

논문 2013-50-10-4

골든 부호 기반의 공간 변조 다중 안테나 시스템 (A Golden Coded-Spatial Modulation MIMO System)

박 명 철*, 한 동 석**

(Myung Chul Park and Dong Seog Han[©])

요 약

본 논문에서는 실내 근거리 무선 통신에 적합하고 대역폭 효율을 향상시키는 공간 변조(spatial modulation) 다중 안테나 시스템을 제안한다. 기존의 공간 변조 다중 안테나 시스템은 다중 송신 안테나 중 하나의 안테나를 사용하여 채널 간에 간섭을 피할 수 있어서 다중 경로가 많은 실내 환경에서 적합하다. 그러나 심벌 전송 구간마다 한 개의 안테나만을 선택하여 전송하므로 다중 안테나의 최대 부호 이득을 얻을 수 없다. 이를 극복하기 위하여 시공간블록부호화 방식을 적용한 공간 변조 다중 안테나 시스템은 두 개의 안테나를 사용하여 수신 성능을 향상시키지만 대역폭 효율이 향상되지 않는 단점이 있다. 본 논문에서는 골든 부호(Golden code)를 적용한 공간 변조를 제안하여 공간 변조 다중 안테나 시스템의 수신 성능과 대역폭 효율을 개선한다. 그리고 컴퓨터 모의실험을 통하여 기존 시스템과 제안하는 시스템의 성능을 비교 평가한다.

Abstract

In this paper, the spatial modulation (SM) multi-input multi-output (MIMO) system is proposed for indoor wireless local area networks (WLANs) with improved spectral efficiency. SM is suitable for high speed WLANs with avoiding the inter channel interference (ICI). Only one transmit antenna is activated in SM at each symbol interval. Therefore, it fails to attain the maximum coding gain of MIMO. The space time block code (STBC)-SM MIMO system can attain the maximum diversity gain at the expense of spectral efficiency. The proposed Golden-SM MIMO system uses the Golden code to improve the coding gain and spectral efficiency at the same time. The Golden code is adapted for STBC-SM and it makes the new code book for transmission symbols. The performance of the proposed system is compared with the conventional systems with computer simulations.

Keywords : MIMO, spatial modulation, Golden code, STBC

I. 서 론

모바일 이용자들은 실내에서 이동하는 동안 근거리

무선 통신인 Wi-Fi를 이용한다. 그리고 고품질 멀티미디어 정보의 이용을 위하여 지금보다 더 빠른 무선 통신 환경이 지속적으로 요구되고 있다. 그러나 실내 환경에서는 채널 간에 간섭(inter channel interference, ICI)이 심하여 고속 무선 통신을 위한 다중 안테나 시스템(multi-input multi-output, MIMO)이 최대 성능을 얻지 못한다. 이 문제를 해결하기 위하여 실내에서 초고속 Wi-Fi 통신을 위한 IEEE 802.11ac의 표준화가 활발하게 진행되고 있다^[1].

차세대 근거리 무선 통신의 한 방식으로 표준화가 진행 중인 IEEE 802.11ac에서는 전송량을 향상시키기 위한 방법으로 다중 안테나 시스템을 채택하였다. 다중

* 학생회원, ** 정회원, 경북대학교 전자공학부
(School of Electronics Engineering, Kyungpook National University)

© Corresponding Author(E-mail: dshan@knu.ac.kr)

※ 본 연구는 미래창조과학부 및 정보통신산업진흥원의 IT융합 고급인력과정 지원사업의 연구결과로 수행되었음 (NIPA-2013-H0401-13-1005).

※ 이 논문은 2012학년도 경북대학교 학술연구비에 의하여 연구되었음

접수일자: 2013년8월6일, 수정완료일: 2013년9월25일

안테나 시스템은 대역폭 효율을 향상시키기 위하여 송신 안테나마다 서로 다른 정보를 보내는 BLAST(Bell laboratories layered space-time) 시스템과 수신 성능을 향상시키기 위한 STBC(space time block code) 시스템으로 나누어진다.

벨연구소에서 제안한 V-BLAST(vertical-bell laboratories layered space-time) 시스템은 송신 안테나 수가 증가할수록 대역폭 효율이 향상된다. 그러나 서로 다른 정보를 여러 안테나를 통하여 동시에 송신하기 때문에 수신기에서는 채널 간에 간섭이 심해진다. 이로 인하여 최우도(maximum likelihood, ML) 복호기의 복잡도가 기하급수적으로 증가하여 최적의 수신 성능을 얻기에는 한계가 있다^[2].

STBC는 대역폭 효율보다는 수신 성능을 향상시키기 위하여 최적화된 기법이다. Alamouti가 처음으로 제안한 STBC 부호는 동일한 정보를 시간과 공간에 대하여 반복하여 보내기 때문에 채널 간에 간섭이 증가하여도 복호기의 복잡도가 크게 증가하지 않는다. 그러나 안테나 수가 증가하여도 대역폭 효율이 증가하지 않는 한계가 있다^[3].

Damen이 제안한 시공간 기반의 부호화 이론은 수신 성능과 대역폭 효율을 모두 향상시키는 부호를 제안하여 Alamouti 부호의 단점을 극복하였다. 그리고 Belfore는 황금 비율을 Damen이 제안한 부호화 이론에 적용하여 송신 안테나가 2개일 때 최적의 성능을 가지는 골든 부호(Golden code)를 제안하였다. 그리고 Hassibi는 송신 안테나 2개에 국한되지 않고 송신 안테나 수에 따라 최적의 부호화를 할 수 있는 개념으로 선형 분산 부호(liner-dispersion code, LDC)를 제안하였다. 그러나 선형 분산 부호는 Alamouti 부호와 달리 채널 간에 간섭을 완전히 제거하지 못하여 송신 안테나 수가 증가할수록 복호기의 복잡도가 기하급수적으로 증가하는 한계를 가진다^[4~5].

지금까지의 다중 안테나 시스템은 채널 간에 간섭이 심해지면, 수신 성능이 감소하거나 대역폭 효율이 감소하는 한계를 가진다. 그러나 최근에 Mesleh가 채널 간에 간섭이 감소하고 복호기의 복잡도가 간단한 공간 변조(spatial modulation, SM) 다중 안테나 시스템을 제안하여 채널 간에 간섭에 대한 다중 안테나 시스템의 한계를 극복하였다. 공간 변조는 안테나를 선택적으로 사용하여 성상을 진폭과 위상의 2차원으로 나타내지 않고

공간을 추가하여 3차원으로 나타내는 다중 안테나 시스템이다. 송신 안테나가 증가하여도 실제로 사용되는 안테나는 하나이기 때문에 채널 간에 간섭이 발생하지 않아 수신 성능의 감소를 줄일 수 있다. 그리고 선택된 안테나의 위치를 이용하여 추가 정보를 전송하기 때문에 단일 안테나(single-input single-output) 시스템보다 대역폭 효율이 안테나 개수가 증가할수록 향상된다^[6].

Basar는 Alamouti가 제안한 STBC 부호와 Mesleh가 제안한 공간 변조 다중 안테나 시스템을 결합하여 STBC-SM(space-time block coded spatial modulation) 다중 안테나 시스템을 제안하였다. STBC-SM 다중 안테나 시스템은 Alamouti가 제안한 STBC 부호의 직교성과 공간 변조 다중 안테나 시스템의 선택적 안테나 사용 방법을 결합하여 채널 간 간섭을 제거한다. Mesleh의 공간 변조 다중 안테나 시스템과 같이 안테나 수가 증가할수록 대역폭 효율이 향상된다. 그리고 하나의 안테나를 선택하지 않고 다중 안테나를 선택하여 동일한 정보를 시간과 공간에 대하여 반복적으로 전송하기 때문에 Mesleh의 공간 변조 다중 안테나 시스템보다 수신 성능이 향상된다^[7].

본 논문에서는 골든 부호를 STBC-SM 다중 안테나 시스템에 적용하고 분산된 심벌과 선택적 안테나 사용을 통하여 채널 간에 간섭을 제거한다. 그리고 골든 부호를 통하여 대역폭 효율과 수신 성능이 동시에 향상되는 Golden-SM(Golden coded spatial modulation) 다중 안테나 시스템을 제안한다. 제안하는 시스템은 동일한 대역폭 효율에 대하여 Basar가 제안한 STBC-SM 다중 안테나 시스템보다 수신 성능이 향상된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 Meslesh가 제안한 공간 변조 다중 안테나 시스템과 Basar가 제안한 STBC-SM 다중 안테나 시스템에 대하여 살펴본다. III장에서는 골든 부호를 적용한 STBC-SM 다중 안테나 시스템을 제안한다. IV장에서는 컴퓨터 실험을 통하여 얻은 수신 성능을 살펴보고, V장에서 결론을 맺는다.

II. 기존의 STBC-SM 다중 안테나 시스템

본 장에서는 기존의 Mesleh가 제안한 공간 변조 다중 안테나 시스템에 대하여 살펴본다. 그리고 수신 성능을 향상하기 위하여 STBC를 공간 변조 기법에 적용

한 기존의 다중 안테나 시스템에 대하여 살펴본다.

1. 기존의 공간 변조 다중 안테나 시스템

공간 변조 다중 안테나 시스템은 다중 송신 안테나 중 하나의 안테나를 선택하여 비트 정보를 3차원의 성상으로 변조하여 송신한다. 위치가 서로 다른 송신 안테나에 번호를 지정하고 진폭과 위상의 2차원 성상에서 선택된 송신 안테나 번호를 추가하여 3차원 성상으로 비트 정보를 변조한다. 그림 1은 4개의 안테나를 사용한 공간 변조 다중 안테나 시스템의 송신기 개념도이다.

그림 1에서 \mathbf{U} 는 송신 비트열을 나타내고 이것이 공간 변조기에 입력된다. 그림 1의 시스템은 4개의 송신 안테나를 사용하기 때문에 공간 변조에 입력된 비트열 중 2비트는 송신에 사용될 안테나를 선택하고 나머지 비트는 송신할 심벌을 결정한다. 공간 변조 과정을 예를 들어 설명하면 다음과 같다. 비트열 [010]이 공간 변조에 입력이 되고 송신 안테나 수가 4이고 BPSK 성상일 때 두 번째 안테나에서 심벌 -1 을 송신한다. 공간 변조에 입력된 비트열에서 $\log_2(N_t)$ 의 비트를 통하여 송신 안테나를 선택하고 나머지 $\log_2(M)$ 비트를 통하여 송신 심벌 x 를 결정한다. 선택되지 않은 안테나에서는 0 전력을 송신한다. 송신기에서 송신된 심벌을 크기가 $1 \times N_t$ 인 벡터 \mathbf{X}_S 로 나타낸다. 위 예에서 송신 심벌 \mathbf{X}_S 는 [0 -1 0 0]가 된다. 이 때 $(\cdot)^T$ 는 전치 행렬을 의미한다.

BPSK를 사용하지 않고 QPSK를 사용한다면 3비트

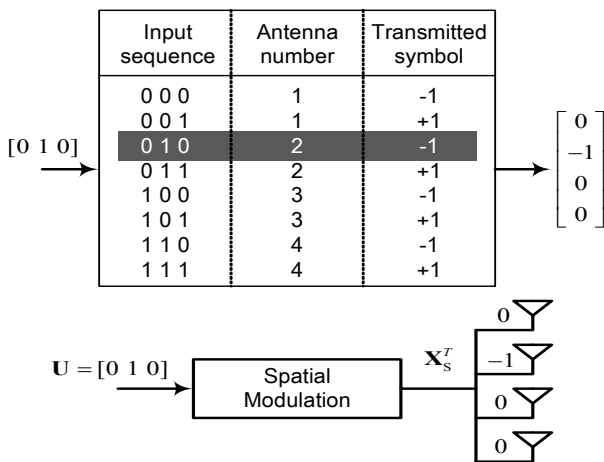


그림 1. 공간 변조 다중 안테나 시스템의 송신기 개념도
Fig. 1. Transmitter block diagram of the SM-MIMO system.

표 1. 3bits/s/Hz에 대하여 BPSK와 QPSK 공간 변조 방법

Table 1. SM mapping table for 3bits/s/Hz : BPSK and QPSK.

입력 비트	$N_t = 2, M = 4$		$N_t = 4, M = 2$	
	안테나 번호	송신 심벌	안테나 번호	송신 심벌
000	1	$+1 + j$	1	-1
001	1	$-1 + j$	1	+1
010	1	$-1 - j$	2	-1
011	1	$+1 - j$	2	+1
100	2	$+1 + j$	3	-1
101	2	$-1 + j$	3	+1
110	2	$-1 - j$	4	-1
111	2	$+1 - j$	4	+1

씩 입력받지 않고 4비트씩 입력을 받아서 안테나를 선택하고 송신 심벌을 결정한다. 표 1은 BPSK를 사용할 때와 QPSK를 사용할 때 3bits/s/Hz의 대역폭 효율을 얻기 위한 송신 안테나 개수와 입력된 비트에 따른 안테나 번호와 송신 심벌을 나타낸다. 송신 안테나의 수가 N_t 이고 QAM 성상 다이어그램의 크기가 M 일 때 공간 변조 다중 안테나 시스템의 대역폭 효율은

$$m_S = \log_2(N_t) + \log_2(M) \quad (1)$$

이고, m_S 개의 비트씩 공간 변조에 입력된다. 그리고 송신 비트열을 나타내는 \mathbf{U} 는 크기가 $m_S \times 1$ 인 벡터이다.

식 (1)은 송신 안테나 개수가 증가할수록 대역폭 효율이 증가함을 나타낸다. 그러나 V-BLAST처럼 송신 안테나가 하나씩 증가할 때마다 하나의 송신 심벌을 추가적으로 전송하지는 못하지만 송신 안테나가 두 개씩 증가할 때마다 하나의 비트가 추가되어 대역폭 효율이 증가한다. SM은 V-BLAST에 비해 안테나 수가 증가함에 따라 대역폭 효율이 증가되는 비율은 낮지만 공간 변조 다중 안테나 시스템은 하나의 안테나를 사용하여 채널 간 간섭을 최소화하기 때문에 수신 성능의 이득을 얻는다.

그림 2는 송신 심벌 \mathbf{X}_S 가 크기가 $N_t \times N_r$ 인 채널 \mathbf{H} 를 통과하고 수신기에서 검출하는 과정을 나타낸다. 이 때 N_r 은 수신 안테나 개수이다. 수신기에서 수신된 심벌 \mathbf{Y}_S 는

$$\mathbf{Y}_S = \mathbf{X}_S \times \mathbf{H} + \mathbf{N}_S \quad (2)$$

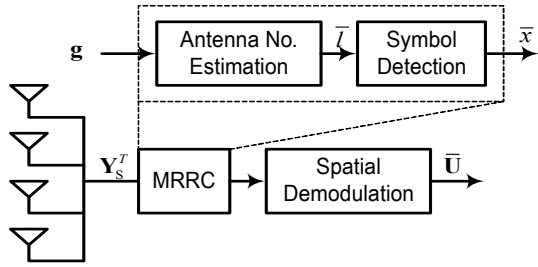


그림 2. 공간 변조 다중 안테나 시스템의 수신기 개념도

Fig. 2. Receiver block diagram of the spatial modulation MIMO system.

이고, 크기가 $1 \times N_r$ 이다. 이 때, \mathbf{N}_S 은 크기가 $1 \times N_r$ 인 가우스 분포를 따르는 열잡음 벡터이다.

SM-MIMO에서는 송신 비트 정보를 검출하기 위하여 MRRC(maximum receive ratio combining) 복호 기법을 주로 사용한다. MRRC는 수신 심벌 \mathbf{Y}_S 에 채널 행렬 \mathbf{H} 의 복소공액 전치행렬을 곱하여 \mathbf{g} 벡터를 구하는 기법이다.

$$\mathbf{g} = \mathbf{Y}_S \times \mathbf{H}^H \quad (3)$$

여기서 \mathbf{g} 는 크기가 $1 \times N_t$ 인 벡터이고, $[\cdot]^H$ 는 에르미트 전치이다. g_i 는 벡터 \mathbf{g} 의 i 번째 열에 해당하는 값이고 이를 통하여 다음과 같이 선택된 송신 안테나의 번호를 예측한다.

$$\bar{l} = \arg \max_{\forall i} (|g_i|), i = 1, \dots, N_t \quad (4)$$

선택되지 않은 송신 안테나에서는 전력을 송신하지 않기 때문에 선택된 송신 안테나에서 가장 큰 전력 값을 가지므로 식 (4)를 통하여 선택된 송신 안테나 번호 \bar{l} 를 예측할 수 있다. 그리고 송신 심벌 x 는 선택된 송신 안테나 번호의 예측이 맞다고 가정하고 다음과 같이 검출할 수 있다.

$$\bar{x} = Q(g_{i=\bar{l}}) \quad (5)$$

$Q(\cdot)$ 는 정상 양자화 함수로 유클리드 거리(Euclidean distance)가 가장 가까운 정상을 검출하는 기능을 한다. 수신기에서는 식 (4)와 (5)를 통하여 검출된 송신 비트열 $\bar{\mathbf{U}}$ 을 검출한다.

지금까지 송신 안테나를 하나에서 심벌을 송신하고 다른 안테나에서는 전력을 송신하지 않아서 채널 간에

간섭을 제거하고 대역폭 효율이 향상되는 공간 변조 다중 안테나 시스템을 살펴보았다. 다음 절에서는 송신 안테나를 모두 사용하지 않는 공간 변조 시스템의 원리를 이용하면서, 하나의 안테나가 아닌 2개의 안테나를 선택하여 수신 성능을 향상시킨 STBC가 적용된 공간 변조 다중 안테나 시스템에 대하여 살펴본다.

2. STBC를 적용한 공간 변조 다중 안테나 시스템

본 절에서는 송신 안테나를 선택하여 대역폭 효율을 향상시킨 공간 변조의 원리를, Alamouti가 제안한 STBC 부호에 적용하여 수신 성능을 향상시킨 STBC-SM 다중 안테나 시스템에 대하여 살펴본다. 2개의 안테나를 사용하여 시간과 공간에 대하여 반복적으로 송신하는 STBC 부호는 2개의 심벌 (x_1, x_2)을 다음과 같이 부호화한다^[3].

$$\mathbf{X}_{\text{STBC}} = \begin{pmatrix} x_1 & x_2 \\ -x_2^* & x_1^* \end{pmatrix} \quad (6)$$

\mathbf{X}_{STBC} 의 행은 심벌 간격을 나타내고 열은 안테나 번호를 나타낸다. 심벌 간격이 T 라고 할 때 첫 번째 심벌 시간에 송신 안테나 1번에서는 x_1 을 송신하고 송신 안테나 2번에서는 x_2 를 송신한다. 그리고 T 시간 이후에 송신 안테나 1번에서는 $-x_2^*$ 를 송신하고 송신 안테나 2번에서는 x_1^* 을 송신한다.

송신 안테나가 4개인 경우에 대하여 STBC를 적용한 공간 변조 다중화 시스템의 부호 행렬은 다음과 같다.

$$\mathbf{X}_{\text{STBCS}} = \begin{Bmatrix} \begin{pmatrix} x_1 & x_2 & 0 & 0 \\ -x_2^* & x_1^* & 0 & 0 \end{pmatrix} & \begin{pmatrix} 0 & 0 & x_1 & x_2 \\ 0 & 0 & -x_2^* & x_1^* \end{pmatrix} \\ \begin{pmatrix} 0 & x_1 & x_2 & 0 \\ 0 & -x_2^* & x_1^* & 0 \end{pmatrix} e^{j\theta} & \begin{pmatrix} x_2 & 0 & 0 & x_1 \\ x_1^* & 0 & 0 & -x_2^* \end{pmatrix} e^{j\theta} \end{Bmatrix} \quad (7)$$

$$= \begin{Bmatrix} \chi_{11} & \chi_{12} \\ \chi_{21} & \chi_{22} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \chi_0 & \chi_1 \\ \chi_2 & \chi_3 \end{Bmatrix}$$

식 (7)의 부호 행렬($\chi_\mu, \mu = 0, 1, 2, 3$)중 송신 비트열에 의해서 μ 번째 부호 행렬이 선택된다. 그리고 부호 행렬($\chi_{ij}, i = 1, 2, j = 1, 2$)은 i 가 같을 때 서로 다른 j 에 대해서 간섭이 일어나지 않는 성질을 가진다. 즉 $\chi_{ij}\chi_{ik}^H = \mathbf{0}_{2 \times 2}, j, k = 0, 1, 2, 3, j \neq k$ 이 되어 서로 겹치는 열이 없어 채널 간에 간섭을 최소화 한다. θ 는 주어진 송신 안테나 수와 정상 다이어그램 크기에 따라

최대 다이버시티 이득을 얻기 위한 회전각이다. 이것을 고려하지 않는다면 부호 행렬 간에 간섭이 일어나 최대 이득을 얻을 수가 없다. 송신 안테나 수가 4일 때의 각 성상 다이어그램 크기에 따른 θ 값은 BPSK일 때 $\theta = 1.57[\text{rad}]$, QPSK일 때 $\theta = 0.61[\text{rad}]$, 16-QAM일 때 $\theta = 0.75[\text{rad}]$, 64-QAM일 때 $\theta = 0.54[\text{rad}]$ 이다^[7].

표 2는 송신 안테나를 4개 사용하고 BPSK에 해당하는 부호 행렬을 정리한 것이다. 부호 행렬의 행은 심벌 간 간격을 의미하고 열은 송신 안테나 번호에 해당한다.

STBC-SM 부호 행렬을 사용하여 얻을 수 있는 대역폭 효율은 다음과 같다.

$$m_{\text{STBCS}} = \frac{1}{2} \log_2(c) + \log_2(M) \quad (8)$$

표 2. 2bits/s/Hz에 대한 STBC-SM 부호 행렬
Table 2. STBC-SM mapping table for 2bits/s/Hz.

		입력 비트	부호 행렬
x_μ	$\mu = 0$	0000	$\begin{pmatrix} 1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
		0001	$\begin{pmatrix} 1 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & 1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
		0010	$\begin{pmatrix} -1 & 1 & 0 & 0 \\ -1 & -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
		0011	$\begin{pmatrix} -1 & -1 & 0 & 0 \\ 1 & -1 & 0 & 0 \end{pmatrix}$
	$\mu = 1$	0100	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & -1 \end{pmatrix}$
		0101	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & 1 & -1 \\ 0 & 0 & -1 & 1 \end{pmatrix}$
		0110	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 & 1 \\ 0 & 0 & -1 & -1 \end{pmatrix}$
		0111	$\begin{pmatrix} 0 & 0 & -1 & -1 \\ 0 & 0 & 1 & -1 \end{pmatrix}$
	$\mu = 2$	1000	$\begin{pmatrix} 0 & 1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & 1 & 0 \end{pmatrix} e^{j\theta}$
		1001	$\begin{pmatrix} 0 & 1 & -1 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 0 \end{pmatrix} e^{j\theta}$
		1010	$\begin{pmatrix} 0 & -1 & 1 & 0 \\ 0 & -1 & -1 & 0 \end{pmatrix} e^{j\theta}$
		1011	$\begin{pmatrix} 0 & -1 & -1 & 0 \\ 0 & 1 & -1 & 0 \end{pmatrix} e^{j\theta}$
$\mu = 3$	1100	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} e^{j\theta}$	
	1101	$\begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 1 \\ 1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} e^{j\theta}$	
	1110	$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & -1 \end{pmatrix} e^{j\theta}$	
	1111	$\begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & -1 \\ -1 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} e^{j\theta}$	

여기서 c 는 송신 안테나 수에 따라 서로 간섭이 일어나지 않는 부호 행렬의 개수를 의미한다. 예를 들어 식 (7)은 간섭이 일어나지 않는 부호 행렬의 개수가 4개이므로 c 는 4가 되어 대역폭 효율이 1 bits/s/Hz 향상된다. 1/2은 송신 심벌 행렬이 두 심벌 간격 동안 송신되기 때문이다. 그러므로 두 심벌 간격이 아닌 그 이상의 간격으로 부호화를 하는 것은 공간 변조를 통하여 얻을 수 있는 추가적인 대역폭 효율의 향상이 감소되기 때문에 비효율적이다.

그림 3은 STBC-SM 다중 안테나 시스템의 송신기 개념도를 나타낸다. 입력되는 비트열 \mathbf{U} 에서 $2m_{\text{STBCS}}$ 개의 비트들을 통하여 μ 번 째 부호 행렬과 송신 심벌 x_1, x_2 를 결정한다.

수신 안테나의 수가 N_r 인 수신기에서 수신된 심벌 $\mathbf{Y}_{\text{STBCS}}$ 은 다음과 같다.

$$\mathbf{Y}_{\text{STBCS}} = \mathbf{X}_{\text{STBCS}} \times \mathbf{H} + \mathbf{N} \quad (9)$$

$\mathbf{Y}_{\text{STBCS}}$ 은 크기가 $1 \times N_r$ 인 벡터를 나타낸다. 송신 비트열을 검출하기 위해서 c 개의 부호 행렬 중 어떤 부호 행렬을 사용하였는지를 검출하는 것이 먼저다. 이를 위하여 식 (9)를 다음과 같이 간소화한다.

$$\mathbf{y}_{\text{STBCS}} = H_\mu \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \mathbf{n} \quad (10)$$

$\mathbf{y}_{\text{STBCS}}$ 은 크기가 $2N_r \times 1$ 인 수신 심벌 벡터이고, \mathbf{n} 는 크기가 $2N_r \times 1$ 인 가우스 분포를 따르는 열잡음 벡터이다. H_μ , $0 \leq \mu \leq c-1$ 는 μ 번 째 부호 행렬에 따른 채널 행렬을 나타내고 행렬 크기는 $2N_r \times 2$ 이다. 식 (7)의 부호 행렬은 4개이고 이 때 채널 행렬 H_l 은 다음과 같다.

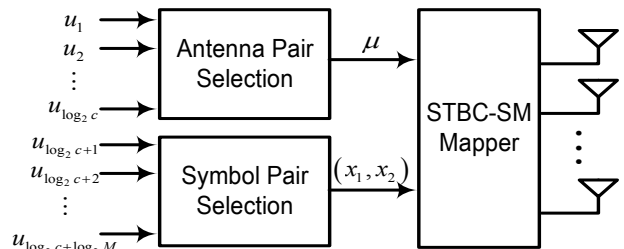


그림 3. STBC-SM 다중 안테나 시스템의 송신기 개념도
Fig. 3. STBC-SM MIMO system transmitter.

$$\begin{aligned}
H_0 &= \begin{bmatrix} h_{1,1} & h_{1,2} \\ h_{1,2}^* - h_{1,1}^* & \\ \vdots & \\ h_{N_r,1} & h_{N_r,2} \\ h_{N_r,2}^* - h_{N_r,1}^* & \end{bmatrix} & H_1 &= \begin{bmatrix} h_{1,3} & h_{1,4} \\ h_{1,4}^* - h_{1,3}^* & \\ \vdots & \\ h_{N_r,3} & h_{N_r,4} \\ h_{N_r,4}^* - h_{N_r,3}^* & \end{bmatrix} \\
H_2 &= \begin{bmatrix} h_{1,2}\varphi & h_{1,3}\varphi \\ h_{1,3}\varphi^* - h_{1,2}\varphi^* & \\ \vdots & \\ h_{N_r,2}\varphi & h_{N_r,3}\varphi \\ h_{N_r,3}\varphi^* - h_{N_r,2}\varphi^* & \end{bmatrix} & (11) \\
H_3 &= \begin{bmatrix} h_{1,4}\varphi & h_{1,1}\varphi \\ h_{1,1}\varphi^* - h_{1,4}\varphi^* & \\ \vdots & \\ h_{N_r,4}\varphi & h_{N_r,1}\varphi \\ h_{N_r,1}\varphi^* - h_{N_r,4}\varphi^* & \end{bmatrix}
\end{aligned}$$

여기서 $h_{i,j}$ 는 j 번 째 송신 안테나와 i 번 째 수신 안테나 간에 채널 이득 값이고 $\varphi = e^{j\theta}$ 이다. Alamouti STBC 부호의 직교성을 이용하여 송신 신호 x_1, x_2 를 다음과 같이 따로 검출한다.

$$\begin{aligned}
\hat{x}_{1,\mu} &= \arg \min_{x_1 \in Q} \|\mathbf{y}_{\text{STBCS}} - \mathbf{h}_{\mu,1}x_1\|^2 \\
\hat{x}_{2,\mu} &= \arg \min_{x_2 \in Q} \|\mathbf{y}_{\text{STBCS}} - \mathbf{h}_{\mu,2}x_2\|^2
\end{aligned} \quad (12)$$

여기서 $H_\mu = [\mathbf{h}_{\mu,1} \mathbf{h}_{\mu,2}]$, $0 \leq l \leq c-1$ 이고 $\mathbf{h}_{\mu,j}$, $j = 1, 2$ 이고 크기가 $2N_r \times 1$ 인 채널 벡터이다. 그리고 Q 는 성상 다이어그램을 나타낸다.

송신할 때 사용된 μ 번 째 부호 행렬을 예측하기 위해서 다음과 같이 ML 복호를 한다.

$$\begin{aligned}
m_{1,\mu} &= \min \|\mathbf{y}_{\text{STBCS}} - \mathbf{h}_{\mu,1}x_1\|^2, x_1 \in Q \\
m_{2,\mu} &= \min \|\mathbf{y}_{\text{STBCS}} - \mathbf{h}_{\mu,2}x_2\|^2, x_2 \in Q \\
m_\mu &= m_{\mu,1} + m_{\mu,2}, 0 \leq \mu \leq c-1 \\
\hat{\mu} &= \arg \min_{\mu} m_\mu
\end{aligned} \quad (13)$$

여기서 m_μ 은 μ 번 째 부호 행렬에 대한 전체 ML 값을 나타낸다. 이를 통하여 송신 할 때의 부호 행렬을 예측한 $\hat{\mu}$ 을 결정한다. 예를 들어 표 2의 부호 행렬을 사용하는 시스템일 때 수신기에서는 μ 번 째 부호 행렬에 대하여 식 (12)를 구하고 식 (13)을 통하여 송신 신호

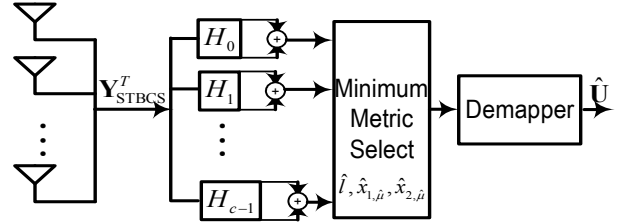


그림 4. STBC-SM 다중 안테나 시스템의 수신기 개념도
Fig. 4. STBC-SM MIMO system receiver block diagram.

($\hat{x}_{1,\hat{\mu}}, \hat{x}_{2,\hat{\mu}}$)를 검출한다.

그림 4는 수신기에서 송신 비트열을 검출하는 개념도이다. 식 (11)에서 식 (13)까지의 과정을 나타내고 ML 복호기의 결과를 복조기에 입력하여 송신 비트열을 검출한다.

STBC-SM 다중 안테나 시스템은 송신 안테나를 2개 선택하여 수신 성능을 향상 시키는 장점을 가지지만 1개를 선택한 공간 변조 다중 안테나 시스템에 비해 대역폭 효율이 향상되지 않는 단점이 있다. 다음 장에서는 송신 안테나를 2개 선택하여 공간 변조 다중 안테나 시스템보다 수신 성능과 대역폭 효율이 모두 향상되는 시스템을 제안한다.

III. STBC-SM에 골든 부호를 적용한 제안 MIMO 시스템

제안하는 다중 안테나 시스템은 기존의 STBC-SM 다중 안테나 시스템에 Belfore의 골든 부호를 적용하는 것이다. 먼저 골든 부호에 대해서 살펴보고 STBC-SM 다중 안테나 시스템에 적용한 부호 행렬을 제안한다.

Belfore가 제안한 골든 부호는 송신 안테나를 2개 사용하였을 때 시간과 공간에 대하여 심벌을 분산하는 부호 중에서 동일한 전송량에 대하여 최적의 수신 성능을 얻는 부호로 다음과 같다^[4].

$$\mathbf{X}_G = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{bmatrix} x_1 + \bar{\theta} x_2 & \gamma(x_3 - \bar{\theta} x_4) \\ x_3 + \bar{\theta} x_4 & x_1 - \bar{\theta} x_2 \end{bmatrix} \quad (14)$$

여기서 $\bar{\theta} = (1 + \sqrt{5})/2$ 인 황금 비율을 의미하고 최적의 성능을 얻는다. 그리고 성상 다이어그램 크기에 따라서 황금 비율을 사용하였을 때 동일한 성능을 얻는 값이 존재한다. 표 3은 $\gamma = \bar{\theta}$ 라고 할 때, 성상 다이어그램 크기에 따른 최적의 γ 값을 정리한 것이다.

식 (7)에 식 (14)를 적용한 Golden-SM 부호 행렬을

다음과 같이 제안한다.

$$\begin{aligned} \mathbf{X}_{\text{GSM}} &= \{X_0, X_1, X_2, X_3\} \\ X_0 &= \begin{pmatrix} x_1 + \bar{\theta} x_2 \gamma (x_3 - \bar{\theta} x_4) & 0 & 0 \\ x_3 + \bar{\theta} x_4 & x_3 - \bar{\theta} x_4 & 0 & 0 \end{pmatrix} \\ X_1 &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & x_1 + \bar{\theta} x_2 \gamma (x_3 - \bar{\theta} x_4) \\ 0 & 0 & x_3 + \bar{\theta} x_4 & x_1 - \bar{\theta} x_2 \end{pmatrix} \\ X_2 &= \begin{pmatrix} 0 & 0 & x_1 + \bar{\theta} x_2 \gamma (x_3 - \bar{\theta} x_4) \\ 0 & 0 & x_3 + \bar{\theta} x_4 & x_1 - \bar{\theta} x_2 \end{pmatrix} \\ X_3 &= \begin{pmatrix} \gamma (x_3 - \bar{\theta} x_4) & 0 & 0 & x_1 + \bar{\theta} x_2 \\ x_1 - \bar{\theta} x_2 & 0 & 0 & x_3 + \bar{\theta} x_4 \end{pmatrix} \end{aligned} \quad (15)$$

식 (7)에서는 $e^{j\theta}$ 를 곱하는 것이 최적의 부호화 이득을 얻는 것이지만, 골든 부호를 적용하게 되면 Alamouti 부호에 있는 직교성이 존재하지 않기 때문에 $e^{j\theta}$ 를 곱하는 것은 부호화 이득이 감소되는 원인이 된다.

식 (15)의 부호 행렬은 공간 변조 다중 안테나 시스템과 같이 입력된 비트열에 따라서 선택되고 2 비트를 추가적으로 전송한다. 그리고 일반적으로 안테나 수가 증가할수록 부호 행렬의 개수가 증가하여 추가로 전송 가능한 비트 수도 증가한다. 부호 행렬의 개수가 c 이고, 성상 다이어그램 크기가 M 인 Golden-SM 다중 안테나 시스템의 대역폭 효율 m_{GSM} 은 다음과 같다.

$$m_{\text{GSM}} = \frac{1}{2} \log_2(c) + 2 \log_2(M) \quad (16)$$

식 (8)의 m_{STBCS} 과 식 (16)의 m_{GSM} 을 비교하면 대역폭 효율이 약 2배 증가함을 알 수 있다. 이는 동일한 심벌 간격 동안 STBC-SM 시스템이 2개의 심벌을 보내는 것과 달리 Golden-SM 시스템은 4개의 심벌을 보내기 때문이다. 부호 행렬의 개수가 성상 다이어그램 보다 상대적으로 많으면 두 값은 유사해지나, 이를 위해서는 최소 2^6 개의 안테나

표 3. 골든 부호에서 성상 다이어그램 크기에 따른 최적의 γ
Table 3. Optimal γ for Golden code along constellation diagram size.

	QPSK	16-QAM	64-QAM
γ	$e^{j\pi/4}$	$e^{j/2}$	$e^{j/2}$

가 필요하기 때문에 본 논문에서는 고려하지 않는다.

송신기의 구조는 STBC-SM 송신기를 나타내는 그림 3과 동일하며 STBC-SM 부호 행렬을 대신에 Golden-SM 부호 행렬을 사용한다. 입력되는 비트열의 수는 $2m_{\text{GSM}}$ 이고 입력되는 비트열 중 $u_1, \dots, u_{\log_2(c)}$ 는 부호 행렬을 결정하고 $u_{\log_2(c)+1}, \dots, u_{\log_2(c)+4\log_2(M)}$ 비트는 송신 심벌 x_1, x_2, x_3, x_4 를 결정한다.

부호 행렬은 채널 \mathbf{H} 를 통과하여 수신기에서 수신 벡터 \mathbf{Y}_{GSM} 로 다음과 같이 수신된다.

$$\mathbf{Y}_{\text{GSM}} = \mathbf{X}_{\text{GSM}} \times \mathbf{H} + \mathbf{N} \quad (17)$$

\mathbf{Y}_{GSM} 은 크기가 $1 \times N_r$ 인 벡터이다. 식 (9)에서 식 (10)으로 간소화 한 것과 같이 식 (17)도 다음과 같이 간소화한다.

$$\mathbf{y}_{\text{GSM}} = \widehat{\mathbf{H}}_{\mu} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} + \mathbf{n} \quad (18)$$

\mathbf{y}_{GSM} 은 크기가 $2N_r \times 1$ 인 벡터이고 $\widehat{\mathbf{H}}_{\mu}$, $0 \leq \mu \leq c-1$ 는 크기가 $2N_r \times 4$ 인 부호 행렬에 따른 채널 행렬이다. $c=4$ 일 때 Golden-SM 부호 행렬에 적합한 채널 행렬 $\widehat{\mathbf{H}}_{\mu}$ 은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \widehat{\mathbf{H}}_0 &= \begin{bmatrix} h_{1,1} & \bar{\theta} h_{1,1} & \gamma h_{1,2} & -\gamma \bar{\theta} h_{1,2} \\ h_{1,2} & -\bar{\theta} h_{1,2} & h_{1,1} & \bar{\theta} h_{1,1} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{N_r,1} & \bar{\theta} h_{N_r,1} & \gamma h_{N_r,2} & -\gamma \bar{\theta} h_{N_r,2} \\ h_{N_r,2} & -\bar{\theta} h_{N_r,2} & h_{N_r,1} & \bar{\theta} h_{N_r,1} \end{bmatrix} \\ \widehat{\mathbf{H}}_1 &= \begin{bmatrix} h_{1,3} & \bar{\theta} h_{1,3} & \gamma h_{1,4} & -\gamma \bar{\theta} h_{1,4} \\ h_{1,4} & -\bar{\theta} h_{1,4} & h_{1,3} & \bar{\theta} h_{1,3} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{N_r,3} & \bar{\theta} h_{N_r,3} & \gamma h_{N_r,4} & -\gamma \bar{\theta} h_{N_r,4} \\ h_{N_r,4} & -\bar{\theta} h_{N_r,4} & h_{N_r,3} & \bar{\theta} h_{N_r,3} \end{bmatrix} \\ \widehat{\mathbf{H}}_2 &= \begin{bmatrix} h_{1,2} & \bar{\theta} h_{1,2} & \gamma h_{1,3} & -\gamma \bar{\theta} h_{1,3} \\ h_{1,3} & -\bar{\theta} h_{1,3} & h_{1,2} & \bar{\theta} h_{1,2} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{N_r,2} & \bar{\theta} h_{N_r,2} & \gamma h_{N_r,3} & -\gamma \bar{\theta} h_{N_r,3} \\ h_{N_r,3} & -\bar{\theta} h_{N_r,3} & h_{N_r,2} & \bar{\theta} h_{N_r,2} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

$$\widehat{H}_3 = \begin{bmatrix} h_{1,4} & \bar{\theta} h_{1,4} & \gamma h_{1,1} & -\gamma \bar{\theta} h_{1,1} \\ h_{1,1} & -\bar{\theta} h_{1,1} & h_{1,4} & \bar{\theta} h_{1,4} \\ \vdots & \vdots & \vdots & \vdots \\ h_{N_r,4} & \bar{\theta} h_{N_r,4} & \gamma h_{N_r,1} & -\gamma \bar{\theta} h_{N_r,1} \\ h_{N_r,1} & -\bar{\theta} h_{N_r,1} & h_{N_r,4} & \bar{\theta} h_{N_r,4} \end{bmatrix} \quad (19)$$

Alamouti STBC 부호는 직교성이 존재하여 송신 심벌에 대하여 따로 ML 복호가 가능하지만, 골든 부호는 직교성이 존재하지 않아 ML 복호를 따로 하는 것은 불가능하여 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \\ \hat{x}_3 \\ \hat{x}_4 \end{bmatrix} = \arg \min_{\substack{x_1, x_2, x_3, x_4 \in Q \\ 0 \leq \mu \leq c-1}} \left\| \mathbf{y}_{\text{GSM}} - \widehat{H}_\mu \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \right\|^2$$

$$m_\mu = \min_{\substack{x_1, x_2, x_3, x_4 \in Q \\ 0 \leq \mu \leq c-1}} \left\| \mathbf{y}_{\text{GSM}} - \widehat{H}_\mu \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \\ x_4 \end{bmatrix} \right\|^2$$

$$\hat{\mu} = \arg \min_{0 \leq \mu \leq c-1} m_\mu \quad (20)$$

송신 심벌을 예측하기 전에 모든 부호 행렬에 대한 ML을 구하고 식 (20)을 통하여 $\hat{\mu}$ 값을 구하고 이 때 송신 심벌 $[\hat{x}_1 \hat{x}_2 \hat{x}_3 \hat{x}_4]$ 을 복조기에 입력하여 송신 비트열을 검출한다.

Golden-SM 시스템의 복잡도는 cM^4 으로 STBC-SM 시스템의 복잡도인 $2cM$ 보다 증가하는 단점이 있지만 대역폭 효율이 약 2배 증가하는 장점이 있다.

IV. 실험

본 장에서는 기존의 STBC-SM 다중 안테나 시스템과 본 논문에서 제안한 Golden-SM 다중 안테나 시스템의 수신 성능을 비교한다. 채널은 평평한 레일리 페이딩(Rayleigh flat-fading)이고, 채널 임펄스 응답의 추정은 완벽하다고 가정한다.

그림 5는 송신 안테나 4개, 수신 안테나 2개를 가진 시스템에서 5bits/s/Hz 대역폭 효율에 대한 STBC-SM 다중 안테나 시스템과 Golden-SM 다중 안테나 시스템의 수신 성능을 나타낸다. BER(bit error rate)이 10^{-3} 일 때 제안한 Golden-SM 다중 안테나 시스템의 수신

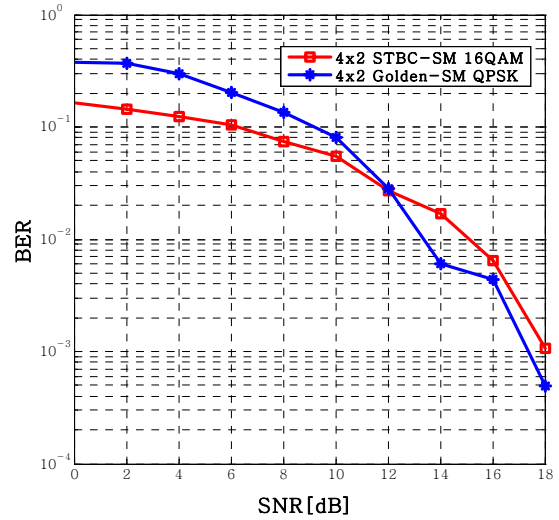


그림 5. 5 bits/s/Hz 에 대한 송신 안테나 4개, 수신 안테나 2개 일 때 STBC-SM와 Golden-SM 수신 성능 비교

Fig. 5. Reception performance for 4x2 STBC-SM and Golden-SM with a spectral efficiency of 5 bits/s/Hz.

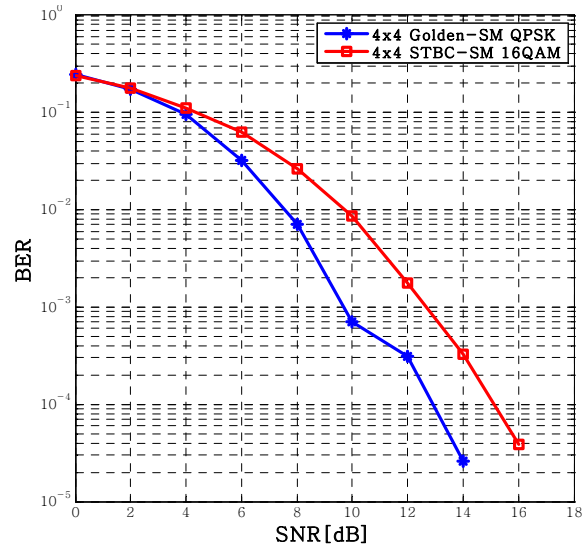


그림 6. 5 bits/s/Hz 에 대한 송신 안테나 4개, 수신 안테나 4개 일 때 STBC-SM와 Golden-SM 수신 성능 비교

Fig. 6. Reception performance for 4x4 STBC-SM and Golden-SM with a spectral efficiency of 5 bits/s/Hz.

성능은 기존의 STBC-SM 다중 안테나 시스템보다 1dB 우수하다.

그림 6은 송신 안테나 4개, 수신 안테나 4개를 가진 시스템에서 5bits/s/Hz 대역폭 효율에 대한 STBC-SM 다중 안테나 시스템과 Golden-SM 다중 안테나 시스템의 수신 성능을 나타낸다. BER(bit error rate)이 10^{-4}

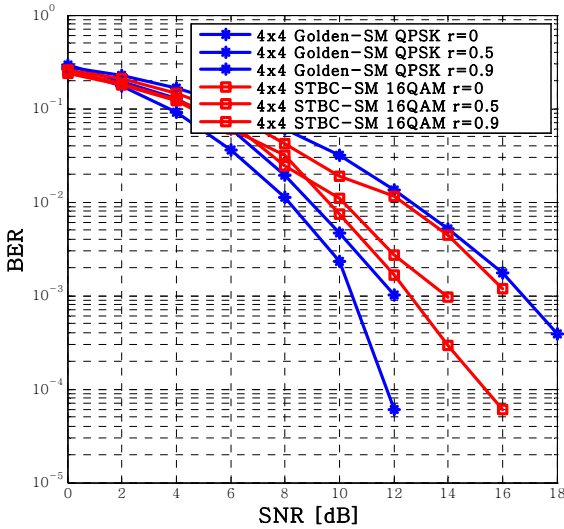


그림 7. 채널 간에 간섭 영향에 대한 STBC-SM과 Golden-SM 수신 성능비교

Fig. 7. Reception performance at 5 bits/s/Hz for STBC-SM and Golden-SM with $r=0, 0.5, 0.9$.

일 때 제안한 Golden-SM 다중 안테나 시스템의 수신 성능은 기존의 STBC-SM 다중 안테나 시스템보다 2dB 우수하다.

기존의 STBC-SM 다중 안테나 시스템은 4개의 송신 안테나를 사용하기 때문에 $c = 4$ 이고, 5bits/s/Hz 대역폭 효율을 얻기 위한 성상 다이어그램 크기는 식 (8)에 의하여 $M = 16$ 가 된다. 그리고 제안하는 Golden-SM 다중 안테나 시스템은 4개의 송신 안테나를 사용하기 때문에 $c = 4$ 이고, STBC-SM 다중 안테나 시스템과 동일한 대역폭 효율을 얻기 위한 성상 다이어그램 크기는 식 (16)에 의하여 $M = 4$ 가 된다.

그림 7은 채널 간에 간섭이 심해지는 환경에서 STBC-SM과 Golden-SM의 수신 성능을 나타낸다. 채널 상관 행렬 \mathbf{R} 은 수신기에서만 발생한다고 가정하였고, 각 성분은 균등하게 설정한다^[8]. 본 논문에서는 대역 효율을 5 bits/s/Hz 일 때 채널 상관 행렬의 성분 r 이 0, 0.5, 그리고 0.9에 대하여 수신 성능을 평가한다. STBC-SM은 16-QAM을 사용하고 Golden-SM QPSK를 사용한다. BER이 10^{-3} 일 때 채널 상관 계수 r 이 0.5이면 Golden-SM의 수신 성능은 STBC-SM보다 2dB 우수하다. 그러나 채널 상관 계수 r 가 0.9에 대해서는 Golden-SM 시스템의 수신 성능이 STBC-SM 시스템의 수신 성능보다 약 1dB 감소한다.

V. 결 론

실내 무선 통신 환경에서는 채널 간 간섭이 심하여 다중 안테나의 성능이 감소한다. 이를 해결하기 위하여 본 논문에서는 골든 부호를 기존 Basar의 STBC-SM 시스템에 적용하여 공간 변조 다중 안테나 시스템보다 대역폭 효율과 수신 성능을 향상 시키는 시스템을 제안하였다. 제안하는 시스템은 실내에서 근거리 무선 통신의 수신 성능을 향상시켜 Wi-Fi와 같은 실내 근거리 무선 통신의 고속화 흐름에 적합한 시스템이다.

REFERENCES

- [1] Myung Chul Park, Bong-Gyun Jo, Dong Seog Han "An LDC-based MU-MIMO System with Pre-coding for Interference Cancellation and Robust Reception", Journal of The Institute of Electronics Engineers of Korea, Vol. 50, No.4, April, 2013.
- [2] P. Wolniansky, G. Foschini, G. Golden, and R. Valenzuela, "V-BLAST: an architecture for realizing very high data rates over the rich-scattering wireless channel," in Proc. International Symp. Signals, Syst., Electron.(ISSSE'98), pp. 295-300, Pisa, Italy, Sep 1998.
- [3] S. M. Alamouti, "A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications" IEEE J. Sel. Areas Commun., VOL. 16, NO. 8, October 1998.
- [4] J.-C. Belfiore, G. Rekaya, and E. Viterbo, "The Golden code: a 2x2 full-rate space-time code with non-vanishing determinants," IEEE Trans. Inf. Theory, vol. 51, no. 4, pp. 1432-1436, April 2005.
- [5] B. Hassibi and B. M. Hochwald, "High-Rate Codes That Are Linear in Space and Time", IEEE Trans. Inform. Theory, VOL. 48, NO. 7, July 2002.
- [6] R. Mesleh, H. Haas, S. Sinanovic, C. W. Ahn, and S. Yun, "Spatial modulation," IEEE Trans. Veh. Technol., vol. 57, no. 4, pp. 2228-2241, July 2008.
- [7] E. Basar, U. Aygolu, E. Panayirci, and H. V. Poor, "Space-Time Block Coded Spatial Modulation," IEEE Tran. on Commun., vol. 59, no. 3, pp. 8230832, Mar. 2011.
- [8] S. L. Loyka and J. R. Mosig, "Channel capacity

of N-antenna BLAST architecture,” Electron. Lett., vol. 36, no. 7, pp. 660 - 661, Mar. 2000.

— 저 자 소 개 —



박 명 철(학생회원)
2013년 경북대학교 전자공학과
학사 졸업
2013년 경북대학교 전자공학과
석사 과정
<주관심분야 : MIMO, MU-MIMO,
SM>



한 동 석(평생회원)-교신저자
1987년 경북대학교
전자공학과 공학사
1989년 KAIST 전기 및
전자공학과 공학석사
1993년 KAIST 전기 및
전자공학과 공학박사
1987년 10월~1996년 8월 삼성전자 기술총괄 신
호처리 연구소 선임연구원
1996년 8월~현재 경북대학교 IT대학 교수
2006년 7월~2008년 7월 정보통신연구진흥원 디
지털 TV/방송사업단 단장
2011년~현재 경북대학교 IT·자동차 융합연구센
터장
<주관심분야 : 통신신호처리, 지능형 교통시스
템>