

# 4개의 송신 안테나를 갖는 3/4 비율의 주파수 공간 블록 부호 단일 측대 파형 SC FDMA 시스템<sup>+</sup>

(3/4-rate SFBC SSB SC FDMA System with 4 Transmit Antennas)

원 희 철<sup>1)\*</sup>  
(HuiChul Won)

**요 약** 주파수 전송 효율을 높이기 위하여 주파수 대역에서의 켈레 복소수 대칭 특성을 갖는 단일 측대 파형 전송 시스템의 연구가 이루어지고 있다. 또한, 직교 블록 부호(시공간 및 주파수 공간 블록 부호)를 활용한 전송 시스템의 다이버시티 성능 이득에 대하여 많은 연구가 진행되어 왔다. 본 논문에서는 4개의 송신 안테나를 갖는 3/4 비율의 주파수 공간 블록 부호 단일 측대 파형 SC(single carrier) FDMA(frequency division multiple access) 시스템을 구현한다. 3/4 비율의 4x4 직교 블록 부호를 적용함으로써 기존의 단일 안테나 기반 단일 측대 파형 SC FDMA 시스템과 2개의 송신 안테나를 이용한 2x2 주파수 공간 블록 부호 단일 측대 파형 SC FDMA 시스템보다 뛰어난 수신 성능을 확보할 수 있음을 실험 결과를 통해 확인할 수 있다.

**핵심주제어:** SC FDMA, 주파수 공간 블록 부호, 단일 측대 파형, 3/4 비율 직교 블록 부호, 다이버시티 성능 이득

**Abstract** In order to increase frequency transmission efficiency, single side band(SSB) transmission systems with the complex conjugate symmetry characteristics on a frequency domain have been studied. In addition, orthogonal block codes(space-time or space-frequency block code(SFBC)) for the diversity performance gain of transmission systems have been widely researched. In this paper, we implement a 3/4-rate SFBC SSB single-carrier(SC) frequency division multiple access(FDMA) system with 4 transmit antennas. It can be shown from the simulation results that the proposed SFBC SSB SC FDMA system using the 3/4-rate 4x4 orthogonal block code outperforms the conventional SSB SC FDMA system and the 2x2 SFBC SSB SC FDMA system with 2 transmit antennas.

**Keywords:** SC FDMA, SFBC, SSB, 3/4-rate orthogonal block code, diversity gain

## 1. 서 론

차세대 초고속 통신 표준 기술에 있어서, 저속 이동 시 100Gbps, 고속 이동 시 10Gbps의 데이터 전송률 요구사항을 충족하기 위하여 massive MIMO (Multi-input multi-output), 사용자 중심의 동적 셀 지원, 안테나/모바일 노드 간 협력 토폴로

\* Corresponding Author: hewon@daegu.ac.kr

+ 이 논문은 대구대학교 2018학술연구비 지원에 의해 연구되었음.

Manuscript received October 05, 2021 / revised November 10, 2021 / accepted November 29, 2021

1) 대구대학교 컴퓨터정보공학부

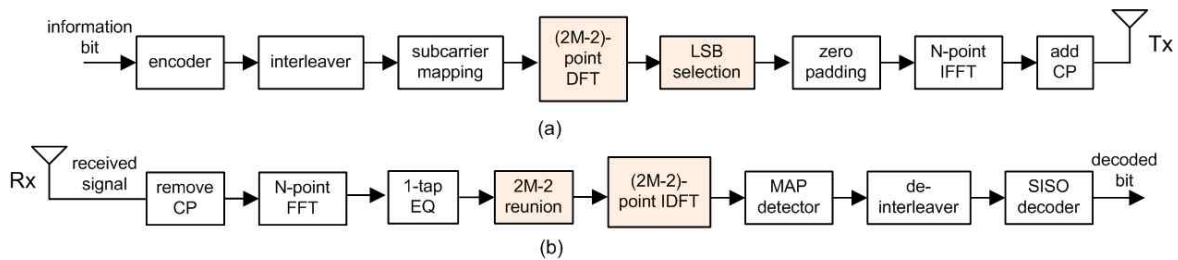


Fig. 1 SSB SC FDMA system with no diversity (a) transmitter (b) receiver

지 구성 및 라우팅 등 다양한 기법이 활발히 연구되고 있다. 고품질 3D 홀로그램 멀티미디어 서비스, 고품질 화상회의 서비스, 온/오프라인 공존 실감 서비스 등이 주요 서비스 후보로 거론되고 있으며, 사람 중심에서 사물 중심 통신으로 전환하기 위한 노력이 이루어지고 있다. 단말은 스마트폰에서 임베디드폰 및 pervasive 폰으로, 인프라는 programmable 기지국에서 intelligent 기지국으로 전환됨에 따라 관련 기술 개발이 활발히 추진되고 있다. 초소형 다중 안테나 및 고효율 에너지 하베스트 기술 기반의 미래 단말 기술에 대한 연구가 꾸준히 추진되고 있으며, 자동차, 조선, 건설 등 다양한 산업과 융합을 통한 신시장 창출 노력이 전개되고 있다 (Huang et al., 2020; Yang et al., 2019; Akyildiz et al., 2018; Hu et al., 2018; Won, 2011).

물리 계층에서는 초고속 통신 서비스를 지원하기 위하여 주파수 전송 효율 증대 기법을 꾸준히 연구하고 있다. 논의되고 있는 다양한 기법들 중에서, 단일 측대 파형(Single side band: SSB) 방식은 주파수 영역에서 절반의 대역 신호를 전송하여 전체 대역 신호를 획득할 수 있기 때문에 전송 효율 증대를 위하여 꾸준히 연구되고 있다. 최근에, 다중 레벨 PAM (Pulse amplitude modulation) 신호를 적용한 DFT (Discrete Fourier transform) 확산 SSB OFDM (Orthogonal frequency division multiplexing) 시스템과 SSB SC (Single carrier) FDMA(Frequency division multiple access) 시스템이 제안되기도 하였다 (Won, 2020; Lee and Ryu, 2018; Kim and Ryu, 2017; Umehira et al., 2015).

또한, 물리 계층에서는 수신 성능 개선을 위하여

수많은 등화 기법 및 오류 정정 부호, 다중 안테나 기법 등이 연구되고 있다. 특히, Alamouti에 의해 전송 효율 감소 없이 공간 다이버시티 이득을 100% 획득할 수 있는 간단한 2x2 직교 블록 부호가 제안된 이후 다중 안테나와 시간, 다중 안테나와 주파수 대역 간에 적용할 수 있는 다양한 송신 안테나 다이버시티 기법들(Space-time trellis code: STTC, space-time block code: STBC, space-frequency block code: SFBC)이 제안되었다 (Won, 2014; Jang et al., 2006; Tarokh et al., 1999; Alamouti, 1998).

본 논문에서는 4x4 직교블록부호를 적용한 SFBC SSB SC FDMA 시스템을 구현하고자 한다. Lee and Ryu(2018)에서 주파수 전송 효율을 2배로 증가시킨 SSB 방식을 제안하였고, Won(2020) 논문에서 SSB 방식을 SC FDMA 시스템에 접목하면서 2x2 직교블록부호를 사용하여 수신 성능을 개선시켰지만, 수신 성능 개선의 폭이 그다지 크지 않았다. 시스템 복잡도를 고려하되, 수신 성능을 대폭 향상시켜 기존 시스템 대비 신호 파워에 2배 이상 여유를 확보하고 잡음에 2배 이상 강한 성능을 보장할 목적으로, SSB 기반의 SC FDMA 시스템에 3/4 비율의 4x4 직교 블록 부호를 적용한 시스템을 제안한다. 2장과 3장에서는 SSB SC FDMA 시스템과 직교 블록 부호에 대하여 각각 간략히 소개하고, 4장에서는 3/4 비율의 4x4 직교 블록 부호를 적용한 SFBC SSB SC FDMA 시스템을 제안한다. 직교 블록 부호의 특징을 살린 선형적 등화식을 도출하고 5장을 통해서 제안된 시스템의 성능을 검증한다. 마지막으로, 6장에서 결론을 맺는다.

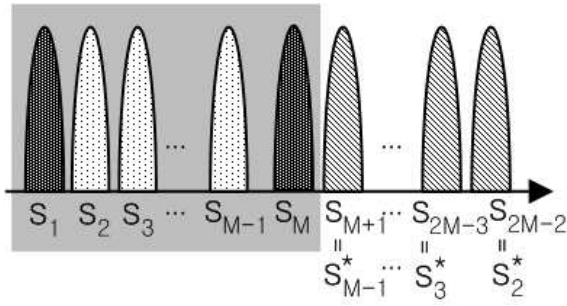


Fig. 2 The complex conjugate symmetry characteristic of the DFT spreaded symbols

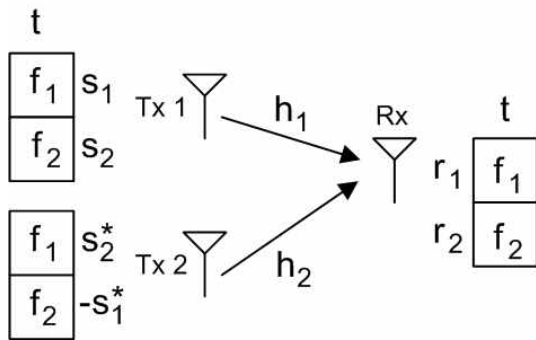


Fig. 3 SFBC scheme with 2 transmit antennas

## 2. SSB SC FDMA 시스템

Fig. 1은 SSB 기반의 SC FDMA 시스템의 송수신기 구조를 자세히 보여주고 있다. 실수 입력 데이터를 DFT 연산하게 될 경우 Fig. 2에서 볼 수 있듯이, 중간 주파수 대역 값( $s_M$ )을 기준으로 양쪽의 데이터 값이 켈레복소수 대칭이 된다는 특징을 이용하여, SSB 방식에서는 켈레복소수 대칭되는 뒷 부분의 데이터를 제외한 앞 부분의  $M$ 개 데이터만을 전송하고, 전송된  $M$ 개의 데이터만을 수신하여 전체 데이터를 켈레복소수 대칭을 통해 모두 복원하는 절차를 통해 전송 효율을 2배 가량 높일 수 있다.  $(2M-2)$ 개 전송 데이터를 DFT 연산한 후, 켈레복소수 대칭되는 뒷 부분을 제외한 앞 부분의  $M$ 개 데이터만을 골라내는 작업이 Fig. 1(a) 송신기 구조의 'LSB selection' 블록을 통해 진행

된다. 또한, 전송된  $M$ 개의 데이터를 수신하여 전체 데이터를 켈레복소수 대칭을 통해 모두 복원하는 작업은 Fig. 1(b) 수신기 구조의 '2M-2 reunion' 블록을 통해 이루어진다(Won, 2020; Lee and Ryu, 2018).

## 3. 직교 블록 부호

전송 신호를 직교 블록 부호에 맞게 처리하여 여러 개의 송신 안테나를 통해 송신하면 수신기에서 다이버시티 이득을 획득하여 수신 성능을 향상시킬 수 있다. 최초 제시된 블록 부호는 Eq. (1)과 Eq. (2)와 같으며, 각각 실수 기반의 2x2 코드와 4x4 코드이다.

$$\begin{pmatrix} s_1 & s_2 \\ -s_2 & s_1 \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$\begin{pmatrix} s_1 & s_2 & s_3 & s_4 \\ -s_2 & s_1 & -s_4 & s_3 \\ -s_3 & s_4 & s_1 & -s_2 \\ -s_4 & -s_3 & s_2 & s_1 \end{pmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{pmatrix} s_1 & s_2 \\ -s_2 & s_1 \end{pmatrix} \quad (3)$$

시간과 공간(안테나) 간에 적용하여 시공간 블록부호로 활용된 직교블록부호는 복소수 기반의 코드로서 Eq. (3)과 같으며, 최초 제안한 사람의 이름을 따서 Alamouti 구조라고 한다. Alamouti 구조는 전송 속도를 손해보지 않으면서 간단한 선형 방식으로 수신 신호를 복원할 수 있기 때문에 매우 각광받고 있다(Alamouti, 1998). 또한, 시간 대신에 주파수 대역 간에 Fig. 3과 같이 Alamouti 구조를 적용하면 주파수 공간 블록 부호가 되며 SFBC 기법이라고 한다. 첫 번째 안테나에서,  $s_1$ 과  $s_2$  신호를, 두 번째 안테나에서는  $s_2^*$ 와  $-s_1^*$  신호를 이웃하는 주파수 대역을 통해 전송한다. 이때, \*는 켈레복소수 표현이다. 수신국에서 해당 주파수 대역( $f_1, f_2$ )을 통해 수신한 신호를  $r_1$ 과  $r_2$ 라고 하면 Eq. (4)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} r_1 &= s_1 h_1 + s_2^* h_2 + n_1 \\ r_2 &= s_2 h_1 - s_1^* h_2 + n_2 \end{aligned} \quad (4)$$

이 때,  $h_i$  는  $i$ 번째 송신 안테나와 수신 안테나 사이의 채널 값이고,  $n_j$ 는 부채널  $f_j$ 에서의 잡음이다. 전송 신호 ( $s_1, s_2$ )를 위한 추정 값은 Eq. (4)로부터 아래와 같이 간단한 선형 방식을 도출하여 복원할 수

100% 보장하지는 않는 블록 부호들도 제안되었다. Eq. (7)과 Eq. (8)의 블록 부호는 3개의 안테나를 사용하고, Eq. (9)와 Eq. (10)의 블록 부호는 4개의 안테나를 이용하는 3/4 비율의 직교 블록 부호들이다(Tarokh et al., 1999; Murthy and Srigowri, 2012). 직교 블록을 나타내는 행렬에서, 각 열은 송신안테나에 할당되고 각 행은 전

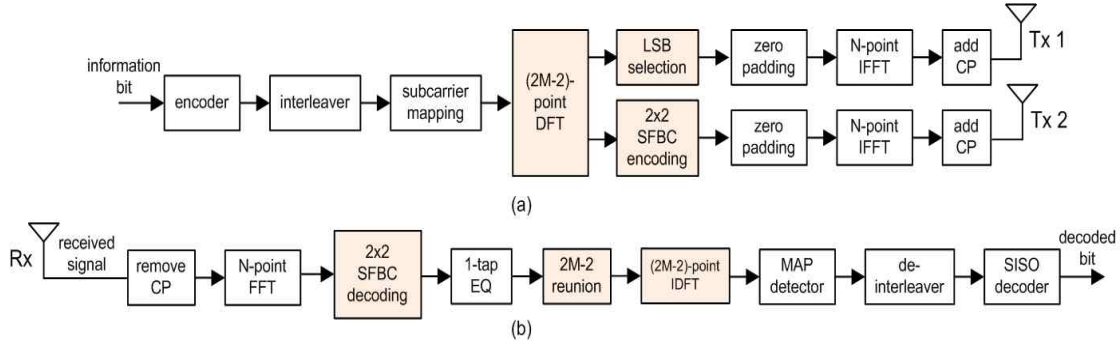


Fig. 4 2x2 SFBC SSB SC FDMA system with two antennas (a) transmitter (b) receiver

있다.

$$\begin{aligned} \hat{s}_1 &= \frac{h_1^* r_1 + h_2^* r_2}{|h_1|^2 + |h_2|^2} = s_1 + \frac{h_1^* n_1 + h_2^* n_2}{|h_1|^2 + |h_2|^2} \\ \hat{s}_2 &= \frac{h_1^* r_2 - h_2^* r_1}{|h_1|^2 + |h_2|^2} = s_2 + \frac{h_1^* n_2 - h_2^* n_1}{|h_1|^2 + |h_2|^2} \end{aligned} \quad (5)$$

한편, 전송 속도를 손해보지 않으면서 간단한 선형방식으로 복원할 수 있는 2x2 Alamouti 구조와 달리, 블록 부호의 크기가 커지는 경우 전송 속도를 손해보거나 선형방식 복원이 불가능해진다. 먼저, 전송 속도는 손해보지 않으나, 직교 성질이 무너져 선형 방식의 복원이 어려운 블록 부호를 QO(Quasi-orthogonal) 블록 부호라고 부르며, Eq. (6)과 같은 4x4 블록 부호가 대표적이다(Jafarkhani, 2001; Dalton et al., 2005).

$$\begin{pmatrix} s_1 & s_2 & s_3 & s_4 \\ * & * & * & * \\ -s_2^* & s_1^* & -s_4^* & s_3^* \\ * & * & * & * \\ -s_3^* & -s_4^* & s_1^* & s_2^* \\ s_4 & -s_3 & -s_2 & s_1 \end{pmatrix} \quad (6)$$

한편, 직교 성질을 유지하기 때문에 선형 방식의 간단한 복원이 가능하지만, 전송 속도를

송 채널에 할당되는 신호가 된다. Eq. (7)과 Eq. (8)에는 3개의 열이 있으므로 3개의 안테나에 각각 배정되며, 각 열에 포함되어 있는 4개의 값이 각각 4개의 전송 채널을 통해 전송된다. 이 때, 4개의 전송 채널을 통해 전송되는 4개의 값들이 3개의 신호( $s_1, s_2, s_3$ )를 변형, 조합하여 만들어지기 때문에 실제적으로 3/4 전송 효율이 된다. 마찬가지로, Eq. (9)와 Eq. (10)에는 4개의 열이 있으므로 4개의 안테나에 각각 배정되고, 각 열에 있는 4개의 전송 값들이 3개의 신호( $s_1, s_2, s_3$ )를 변형, 조합하여 만들어진 후 4개의 전송 채널을 통해 전송되기 때문에 마찬가지로 3/4 전송 효율이 된다.

$$\begin{pmatrix} s_1 & s_2 & \frac{s_3}{\sqrt{2}} \\ -s_2^* & s_1^* & \frac{s_3}{\sqrt{2}} \\ \frac{s_3^*}{\sqrt{2}} & \frac{s_3^*}{\sqrt{2}} & \frac{-s_1 - s_1^* + s_2 - s_2^*}{2} \\ \frac{s_3^*}{\sqrt{2}} & -\frac{s_3^*}{\sqrt{2}} & \frac{s_2 + s_2^* + s_1 - s_1^*}{2} \end{pmatrix} \quad (7)$$

$$\begin{pmatrix} s_1 & s_2 & s_3 \\ -s_2^* & s_1^* & 0 \\ s_3^* & 0 & -s_1^* \\ 0 & s_3^* & -s_2^* \end{pmatrix} \quad (8)$$

$$\begin{pmatrix} s_1 & s_2 & \frac{s_3}{\sqrt{2}} & \frac{s_3}{\sqrt{2}} \\ -s_2^* & s_1^* & \frac{s_3}{\sqrt{2}} & -\frac{s_3}{\sqrt{2}} \\ \frac{s_3^*}{\sqrt{2}} & \frac{s_3^*}{\sqrt{2}} & \frac{-s_1 - s_1^* + s_2 - s_2^*}{2} & \frac{-s_2 - s_2^* + s_1 - s_1^*}{2} \\ \frac{s_3^*}{\sqrt{2}} & -\frac{s_3^*}{\sqrt{2}} & \frac{s_2 + s_2^* + s_1 - s_1^*}{2} & \frac{-s_1 - s_1^* - s_2 + s_2^*}{2} \end{pmatrix} \quad (9)$$

Fig. 5의 시스템 구조는 본 논문에서 제안하는 3/4 비율의 SFBC SSB SC FDMA 시스템 송수신기이다. 2개의 송신 안테나를 사용하는 Fig. 4의 송신기 구조와 달리, Fig. 5에서 제시된 송신기는 4개의 송신 안테나를 사용한다. 또한, SFBC 인코딩을 위하여 Eq. (10)에서 제시된 3/4 비율의 4x4 직교 블록부호를 적용한다. 전송 신호들은 3개 단위로 묶여지고 Fig. 6과 같이, 각 송신안테나에 맞게 4개 단위로 부호화되며, 이 때 Eq. (10)의 3/4 비율의 4x4 직교 블록 부호의 각 행들과 동일하게 처리된다.

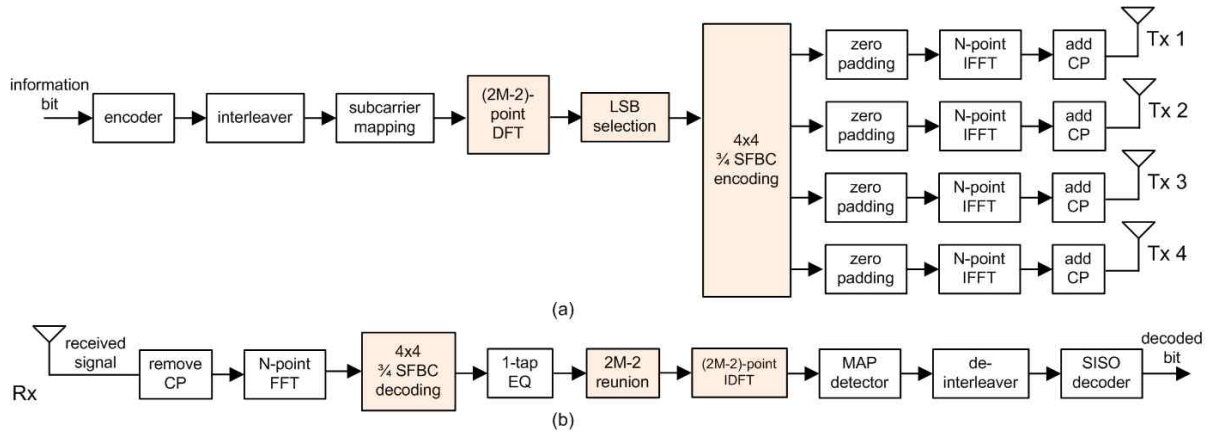


Fig. 5 3/4-rate SFBC SSB SC FDMA system with four antennas (a) transmitter (b) receiver

$$\begin{pmatrix} s_1 & s_2 & s_3 & 0 \\ -s_2^* & s_1^* & 0 & s_3 \\ -s_3^* & 0 & s_1^* & -s_2 \\ 0 & -s_3^* & s_2^* & s_1 \end{pmatrix} \quad (10)$$

### 4. 3/4 비율의 4x4 SFBC SSB SC FDMA 시스템

Fig. 4는 Won(2020)에서 제안된 2x2 SFBC SSB SC FDMA 시스템의 송수신기 구조이다. 송신기에서는 Eq. (3)의 Alamouti 구조를 사용하여 SFBC 인코딩하고, 수신기에서는 Eq. (5)와 같은 선형적인 복원 과정을 적용하여 SFBC 디코딩한다.

#### 4.1 3/4 비율의 4x4 SFBC 디코딩

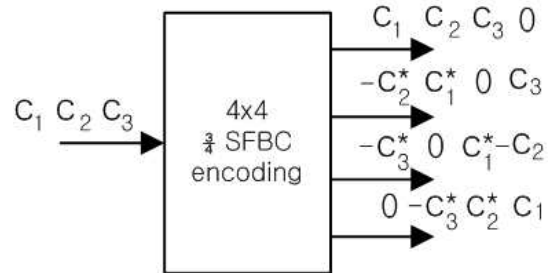


Fig. 6 3/4-rate 4x4 SFBC encoding

Fig. 5의 수신기 안테나를 통해 네 개의 주파수 대역( $f_1, f_2, f_3, f_4$ )을 통해 수신한 신호를 각각  $r_1, r_2, r_3, r_4$ 라고 하면 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned}
 r_1 &= c_1 h_1 - c_2^* h_2 - c_3^* h_3 + n_1 \\
 r_2 &= c_2 h_1 + c_1^* h_2 - c_3^* h_4 + n_2 \\
 r_3 &= c_3 h_1 + c_1^* h_3 + c_2^* h_4 + n_3 \\
 r_4 &= c_3 h_2 - c_2 h_3 + c_1 h_4 + n_4
 \end{aligned} \quad (11)$$

이 때,  $h_i$  는  $i$ 번째 송신 안테나와 수신 안테나 사이의 채널 값이고,  $n_i$ 는 부채널  $f_i$ 에서의 잡음이다.

첫 번째 전송 신호  $c_1$ 을 추정하기 위한 선형 방법을 도출하기 위하여 Eq. (11)의  $r_1, r_4$  각각에  $h_1^*, h_4^*$ 를 곱하고,  $r_2, r_3$  각각을 켈레복소수 변환해서  $h_2, h_3$ 을 곱하여 Eq. (12)를 도출한 후 좌변과 우변을 각각 더하면 Eq. (13)을 도출할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 h_1^* r_1 &= c_1 |h_1|^2 - c_2^* h_1^* h_2 - c_3^* h_1^* h_3 + h_1^* n_1 \\
 h_2^* r_2 &= c_3^* h_1^* h_2 + c_1 |h_2|^2 - c_3^* h_2^* h_4 + h_2^* n_2 \\
 h_3^* r_3 &= c_3^* h_1^* h_3 + c_1 |h_3|^2 + c_2^* h_3^* h_4 + h_3^* n_3 \\
 h_4^* r_4 &= c_3 h_2 h_4^* - c_2 h_3 h_4^* + c_1 |h_4|^2 + h_4^* n_4
 \end{aligned} \quad (12)$$

두 번째 전송 신호  $c_2$ 를 추정하기 위한 선형 방법을 도출하기 위하여 Eq. (11)의  $r_2, r_4$  각각에  $h_1^*, -h_3^*$ 를 곱하고,  $r_1, r_3$  각각을 켈레복소수 변환해서  $-h_2, h_4$ 를 곱하여 Eq. (15)를 도출한 후 좌변과 우변을 각각 더하면 Eq. (16)을 도출할 수 있다.

$$\begin{aligned}
 -h_2 r_1^* &= -c_1^* h_1^* h_2 + c_2 |h_2|^2 + c_3 h_2 h_3^* - h_2^* n_1 \\
 h_1^* r_2 &= c_2 |h_1|^2 + c_1^* h_1^* h_2 - c_3^* h_1^* h_4 + h_1^* n_2 \\
 h_4^* r_3 &= c_3^* h_1^* h_4 + c_1 h_3^* h_4 + c_2 |h_4|^2 + h_4^* n_3 \\
 -h_3^* r_4 &= -c_3 h_2 h_3^* + c_2 |h_3|^2 - c_1 h_3^* h_4 - h_3^* n_4
 \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned}
 -h_2 r_1^* + h_1^* r_2 + h_4^* r_3 - h_3^* r_4 \\
 &= c_2 (|h_1|^2 + |h_2|^2 + |h_3|^2 + |h_4|^2) \\
 &\quad - h_2^* n_1 + h_1^* n_2 + h_4^* n_3 - h_3^* n_4
 \end{aligned} \quad (16)$$

Eq. (16)으로부터, 두 번째 전송 신호  $c_2$  추정을 위한 선형 방식을 도출할 수 있다.

Table 1 Hardware and computational complexity comparison

	Hardware and computational complexity		
	SSB SC FDMA w/ No Diversity	2x2 SFBC SSB SC FDMA	Proposed 4x4 SFBC SSB SC FDMA
Tx	IFFT x1 Antenna module x1	IFFT x2 Antenna module x2	IFFT x4 Antenna module x4
Rx	$\hat{s}_1 = \frac{r_1}{h_1}$	Eq. (5)	Eq. (14), (17), (20)

Table 2 Data transmission efficiency comparison

Number of transmission subcarriers (M)	Number of the transmitted symbols (data transmission efficiency)		
	SSB SC FDMA w/ no diversity	2x2 SFBC SSB SC FDMA	Proposed 4x4 SFBC SSB SC FDMA
64	64 (1.0)	64 (1.0)	48 (0.75)

$$\begin{aligned}
 h_1^* r_1 + h_2^* r_2 + h_3^* r_3 + h_4^* r_4 \\
 &= c_1 (|h_1|^2 + |h_2|^2 + |h_3|^2 + |h_4|^2) \\
 &\quad + h_1^* n_1 + h_2^* n_2 + h_3^* n_3 + h_4^* n_4
 \end{aligned} \quad (13)$$

Eq. (13)으로부터, 첫 번째 전송 신호  $c_1$  추정을 위한 선형 방식을 도출할 수 있다.

$$\hat{c}_1 = \frac{h_1^* r_1 + h_2^* r_2 + h_3^* r_3 + h_4^* r_4}{|h_1|^2 + |h_2|^2 + |h_3|^2 + |h_4|^2} \quad (14)$$

$$\hat{c}_2 = \frac{-h_2 r_1^* + h_1^* r_2 + h_4^* r_3 - h_3^* r_4}{|h_1|^2 + |h_2|^2 + |h_3|^2 + |h_4|^2} \quad (17)$$

마지막으로, 세 번째 전송 신호  $c_3$ 을 추정하기 위한 선형 방법도 비슷한 방식으로 도출할 수 있다. Eq. (11)의  $r_3, r_4$  각각에  $h_1^*, h_2^*$ 를 곱하고,  $r_1, r_2$  각각을 켈레복소수 변환해서  $-h_3, -h_4$ 를 곱하여 Eq. (18)을 도출한 후 좌변과 우변을 각각 더하면 Eq. (19)가 된다.

$$\begin{aligned}
 -h_3r_1^* &= -c_1^*h_1^*h_3 + c_2h_2^*h_3 + c_3|h_3|^2 - h_3n_1^* & (18) \\
 -h_4r_2^* &= -c_2^*h_1^*h_4 - c_1h_2^*h_4 + c_3|h_4|^2 - h_4n_2^* \\
 h_1^*r_3 &= c_3|h_1|^2 + c_1^*h_1^*h_3 + c_2^*h_1^*h_4 + h_1^*n_3 \\
 h_2^*r_4 &= c_3|h_2|^2 - c_2h_2^*h_3 + c_1h_2^*h_4 + h_2^*n_4
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 -h_3r_1^* - h_4r_2^* + h_1^*r_3 + h_2^*r_4 & & (19) \\
 = c_3(|h_1|^2 + |h_2|^2 + |h_3|^2 + |h_4|^2) & \\
 - h_3n_1^* - h_4n_2^* + h_1^*n_3 + h_2^*n_4 &
 \end{aligned}$$

Eq. (19)로부터, 세 번째 전송 신호  $c_3$  추정을 위한 선형 방식을 도출할 수 있다.

$$\hat{c}_3 = \frac{-h_3r_1^* - h_4r_2^* + h_1^*r_3 + h_2^*r_4}{|h_1|^2 + |h_2|^2 + |h_3|^2 + |h_4|^2} \quad (20)$$

본 논문에서 제안한 시스템의 4x4 SFBC 디코딩 과정은 Eq. (14), Eq. (17) 및 Eq. (20)의 선형 방식을 적용하여 동작한다. 그 결과, 각 추정 신호는 Eq. (21)과 같이, 각 전송신호와 변형 잡음의 합으로 얻어지게 되고, 변형 잡음은 원 잡음신호가 페이딩 채널들의 안정적인 합에 의해 증대되는 형태로 변형되어 페이딩 채널의 다이버시티 효과가 얻어짐으로써 수신 성능이 크게 개선된다.

$$\begin{aligned}
 \hat{c}_1 &= c_1 + \frac{h_1^*n_1 + h_2^*n_2 + h_3^*n_3 + h_4^*n_4}{|h_1|^2 + |h_2|^2 + |h_3|^2 + |h_4|^2} & (21) \\
 \hat{c}_2 &= c_2 + \frac{-h_2n_1^* + h_1^*n_2 + h_4n_3^* - h_3n_4^*}{|h_1|^2 + |h_2|^2 + |h_3|^2 + |h_4|^2} \\
 \hat{c}_3 &= c_3 + \frac{-h_3n_1^* - h_4n_2^* + h_1^*n_3 + h_2^*n_4}{|h_1|^2 + |h_2|^2 + |h_3|^2 + |h_4|^2}
 \end{aligned}$$

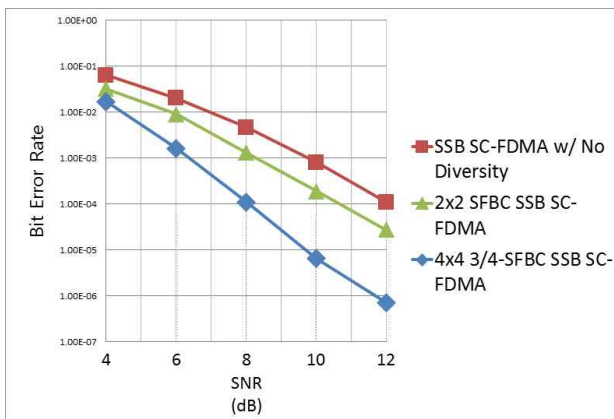


Fig. 7 BER performance

## 4.2 복잡도 비교

본 논문에서 제안된 시스템은 4개의 송신안테나를 사용하여 4x4 블록부호를 적용하기 때문에 장비 및 계산복잡도가 늘어난다. Table 1은 기존 단일 안테나를 갖는 SSB SC FDMA 시스템 및 2x2 SFBC SSB SC FDMA 시스템과 비교하여 복잡도를 보여주고 있다. Fig. (1), Fig. (4) 및 Fig. (5)에서 볼 수 있듯이, 송신기 구조에서는 IFFT 블록과 최후단의 안테나 모듈이 안테나 개수에 선형적으로 비례하여 증가한다. 또한, 수신기 구조에서는 블록부호를 디코딩하는 방식의 차이에 의해 연산량이 결정되며, Eq. (5), Eq. (14), Eq. (17) 및 Eq. (20)에 의해 마찬가지로 안테나 개수에 선형적으로 비례하여 연산량이 늘어난다.

## 5. 실험 결과

본 논문에서는 BPSK (Binary phase shift keying) 방식을 기반으로 7 제한 길이의 1/2 비율 길쌈부호와 5-랜덤 인터리버를 적용하여 시뮬레이터를 구현하였다. 채널 설정에 있어서, 6-tap TU (Typical urban) 모형을 사용하였고 0.001 값으로 정규화된 도플러 주파수 값을 설정하였다. 채널 추정은 완벽하게 이루어진다고 가정하였으며, 전체 256개 부채널 중에서 64개의 부채널을 사용하도록 설정하였다(M=64). 수신 성능 비교에 앞서, 데이터 전송효율을 비교해 보면 Table 2와 같다. 제안된 4x4 SFBC SSB SC FDMA 시스템의 경우, 직교 성질을 확보하도록 설계된 3/4 비율의 블록 부호를 채택하였기에 64개의 전송 부채널을 모두 사용하되, 실제 48개의 심볼이 블록 부호화되어 64개의 전송 부채널을 통해 전송되므로 기존 시스템 대비 0.75의 데이터 전송효율을 갖는다.

Fig. 7과 Fig. 8은 각각 SFBC SSB SC FDMA 시스템의 BER(Bit error rate) 및 SER (Symbol error rate) 성능 결과를 보여주고 있다. 정사각형 모양의 실선은 단일 안테나를 갖는 SSB SC FDMA 시스템 성능 결과이고, 정삼각형 모양의 실선은 두 개의 안테나를 사용하여 Alamouti 구조

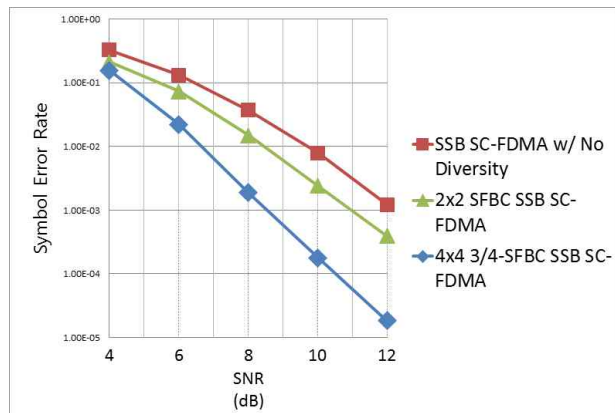


Fig. 8 SER performance

를 적용한 2x2 SFBC SSB SC FDMA 시스템의 성능 결과를 보여주고 있다. 마지막으로, 마름모 모양의 실선은 본 논문에서 제안한 3/4 비율의 4x4 SFBC SSB SC FDMA 시스템의 성능이다. 다중 안테나를 사용하여 직교 블록 부호를 적용하면 단일 안테나 기반의 시스템에 비해 성능이 개선됨을 확인할 수 있고, 2x2 Alamouti 구조를 사용하는 경우보다는 4x4 직교블록부호를 사용하여 SFBC를 적용하는 경우가 송신 다이버시티 이득이 더 크기 때문에 수신 성능이 훨씬 개선됨을 시뮬레이션 성능 결과를 통해 확인할 수 있다.

## 6. 결론

본 논문에서는 4개의 송신 안테나 기반의 3/4 비율의 SFBC SSB SC FDMA 시스템을 제안하였다. 3/4 비율의 4x4 직교 블록 부호를 채택하여 SFBC 인코딩을 적용하였고, 그에 따른 선형 방식의 SFBC 디코딩 절차를 수식으로 도출하여 최초로 구현하였으며, 시뮬레이션을 통해 성능 개선 효과를 검증하였다. 제안된 시스템은  $10^{-4}$  BER 수준과  $10^{-3}$  SER 수준에서 SSB SC FDMA 대비 3.5dB 이상, 2x2 SFBC SSB SC FDMA 대비 2.5dB 이상 SNR이 개선되기 때문에 신호 파워에 2배 이상 여유가 생기며 잡음에 2배 이상 강한 성능을 확보할 수 있다. 그 결과, 높은 시스템 성능 및 QoS (Quality of service)를 요구하

는 차세대 광대역 이동통신 및 IEEE 802.11 기반의 WLAN(Wireless local area network) 시스템 등에서 유용하게 활용될 수 있을 것으로 생각된다.

## References

- Yang P. et al. (2019), 6G Wireless Communications: Vision and Potential Techniques, *IEEE Networks*, vol. 33, no. 4, pp. 70-75, July  
DOI: 10.1109/MNET.2019.1800418
- Akyildiz I. F. et al. (2018), Combating the Distance Problem in the Millimeter Wave and Terahertz Frequency Bands, *IEEE Communications Magazine*, vol. 56, no. 6, pp. 102-108, June  
DOI: 10.1109/MCOM.2018.1700928
- Huang C. et al. (2020), Holographic MIMO Surfaces for 6G Wireless Networks: Opportunities, Challenges, and Trends, *IEEE Wireless Communications*, vol. 27, no. 5, pp. 118-125, Oct.  
DOI: 10.1109/MWC.001.1900534
- Hu S. et al. (2018), Beyond Massive MIMO: The Potential of Positioning with Large Intelligent Surfaces, *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 66, no. 7, pp. 1761-1774, April  
DOI: 10.1109/TSP.2018.2795547
- Won, H. (2011). MRC MMSE Equalization for SC-FDE in Amplify-and-Forward Relaying Networks, *Journal of the Korea Industrial Information Systems Research*, 16, 19-26. April  
DOI: 10.9723/jksiis.2011.16.4.019
- Won H. (2020). Multiple-Relay-assisted SSB SFBC SC-FDMA Transmission System, *Journal of the Korea Industrial Information Systems Research*, vol. 25, no. 2, pp. 29-37. April  
DOI: 10.9723/jksiis.2020.25.2.029



Lee J. and Ryu H. (2018). Performance Evaluation of DFT Spreading SSB WR-OFDM System Using Multi-level PAM Modulation, *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, 43, 2032-2040.

DOI: 10.7840/KICS.2018.43.12.2032

Kim B. and Ryu H. (2017). Design and Performance Evaluation of Improved DFT-s-SSB OFDM, *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, 42, 2086-2092.

DOI: 10.7840/KICS.2017.42.11.2086

Umehira M. et al. (2015). Performance Evaluation of SSB Transmission of DFTs-OFDM Using Multi-level BPSK through Nonlinear HPA, *Proceedings of 81<sup>st</sup> IEEE Vehicular Technology Conference*, IEEE, Glasgow, UK, July.

DOI: 10.1109/VTCSpring.2015.7146006

Alamouti S. (1998). A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications, *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, 16, 1451-1458.

DOI: 10.1109/49.730453

Tarokh V., Jafarkhani H. and Calderband A. (1999). Space-Time Block Codes from Orthogonal Designs, *IEEE Trans. Information Theory*, 45, 1456-1467.

DOI: 10.1109/18.771146

Jafarkhani H. (2001), A Quasi-orthogonal Space-time Block Code, *IEEE Trans. Communications*, vol. 49, no. 1, pp. 1-4, Jan.

DOI: 10.1109/26.898239

Dalton L. A. and Georghiades C. N. (2005), A Full-rate, Full-diversity Four-antenna Quasi-orthogonal Space-time Block Code, *IEEE Trans. Wireless Communications*, vol. 4, no. 2, pp. 363-366, March

DOI: 10.1109/TWC.2004.842945

Jang J., Won H. and Im G. (2006). Cyclic Prefixed Single Carrier Transmission with

SFBC over Mobile Wireless Channels, *IEEE Signal Processing Letters*, 13, 261-264.

DOI: 10.1109/LSP.2006.870374

Murthy N. S. and Srigowri S. (2012), Complex Orthogonal Space-time Block Codes Rates 3/7, 4/8 and 6/8 for 3, 4 and 4 Transmit Antennas in Space Time Coding, *2012 Int. Conf. Devices, Circuits and Systems(ICDCS)*, March

DOI: 10.1109/ICDCSyst.2012.6188645

Won, H. (2014). Space-frequency Block Coded OFDMA Transmission System Using Multiple Relays for Shadow Area, *Journal of the Korea Industrial Information Systems Research*, 19, 1-8. April

DOI: 10.9723/jksiis.2014.19.4.001



**원 희 철 (HuiChul Won)**

- 종신회원
- POSTECH 전자전기공학과 공학사
- POSTECH 전자전기공학과 공학석사
- POSTECH 전자컴퓨터공학부

공학박사

- 삼성전자 책임연구원
- (현재) 대구대학교 컴퓨터정보공학부 교수
- 관심분야: 차세대 이동통신시스템