

시공간 블록 코딩에 적용가능한 간단한 암호화 기법

(A Simple Encryption Technology for Space-Time Block Coding)

정혁구¹⁾*

(Jung Hyeok-Koo)

요약 본 논문은 시공간 블록 코딩 알고리즘을 위한 간단한 암호화 기법을 제안한다. 시공간 블록 코딩 알고리즘은 데이터를 전송하는데 두 개의 안테나를 사용하며, 전송 데이터는 원래의 데이터와 수신기에서 결합하기 위하여 변형된 데이터로 구성된다. 이러한 종류의 두 개의 송신 안테나 데이터는 각각 상대방의 안테나와 교환되어 전송될 수 있으며, 이러한 방법은 간단한 암호화 알고리즘으로 사용될 수 있다. 암호화 시간 제어 정보는 송신기와 수신기 사이에서 미리 공유되어야 한다. 제안된 구조는 암호화 알고리즘이 없는 경우와 비교하여 성능이 향상됨을 제시하였다.

핵심주제어 : 공간, 시간, 시공간 블록 코드, 스위치, 암호화

Abstract This paper proposes a simple encryption technology for space-time block coding algorithm. Space-time block coding algorithm uses two antennas in transmitting data which consists of original data and transformed data for the purpose of combining in the receiver. This kind of two transmission antenna data could be exchanged and transmitted on each other's antenna individually, which can be used as a simple encryption algorithm. Encryption timing control informations should be shared between transmitter and receiver beforehand. It is shown that the proposed architecture can give performance enhancement compared with no encryption cases.

Key Words : Encryption, Spatial, STBC, Switch, Time

1. 서론

직교 주파수 분할 다중화 (OFDM : Orthogonal Frequency Division Multiplexing)은 단일 송수신 안테나 환경인 IEEE802.11a 및 다중 송수

신 안테나 환경인 IEEE802.11n[1-4]를 비롯한 무선 랜 응용의 경우에 매우 효과적인 변조 방식으로 알려져 있으며, 직교 주파수 분할 다중화에 선택적 결합과 또한 최대율 수신 결합(MRRC : Maximum Ratio Receive Combining)[5]을 조합한 기술등이 단일 송수신 안테나 환경을 가정하여 개발되어 왔다. 특히 송신 안테나 수가 증가하는 상황에서도 수신 안테나가 증가하는 상황에서 얻을 수 있는 최대율 수신 결합 이득을 얻고

* Corresponding Author : junghk@hanbat.ac.kr

Manuscript received August 14, 2018 / accepted September 18, 2018

1) 한밭대학교 정보통신공학과, 제1저자, 교신저자

자 하는 기술로서 Alamouti는 시공간 블록 코드 (STBC : Space-Time Block Code)[6]를 제안하였으며, 이것을 블록의 형태로 처리하는 직교 주파수 분할 다중화에 활용하는 연구들이 있었으며, 이것을 Al-Dhahir[7]는 단일 반송파 시스템 중에서 주파수 영역 등화기를 사용하는 단일 반송파 주파수 영역 등화기 등에서 활용 연구결과를 제시하였다. 직교 주파수 분할 다중화에 관한 연구 중에서 특히 시공간 블록 코딩 직교 주파수 분할 다중화 연구는 시간 영역과 주파수 영역 그리고 시간 주파수 영역을 동시에 고려하는 시공간 주파수 블록 코딩 연구등이 진행되었고, 다중 사용자 환경에서 다른 사용자가 시공간 블록 코딩 직교 주파수 분할 다중화를 사용하는 경우에 수신기 입장에서 다른 사용자의 시공간 블록 코딩 그룹 신호를 간섭 신호로 보고 각각의 시공간 블록 코딩 그룹신호를 구별하는 방법인 시공간 블록 코딩 간섭억제(Space-Time Block Code-Interference Suppression)[8]이 Naguib 등에 의하여 제안되어 왔다.

이와 같은 일반적인 통신 시스템에서의 암호화 방법은 주파수를 바꾸는 주파수 호핑 방법이나 데이터 비트들과 X-OR(Exclusive OR) 하는 램덤 비트들을 발생시키는 직접적인 암호화(GSM 방식)을 시행하고 있으나 암호화 알고리즘의 복잡도가 상당한 것으로 알려져 있다.

본 논문은 시공간 상에 존재하는 송신 안테나들의 송신 데이터들 간의 간단한 스위칭으로 그 스위칭 정보를 모르는 일반 수신기에서는 암호화 효과를 발생하는 간단한 공간 스위칭 알고리즘을 제안하고자 한다. 보통 시공간 블록 코딩 알고리즘은 두 개의 안테나에 데이터를 송신하는데, 첫 번째 안테나에는 원래의 신호 그대로 전송하고, 다른 두 번째 안테나에는 첫 번째 안테나의 신호를 변형하여 수신기에서 결합 가능하도록 구성한 데이터를 만들어 송신한다. 이와 같이 변형된 형태의 데이터는 원래의 송신 다이버시티를 사용하지 않는 경우와 비교하면, 이미 다른 신호로 해석될 수 있을 정도의 변형된 형태이고 따라서 두 개의 송신 안테나들에서 보내는 신호들의 상호 교환 전송에 따라 변화를 주게 되면 암호화 기법으로 사용할 수 있게 되며, 그 암호화 시간 정보

를 가정하여 수신기에서 데이터의 암호화된 경우와 안 된 경우의 수신 성능 비교를 컴퓨터 모의 실험 결과를 통해 확인하였다.

이 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 종래의 시공간 블록 코딩 직교 주파수 분할 다중화 시스템에 대하여 설명하고, 3장에서는 제안하는 공간 스위칭 암호화 기법을 적용하는 시공간 블록 코딩 직교 주파수 분할 다중화 시스템에 대하여 기술하고, 4장에서는 모의 실험결과와 고찰 그리고 5장에서는 결론을 제시하였다.

2. 시공간 블록 코딩 직교 주파수 분할 다중화 시스템

Fig. 1은 종래의 알고리즘인 직교 주파수 분할 다중화 시스템에 적용한 시공간 블록 코딩 알고리즘의 블록도를 보인다. 시공간 블록 코드는 종래의 최대율 결합 방법이 수신기 다이버시티를 증가시키고자 했던 것을 송신기 다이버시티를 증가시키는 것으로 확장 발전시킨 알고리즘이다. 이 시공간 블록 코딩 알고리즘은 두 개의 송신 안테나에서 다음과 같이 재구성한 데이터를 송신하는 것을 말한다.

$$\begin{pmatrix} S_1 & S_2 \\ -S_2^* & S_1^* \end{pmatrix} \quad (1)$$

여기에서, 가로축은 시간이고 세로축은 송신 안테나를 의미하며, t_1 시간에는 S_1 과 $-S_2^*$ 를 송신하고 t_2 시간에는 S_2 과 S_1^* 를 송신하는데, 그 때의 주파수 영역 채널 값은 각각 H_1 과 H_2 로 가정한다. 즉 t_1 시간과 t_2 시간에 채널 데이터 값의 변화는 없다고 가정한다.

두 개의 송신 안테나로부터 송신된 데이터를 수신기에서 수신한 신호를 각각 Y_1 과 Y_2 라 하면,

$$\begin{aligned} Y_1 &= S_1 H_1 - S_2^* H_2 + N_1 \\ Y_2 &= S_2 H_1 + S_1^* H_2 + N_2 \end{aligned} \quad (2)$$

여기에서, H_1 은 송신 안테나 tx1에서 수신기 rx 로의 채널을 의미하고, H_2 는 송신 안테나 tx2에서 수신기 rx 로의 채널을 의미하며, N_1 과 N_2 는 백색잡음을 의미한다.

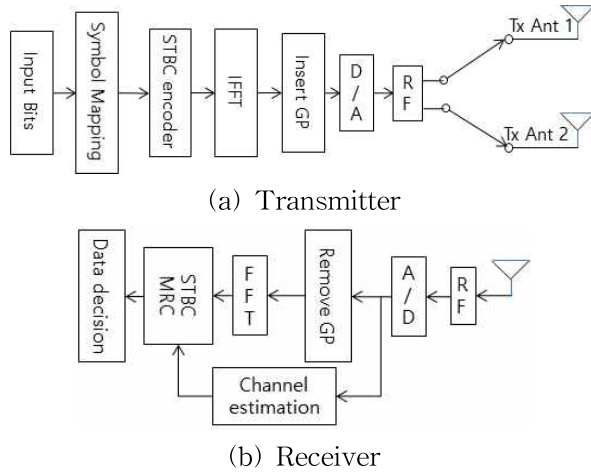


Fig. 1 STBC OFDM Block Diagram

이와 같이 되면, 원래의 송신 데이터 S_1 과 S_2 는 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$S_1 \cong \frac{Y_1 H_1^* + Y_2^* H_2}{|H_1|^2 + |H_2|^2} \quad (3)$$

$$S_2 = \frac{Y_2 H_1^* - Y_1^* H_2}{|H_1|^2 + |H_2|^2}$$

이와 같이 추정된 송신 데이터 S_1 과 S_2 은 수신 결합 다이버시티인 최대율 결합 성능과 비교하면, 송신기 안테나가 두 개이므로 두 알고리즘의 성능을 비교하기 위해서는 전체적인 송신전력을 같게 하여야 하므로 성능이 3 [dB] 열화하게 된다. 이와 같은 성능 감소는 송신 다이버시티를 사용하면 구조적인 문제로 생길 수밖에 없는 성능 열화이며, 송신 다이버시티를 사용하게 되면 얻는 이득이 상회하는 구조에서 사용이 가능하게 된다.

3. 시공간 블록 코딩 시스템을 위한 공간 스위칭 암호화 알고리즘

Fig. 2는 제안하는 알고리즘인 직교 주파수 분할 다중화 시스템에 적용한 공간 스위칭 암호화 시공간 블록 코딩 알고리즘의 블록도를 보인다. 제안하는 알고리즘에는 종래의 시공간 블록 코딩 알고리즘과 변형된 시공간 블록 코딩 알고리즘이 존재하며, 두 알고리즘간의 스위칭을 관장하는 암호화 시간 제어 블록이 있는 것이 특징이다.

이 장에서는 본 논문에서 제안하고자 하는 시공간 블록 코딩 시스템에 적용 가능한 공간 스위칭 암호화 알고리즘을 설명하고자 한다. 먼저 2장에서 설명한 시공간 블록 코딩 알고리즘과 변형된 시공간 블록 코딩 알고리즘을 하이브리드하게 전송하기 위한 시간 정보를 관장하는 암호화 시간 제어(Encryption Timing Control) 블록의 신호를 다음과 같이 가정하자.

암호화 시간 제어

$$tx1: \begin{matrix} S_1 & S_2 & -S_2^* & S_1^* & S_1 & S_2 & -S_2^* & S_1^* \\ tx2: & -S_2^* & S_1^* & S_1 & S_2 & -S_2^* & S_1^* & S_1 & S_2 \end{matrix} \quad (4)$$

Low : 원래의 시공간 블록 코딩
High : 변형된 시공간 블록 코딩

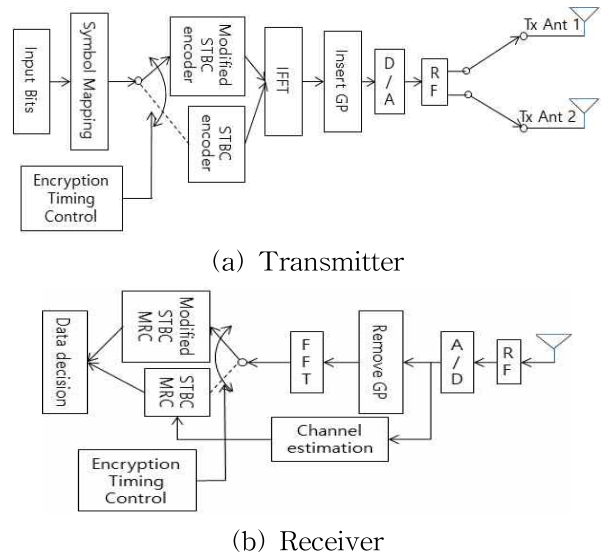


Fig. 2 Spatially Switching Encryption Block Diagram for STBC OFDM

암호화 시간 제어 신호가 낮은 경우에는 2장에서 설명한 시공간 블록 코딩 알고리즘과 같은 방식으로 송신하게 됨으로, tx1에서는 S_1 S_2 을 시간 순서대로 전송하게 되고, tx2에서는 $-S_2^*$ S_1^* 를 시간 순서대로 전송하게 된다. 한편 암호화 시간 제어 신호가 높은 경우에는 tx1에서는 $-S_2^*$ S_1^* 을 시간 순서대로 전송하게 되고, tx2에서는 S_1 S_2 를 시간 순서대로 전송하게 된다.

이와 같은 방법으로 전송하게 되면 암호화 시간 제어 신호에 따라서 원래의 시공간 블록 코딩 방법대로 신호를 구성하여 전송하게 되거나 또는 변형된 시공간 블록 코딩 방법대로 신호를 구성할 수도 있게 된다. 한편 이와 같은 변형될 수 있는 시공간 블록 코딩 방법은 위에 기술한 두 가지 방법 외에 두 가지 방법이 추가로 가능한데 이 조합을 열거하면 다음과 같다.

$$\begin{pmatrix} S_1 & -S_2^* \\ S_2 & S_1^* \end{pmatrix} \text{ 그리고 } \begin{pmatrix} S_2 & S_1^* \\ S_1 & -S_2^* \end{pmatrix} \quad (5)$$

이와 같이 송신 안테나의 경우에 전송 방법을 다르게 하면, 수신기에서는 최대율 결합 다이버시티 이득을 얻기 위해서는 전송 데이터 구성 및 전송 안테나의 시간 제어를 알아야만 가능하게 된다. 전술한 식 (4)에서 구성한 변형된 시공간 블록 코딩 방법의 송신기에서의 전송 방법은, 2장에서 기술한 시공간 블록 코딩 알고리즘에서 송신 안테나 tx1과 tx2의 데이터를 바꾸어 송신하는 것이고,

$$\begin{pmatrix} -S_2^* & S_1^* \\ S_1 & S_2 \end{pmatrix} \quad (6)$$

와 같이 데이터를 전송하게 된다. 여기에서, 가로축은 시간이고 세로축은 송신 안테나를 의미하며, t_1 시간에는 $-S_2^*$ 과 S_1 를 송신하고 t_2 시간에는 S_1^* 과 S_2 를 송신하는데, 그 때의 채널 값은 각각 H_1 과 H_2 로 가정한다. 즉 t_1 시간과 t_2 시간에 채널 데이터 값의 변화는 없다고 가정한다. 이와 같이 전송하게 되면, 원래의 데이터는 tx2에

서 전송되고 수신기 결합을 위하여 변경된 데이터는 tx1에서 전송되는 것으로서 수신기에서 2장에서 기술한 원래의 시공간 블록 코딩 결합 방법으로 결합하게 되면 오류가 발생하게 된다. 따라서 송신 안테나의 변경에 따른 채널 값을 변경시켜 주어야 데이터가 정상적으로 복구될 수 있다.

두 개의 송신 안테나로부터 송신된 데이터를 수신기에서 수신한 신호를 각각 Y_1 과 Y_2 라 하면,

$$\begin{aligned} Y_1 &= -S_2^*H_1 + S_1H_2 + N_1 \\ Y_2 &= S_1^*H_1 + S_2H_2 + N_2 \end{aligned} \quad (7)$$

여기에서, H_1 은 송신 안테나 tx1에서 수신기 rx 로의 채널을 의미하고, H_2 는 송신 안테나 tx2에서 수신기 rx 로의 채널을 의미하며, N_1 과 N_2 는 백색잡음을 의미한다[9-10].

이와 같이 되면, 원래의 송신 데이터 S_1 과 S_2 는 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$\begin{aligned} S_1 &\cong \frac{Y_1H_2^* + Y_2^*H_1}{|H_1|^2 + |H_2|^2} \\ S_2 &= \frac{Y_2H_2^* - Y_1^*H_1}{|H_1|^2 + |H_2|^2} \end{aligned} \quad (8)$$

암호화 시간 제어에 따른 수신기에서의 송신 데이터 추정은 암호화 시간 제어 신호가 낮은 (Low) 경우에는

$$\begin{aligned} S_1 &\cong \frac{Y_1H_1^* + Y_2^*H_2}{|H_1|^2 + |H_2|^2} \\ S_2 &= \frac{Y_2H_1^* - Y_1^*H_2}{|H_1|^2 + |H_2|^2} \end{aligned} \quad (9)$$

와 같이 되고 암호화 시간 제어 신호가 높은 경우에는

$$\begin{aligned} S_1 &\cong \frac{Y_1H_2^* + Y_2^*H_1}{|H_1|^2 + |H_2|^2} \\ S_2 &= \frac{Y_2H_2^* - Y_1^*H_1}{|H_1|^2 + |H_2|^2} \end{aligned} \quad (10)$$

와 같이 수신 방법이 바뀌게 된다. 만일 이와 같이 수신 방법이 바뀌는 것을 모르는 경우에는 시공간 블록 코딩에서 얻고자 하는 최대율 결합 방법이 실패하게 되는 것 뿐 아니라 4장의 모의실험에서 보이는 것처럼 데이터의 정상적인 수신 불가능할 정도로 데이터 수신이 불가능해진다.

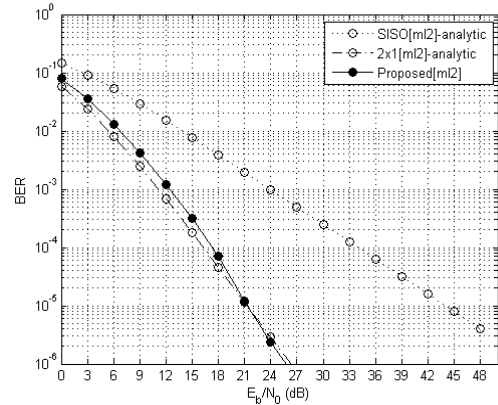
만일 원래의 시공간 블록 코딩 전송 방식으로 전송하고 있는 송신데이터 스트림을 수신하고 있다가 송신데이터의 전송 안테나를 변형된 알고리즘으로 바꾸어 전송하게 되면 처음의 방식으로 수신하고 있던 수신 방식으로는 수신 데이터가 오류가 날 것으로 예상된다. 따라서 수신기에서는 수신하고 있는 데이터의 전송 방식이 첫 번째 송신 방식인지 아니면 두 번째 송신 방식인지를 구별하는 암호화 시간 제어 순서를 알려주는 제어 신호를 미리 알아야 하며, 송신기에서의 암호화 시간 제어 순서는 암호화 방법으로 사용될 수 있다.

즉, 전송 시간 또는 전송 순서에 따라서 시공간 블록 코딩 또는 변형 시공간 블록 코딩을 전송하게 되면, 무선 전송이라 공개되어 있는 공중 전파를 수신하여 데이터를 임의로 복조하고 있던 원치 않는 사용자의 경우에 변형 시공간 블록 코딩 프레임을 만나게 되면, 소스 데이터 오류율이 현저히 증가하는 형태의 데이터를 수신하게 되어 간단하면서도 효율적인 암호화 방법으로 사용될 수 있다. 4장에서는 시간의 흐름에 따라 미리 정한 전송 순서를 알고 있는 수신기와 알지 못하는 수신기에서의 오류율을 모의실험을 통하여 제시하고자 한다.

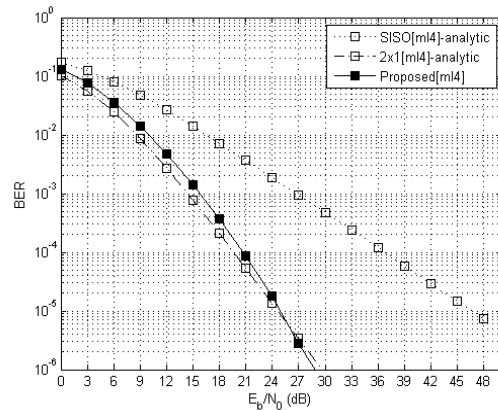
4. 모의 실험 및 고찰

모의실험에 사용한 직교 주파수 분할 다중화 시스템의 환경변수는 다음과 같다. 전체 20 [MHz] 대역은 $N=64$ 개의 데이터 블록들로 나누어진다. 유효 심볼 주기(3.2 [μ s])와 보호 구간(0.8 [μ s])을 포함한 하나의 데이터 심볼 주기는 4 [μ s]이다. 송신기에서는 80 개의 심볼들(데이터 페이로드는 64, 보호구간은 16 데이터 심볼)마다 그룹으로 묶어서 전송한다. 송수신기내의 에프에프티(FFT) 그리고 역에프에프티(IFFT)

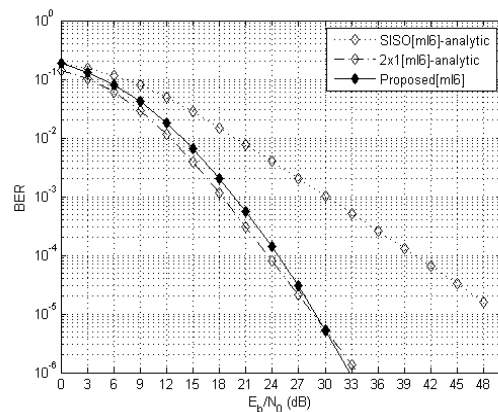
블록의 크기는 64로 하고 도플러 주파수 $f_d=50$ [Hz]로 가정한다. 또한 HiperLAN/2 채널 A를 모의 실험 환경으로 사용하였으며, 채널 상태 정



(a) QPSK



(b) 16 QAM



(c) 64 QAM

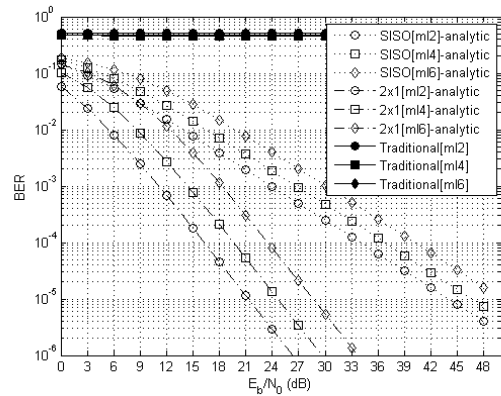
Fig. 3 Performance of Spatially Switching Encryption Technology

보는 완벽하게 알고 있으며, 시공간 블록 코딩 직교 주파수 분할 다중화 알고리즘에서 가정한 바와 같이 인접한 두 개의 직교 주파수 분할 다중화 심볼간의 같은 위치의 부반송파의 채널은 거의 동일하다고 가정하였다.

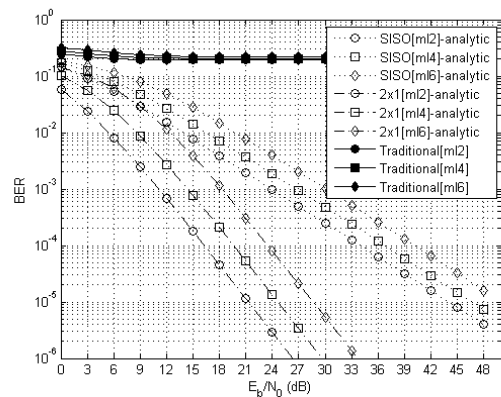
Fig. 3은 제안하는 공간 스위칭 암호화 시공간 블록 코딩 직교 주파수 분할 다중화 송수신기의 성능을 보여준다. 그 성능은 암호화를 수행하여 송수신하였음에도 불구하고, 공간 스위칭 순서를 송수신기가 공유하여 알고 있었으므로 종래의 시공간 블록 코딩 알고리즘과 동일한 성능을 보인다. Fig. 3의 경우에는 100%의 시간 동안 모두 공간 스위칭 암호화 방법으로 전송하는 경우를 모의실험 하였으며, 암호화 시간 제어 순서를 수신기가 완벽하게 알고 그에 따라서 수신 결함이 이루어진 경우를 모의실험한 것이다. ‘Fig’ 3의 (a)는 변조 수준이 QPSK인 경우이고, (b)는 변조 수준이 16 QAM인 경우이고, (c)는 변조 수준이 64 QAM인 경우의 모의 실험 결과이다. 그 결과에 함께 도시된 SISO[m1,2,4,6]-analytic은 송신 안테나 1, 수신 안테나 1인 경우의 수학적 성능을 그린 것이며, 또한 2x1[m1,2,4,6]-analytic은 송신 안테나 2, 수신 안테나 1인 경우의 수학적 성능을 그린 것으로서 모의실험한 결과가 맞는 것인지를 비교 분석하기 위한 것이다.

Fig. 4는 수신 방법에 있어서 (a)는 암호화 시간 제어를 수신기가 전혀 모르고 있는 경우이며, (b)는 50%의 시간동안 암호화 시간 제어를 수신기가 알고 있는 경우를 모의 실험한 결과이다. ‘Fig. 4’의 (a)와 (b)에 있어서 analytic으로 표시된 곡선은 SISO와 2x1의 경우에 이론적인 성능을 보여주는 경우로서 (a)와 (b)에서 제시하는 종래의 방법들이 어떠한 성능이 되어야 하는지를 보여주는 상대적인 그래프이다. 또한 종래의 방법들의 성능은 매우 안 좋은 것으로 나타났는데, 이렇게 제시하는 이유는 제시하는 암호화 알고리즘의 암호화 시간 제어를 모르는 경우 정상적인 데이터 수신에 불가능하다는 것을 보여주기 위한 성능 곡선이다.

모의 실험 결과를 보면 암호화 시간 제어를 50% 알고 있는 경우와 전혀 모르는 경우 모두 채널 추정이 전송 데이터와 함께 맞추어서 이루어



(a) No Encryption Case in the Receiver



(b) 50% Use in the Receiver

Fig. 4 Performance of Traditional Receiver in Case of Spatially Switching Encryption Technology

어지지 않는 경우이므로 정상적인 데이터의 수신에 불가능할 정도의 오류율을 보이는 것을 알 수 있다. 또한 Fig. 4 (b)의 경우에는 50%의 시간 동안은 종래의 시공간 블록 코딩 직교 주파수 분할 다중화 전송 방식대로 전송하고 나머지 50%의 시간에는 변형된 시공간 블록 코딩 직교 주파수 분할 다중화 전송 방식대로 전송하였을 때 수신기에서는 종래의 시공간 블록 코딩 직교 주파수 분할 다중화 수신방식으로 수신한 결과이다. 전체 시간의 50%는 채널 추정이 정확하게 이루어져 데이터 수신에 정상적으로 이루어졌지만, 나머지 50% 시간 동안의 오류율로 인하여 데이터의 수신 성능을 전 E_b/N_0 에 걸쳐 매우 높은 오류율을 보이고 있으며, 50% 정도의 스위칭만

으로도 암호화 시간 제어를 알지 못하는 수신기에서는 정상적인 데이터의 수신에 불가능할 정도의 오류율을 보이고 있다. 따라서 제안하는 알고리즘에서는 암호화 시간 제어 정보(어느 시간에 스위칭을 할 것인지의 부가정보)를 송수신기 간에 공유하여 공통으로 인지하게 되면 그 정보를 모르는 수신기들에게는 암호화한 것과 동일한 효과가 됨을 알 수 있다. 또한 시공간 블록 코딩 알고리즘의 전송 데이터 구성 방법이 식 (5)와 같이 변형될 수 있으므로 암호화 구성 방법이 다양하여 본 논문에서 제안하는 전송 방식대로 전송하는 무선 송신 데이터를 임의로 수신하는 원치 않는 수신기의 경우에 수신한 데이터를 복조하려면 암호화 시간 제어 정보를 알아야 함과 아울러 전송 데이터 구성 방식도 함께 알고 있어야 함으로 무선 전파를 수신할 수 있다고 하여도 암호화된 신호의 복조가 어려울 것으로 예상된다. 본 모의 실험에서는 채널 코덱을 사용하지 않는 데이터를 송수신하여 성능을 측정하였으며, 전체적인 송신전력을 같게 하기 위하여 각 안테나로부터 전송되는 전력은 단일 전송 안테나의 경우의 이분의 일로 한다. 모의 실험 결과로는 QPSK, 16 QAM 그리고 64 QAM 의 경우에 비트오류율을 기준으로 제시한다.

5. 결 론

이 논문은 종래의 시공간 블록코딩에 적용되는 소스 인코딩후 송신되는 안테나 신호를 바꿈으로 채널 추정의 변화를 초래하여 간단하게 암호화하는 방법을 제안하였다. 제안하는 알고리즘의 확장성은 직교 주파수 분할 다중화 알고리즘의 블록 단위 신호에만 적용가능한 것이 아니라 블록 단위가 아닌 데이터 심볼 단위의 구성에도 가능할 것으로 예상되며, 제안하는 알고리즘은 데이터 전송 전에 스위칭 시간 정보를 미리 송수신기가 알도록 함으로써 간단한 정보 교환만으로 이 정보를 모르는 일반 수신기가 정상적인 데이터 수신에 어렵도록 구성할 수 있다는 것을 모의 실험결과로서 제시하였으며, 무선 랜, 블루투스 등 비허가 대역을 사용하는 송신 다이버시티를 사용

하는 통신 시스템에 큰 비용을 들이지 않는 간단한 방법으로 암호화가 가능한 방법을 제안한다.

References

- [1] Jin S., "Numerical Analysis of Power Save Multi-Poll Operation in IEEE 802.11 WLANs," Journal of KIISR, Vol. 22, No. 3, pp. 13-18, 2017.
- [2] Jin S., "A Simulation Study on the Performance of the RAW in IEEE 802.11ah WLANs," Journal of KIISR, Vol. 20, No. 2, pp. 39-44, 2015.
- [3] Huh N.C. and Kim S., "Incremental Channel Scan Scheme Based on Neighbor Channel Information in IEEE 802.11 Wireless LANs," Journal of KIISR, Vol. 20, No. 5, pp. 25-35, 2015.
- [4] IEEE P802.11nTM/D3.00, Part 11, Wireless LAN Medium Access Control (MAC) and Physical Layer (PHY) Specifications.
- [5] Jeon W. G. and Jung H. K., "Hybrid SC/MRRC Technique for OFDM Systems," IEICE Trans. Commun. Vol. E89-B, No. 3, pp. 1003-1006, 2006.
- [6] S. Alamouti, "A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications," IEEE J. Select. Areas Commun., Vol. 16, No. 8, pp. 1451-1458, 1998.
- [7] N. Al-Dhahir, "Single-Carrier Frequency-Domain Equalization for Space-Time Block-Coded Transmissions Over Frequency-Selective Fading Channels," IEEE Commun. Letters, Vol. 5, No. 7, pp. 304-306, 2001.
- [8] A. F. Naguib, N. Seshadri, and A. R. Calderbank, "Application of Space-Time Block Codes and Interference Suppression for High Capacity and High Data Rate Wireless Systems," in Proc. 32nd Asilomar Conf. Signals, Systems and Computers, Vol. 2, pp. 1803-1810, 1998.

- [9] G. Strang, Linear Algebra and Its Applications, 3rd ed., Harcourt Brace and Company, 1988.
- [10] A. Oppenheim and R. Schafer, Discrete-Time Signal Processing. Englewood Cliffs, NJ: Prentice-Hall, 1989.



정혁구 (Jung Hyeok-Koo)

- 정회원
- 연세대학교 공과대학 전기공학과 공학학사
- 연세대학교 일반대학원 전기공학과 공학석사
- 중앙대학교 전자공학과 공학박사
- 한밭대학교 정보기술대학 정보통신공학과 교수
- 관심분야 : 무선통신 모뎀, OFDM 시스템