하지 않기 때문에 넓은 대역을 필요로 하지 않는 카오스 통신 알고리즘을 적용할 수 있는 것이다.

$$S_i = I(b_{2i-1})x_{2i-1} + Q(b_{2i-1})x_{2i} \quad (8)$$

본 논문에서는 MIMO 검출 기법으로 ZF(Zero Forcing)을 사용하였다. 식 (8)은 ZF(Zero Forcing) 검출 기법을 통해 채널을 보상한 수신 신호를 나타낸다. ZF 검출 기법은 채널의 의사 역행렬을 구한 후 곱하는 과정을 통해 채널을 보상한다. 채널 보상 후에는 송신기에서 사용한 카오스 신호의 역수를 곱하여 데이터를 복원한다. 여기서 S_i 는 전송된 신호를 의미한다.

$$\xi_i = (H^H H)^{-1} H n_i \quad (9)$$

$$R_i = I(b_{2i-1}) + Q(b_{2i-1}) + \frac{I(\xi_i)}{x_{2i-1}} + \frac{Q(\xi_i)}{x_{2i}} \quad (10)$$

식 (9)는 ZF으로 채널을 보상한 후의 잡음을 수식으로 나타낸 것이며, 식 (10)은 채널 보상 후의 수신 신호에 카오스 신호의 역수를 곱하여 복원한 데이터를 수식으로 나타낸 것이다. 카오스 신호는 송신기에서 사용한 카오스 신호를 사용해야 한다. 마치 암호를 정하고 그 암호가 같아야만 데이터를 복원할 수 있는 것처럼, 시스템의 송신기와 수신기 모두 카오스 신호를 알고 있어야만 데이터의 복원이 가능하다. 즉, 제 3의 사용자가 전송 신호를 가로채더라도 카오스 신호에 대한 정보를 모른다면 데이터를 복원할 수 없기 때문에 신호의 보안성을 향상시킬 수 있다. 또한, 대역 확산을 사용하지 않는 방법이기 때문에 넓은 대역을 사용할 필요가 없다.

IV. 시뮬레이션 결과 및 분석

본 논문에서는 ESPAR 안테나를 사용하는 카오스 QPSK 빔 공간 MIMO 시스템을 구성하고, 이 시스템의 SER 성능을 평가한다. 이 때, 기생 소자에 인가되는 $-1, 1, -j, j$ 에 대한 리액턴스 셋을 찾고, 이 리액턴스 셋을 이용하여 SER 성능을 평가한다. 시뮬레이션 환경은 표 1과 같으며, 송신기는 3개의 소자를 사용하는 ESPAR 안테나를 사용하고, 수신기로는 단일 선형 배열 안테나(Uniform Linear Array, ULA)를 사용한다고 가정하였다.

본 연구에서는 안테나간 거리를 $\lambda/4$ 로 설정하고, 성능을 평가하였다. 안테나 간의 간격에 따라 안테나 간 Co-

표 1. 시뮬레이션 환경

Table 1. Simulation parameters.

Number of element	3-Element ESPAR
Inter-element distance	$\lambda/4$
Modulation	QPSK
Chaos map	Tent map
Channel	Rayleigh channel
MIMO detection	Zero forcing

relation은 변하게 된다. ESPAR 안테나에서 각 안테나 간의 거리가 멀어지면 Correlation이 감소하기 때문에 BER 성능이 향상되지만, 안테나 간 거리가 가까울수록 Correlation이 증가하기 때문에 BER 성능이 열화되는 특징을 가진다.

SNR이 10 dB일 때, ZF 검출 기법을 통해 채널을 보상한 후의 전송 신호를 성좌도로 나타내면 그림 6과 같이 나타난다. 그림 6을 보면 알 수 있듯이, 데이터에 카오스 신호가 곱해지면, 그 데이터를 알 수 없으며, 이는 데이터를 숨길 수 있다는 것을 의미한다. 즉, 카오스 신호가 곱해지면 전혀 알 수 없는 신호처럼 보이기 때문에, 제 3자가 전송 신호를 도중에 가로채더라도 데이터를 복구할 수 있는 방법이 없기 때문에, 보안성이 향상되는 것을 알 수 있다.

채널을 보상한 후의 전송 신호에 카오스 신호의 역수

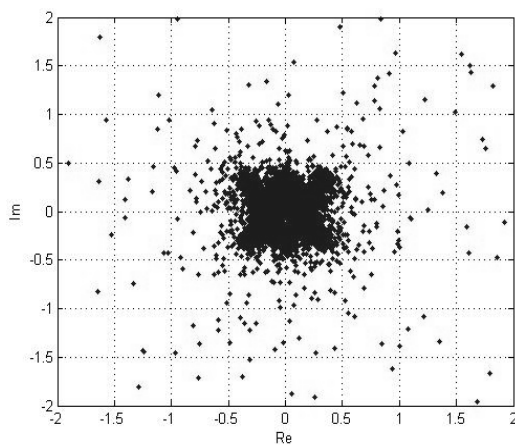


그림 6. 채널 보상 후의 전송 신호의 성좌도
Fig. 6. Constellation of received signal after channel compensation.

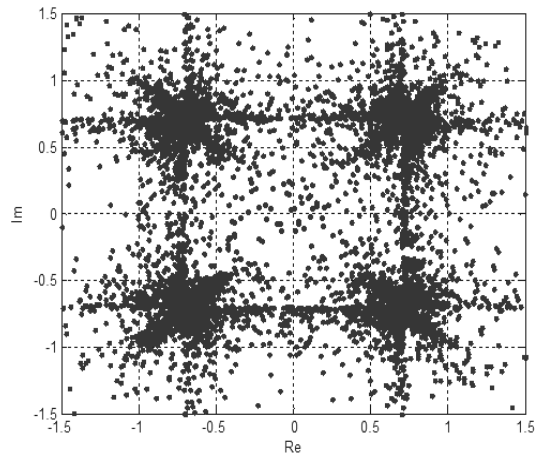


그림 7. 카오스 신호의 역수를 곱한 후의 성좌도
Fig. 7. Constellation of symbols that multiply received signal by inverse chaos signal.

를 곱하여 데이터를 복원하였을 때의 성좌도는 그림 7과 같이 나타난다. 그림 7을 보면 알 수 있듯이, 송신기에서 사용한 카오스 신호의 역수를 이용하여 데이터를 복원할 수 있다. 본 논문에서는 QPSK 변조 데이터를 전송하기 때문에 성좌도는 그림 7과 같이 나타나며, 이 후에는 Threshold를 통해서 데이터를 복구한다.

그림 8은 ESPAR 안테나를 사용하는 카오스 QPSK 빔 공간 MIMO 시스템의 SER 성능을 나타낸다. QPSK 변조

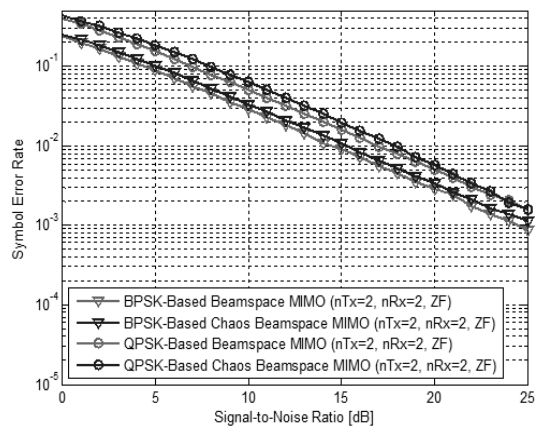


그림 8. ESPAR 안테나를 사용하는 카오스 QPSK 빔 공간 MIMO 시스템의 SER 성능
Fig. 8. SER performance of chaos QPSK beamspace MIMO system using ESPAR antenna.

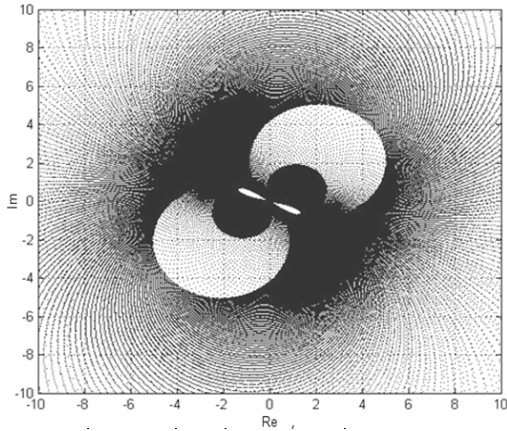


그림 9. 리액턴스 값에 따른 b_2/b_1 값
 Fig. 9. b_2/b_1 value according to the reactance values.

방식의 경우에는 BPSK 변조 방식보다 3 dB 정도의 성능 열화가 있지만, 데이터 전송 속도는 2배가 된다. 또한, 단일 RF 체인으로 구성되어 있기 때문에 기존 MIMO 시스템보다 복잡도와 전력 소모가 적으며, 카오스 통신 알고리즘으로 인해 보안성이 향상된다.

안테나 간 거리가 $\lambda/4$ 일 경우, 리액턴스 값을 변화시키면서 b_2/b_1 을 표현하면 그림 9와 같다. 그림 9를 보면, 중앙에선 값이 세밀하게 분포되어 있으며, 외곽에선 존재하는 점의 수가 줄어드는 것을 알 수 있다. 본 논문에서는 리액턴스 값의 조절로 $-1, 1, -j, j$ 에 대한 값을 생성해야 한다. 따라서 그림 9에서 $-1, 1, -j, j$ 에 대한 값을 나타내는 리액턴스 셋을 찾으면 그림 9와 같다.

실제로, 기생 소자에는 값이 인가되는 것이 아니라, 리액턴스의 조절을 통해 그 값을 만들어 전송하기 때문에 데이터를 전송하기 위해서 리액턴스 셋을 찾아야 한다. 본 논문에서 제안한 시스템은 리액턴스 값의 조절로 $-1, 1, -j, j$ 에 대한 값을 생성해야 한다. 그림 10은 리액턴스 값을 변화시키면서 짝은 점들 중에 4가지의 값을 의미하는 리액턴스 셋을 나타낸다.

표 2는 $-1, 1, -j, j$ 에 대한 리액턴스 셋을 정리한 것이다. 그림 10에서, 각각의 값에 근사한 점들을 찾고, 원하는 값과 가장 근사한 값을 가지는 리액턴스 셋을 찾는 것이다. 즉, 표 2에서 찾은 리액턴스 값을 통해서 $-1, 1, -j, j$ 를 생성하고, 이 리액턴스 값을 이용해서 방사 빔 패턴을

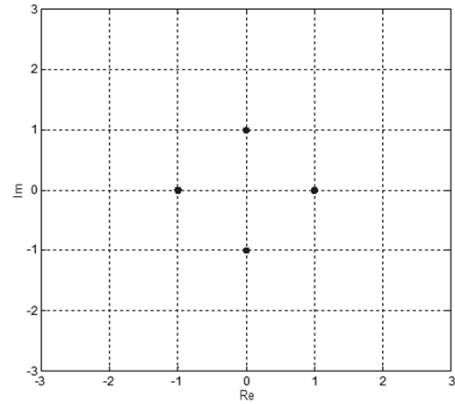


그림 10. $-1, 1, -j, j$ 에 대한 리액턴스 셋
 Fig. 10. Reactance set about $-1, 1, -j, j$.

표 2. 리액턴스 셋에 대한 룩업 테이블
 Table 2. Lookup table about reactance set.

Symbol	jX_1	jX_2
-1	$-j18.3$	$-j35.2$
+1	$-j35.2$	$-j18.3$
$-j$	$-j39.1$	$-j87.4$
$+j$	$-j87.4$	$-j39.1$

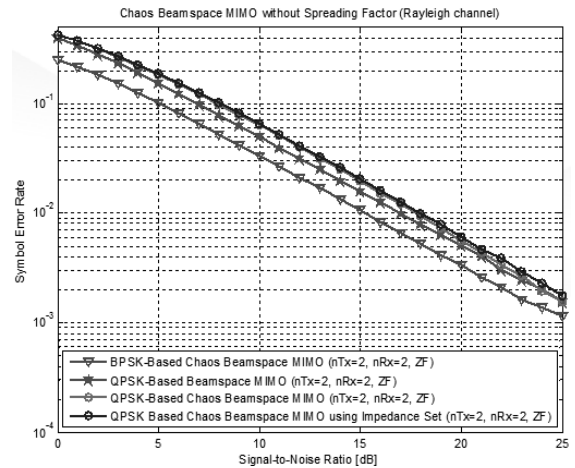


그림 11. 리액턴스 셋을 사용한 카오스 빔 공간 MIMO 시스템의 SER 성능
 Fig. 11. SER performance of chaos beamspace MIMO system using reactance set.

형성하고, 빔 공간으로 전송한다.

리액턴스 셋을 사용했을 때, 카오스 QPSK 빔 공간

MIMO 시스템의 SER 성능은 그림 11과 같이 나타난다. 그림 11을 보면, 수직적으로 적용했을 때의 SER 성능과 리액턴스 셋을 사용했을 때의 SER 성능이 거의 유사하게 나온 것을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 최초로 카오스 신호를 이용하여 능동 소자를 통해 전송되는 데이터를 다른 점으로 사상시킨 후에 송수신할 수 있는 카오스 QPSK 빔 공간 MIMO 시스템을 구성하고, 이 시스템의 SER 성능을 평가한다. 이 시스템에 적용되는 카오스 통신 알고리즘은 주파수 부족 현상을 감안하여 대역 확산이 없으면서도 데이터를 다른 점으로 매핑시켜 숨긴 상태로 송수신할 수 있는 새로운 알고리즘을 사용한다. 시뮬레이션 결과, 카오스 통신 알고리즘을 적용함으로써 능동 소자로부터 전송되는 데이터를 다른 점으로 매핑시킴으로써 예측 불가능하게 만들 수 있다는 것을 알 수 있다. 그리고 카오스 빔 공간 MIMO 시스템의 SER 성능은 기존 빔 공간 MIMO 시스템의 성능과 유사하게 평가된다. 제안한 시스템에서 나눈 값은 $-1, 1, -j, j$ 의 경우로 나타날 수 있으며, 본 논문에서는 4가지의 나눈 값을 생성할 수 있는 리액턴스 셋을 찾을 수 있었다. 그리고 이 리액턴스 셋을 사용하여 SER 성능을 평가한 결과, 나눈 값을 기생소자에 수학적으로 인가했을 때의 SER 성능과 거의 동일한 성능을 갖는다. 즉, 카오스 통신 알고리즘을 접목시킴으로써 SER 성능 열화 없이 능동 소자로부터 전송되는 데이터의 보안성을 향상시킬 수 있다.

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] M. L. Morris, M. A. Jensen, "Modeling front-end signal coupling in MIMO systems", in *Proc. IEEE/ACES Int.*

Conf. on Wireless Communications and Applied Computational Electromagnetics, Honolulu, Hawaii, pp. 622-625, Apr. 2005.

[3] O. 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.

[4] Osama 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 Transactions on, Wireless Communications*, vol. 8, no. 10, pp. 5133-5142, Oct. 2009.

[5] J. A. Kalis, A. G. Kanatas, and C. B. Papadias, "A novel approach to MIMO transmission using a single RF front end", *IEEE Journal on, Selected Areas in Communications*, vol. 26, pp. 972-980, Aug. 2008.

[6] Q. Ding, J. N. Wang, "Design of frequency-modulated correlation delay shift keying chaotic communication system", *Communications, IET*, vol. 5, no. 7, pp. 901-905, May 2011.

[7] Sung Il Hong, Eun Young Jang, "FPGA implementation of digital transceiver using chaotic signal", *Korea Institute of Information Technology Review*, vol. 8, no. 8, pp. 9-15, Aug. 2010.

[8] 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)*, Cannes, France, pp. 1-5, Sep. 2008.

[9] T. Hassan, A. Kausar, H. Umair, and M. A. Anis, "Gain optimization of a seven element ESPAR antenna using Quasi-newton method", *2011 IEEE International Conference on, Microwave Technology & Computational Electromagnetics (ICMTCE)*, pp. 293-296, May 2011.

이 준 현



2013년 2월: 충북대학교 전자공학과 (공학사)
2013년 3월 ~ 현재: 충북대학교 전자공학과 석사과정
[주 관심분야] 보안 통신, 이동 통신 시스템

김 홍 식



1994년 2월: 충북대학교 전자공학과 (공학석사)
2009년 3월 ~ 현재: 한국전파진흥협회 전자파기술원
[주 관심분야] 디지털 통신 시스템, EMC, 기술 기준 및 표준화

이 동 형



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

[주 관심분야] 무선통신 시스템

유 흥 균



1988년 ~ 현재: 충북대학교 전자공학과 교수
2002년 3월 ~ 2004년 2월: 충북대학교 컴퓨터정보통신연구소 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

[주 관심분야] 무선 통신 시스템, 위성통신, B4G/5G 이동통신 시스템, 통신회로 설계 및 통신 신호 처리