Journal of the Korea Industrial Information Systems Research Vol.25 No.2, Apr. 2020 : 29-37
http://dx.doi.org./10.9723/jksiis.2020.25.2.029 ISSN:1229-3741

다중중계기 기반의 SSB SFBC SC-FDMA 시스템+

(Multiple-Relay-assisted SSB SFBC SC-FDMA Transmission System)

원 희 철[1)*]
(HuiChul Won)

요 약 본 논문에서는 중계기를 활용하여 직교 블록 부호화된 SSB (Single side band) SFBC (Space frequency block code) SC (Single carrier)-FDMA (Frequency division multiple access) 시스템을 제안하고, 수신국과 중계기 간의 SNR (Signal-to-noise power ratio)값을 기준으로 SSB SFBC SC-FDMA 시스템 성능을 측정한다. 잘 알려진 바와 같이. 중계기의 복원된 전송 신호를 이용하여 블록 부호를 생성한 후 수신국으로 재전송함으로써 중계기 기반 전송 시스템의 수신 성능을 향상시킬 수 있다. 본 논문에서는 SSB 시스템의 켤레 복소수 대칭 특성을 이용하여 블록 부호를 구현하도록 제안함으로써 시스템 계산 복잡도는 크게 증가시키지 않으면서 중계기 기반의 SSB SC-FDMA 전송 시스템의 성능을 향상시킬 수 있다. 본 논문에서 제안한 다중 중계기 기반의 SSB SFBC SC-FDMA 전송 시스템의 SNR 성능이 단일 중계기를 활용한 SSB SC-FDMA 전송 시스템보다 10^{-2} SER(Symbol error rate) 수준에서 4 dB 이상 향상되는 것을 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있다.

핵심주제어: 중계기, 주파수 공간 블록 부호, 단일 측대 파형, SC-FDMA, 다이버시티 이득

Abstract This paper proposes a multiple-relay-assisted single side band (SSB) space frequency block code (SFBC) single carrier (SC)-frequency division multiple access (FDMA) system and measures the performance of SSB SFBC SC-FDMA transmission system with the signal-to-noise power ratio SNR) between relays and a destination station. As we know, the performance of relay-assisted transmission systems can be easily improved by re-transmitting to the destination station after applying block code to the recovered transmitted signals of relays. In this paper, the performance improvement of the relay-assisted SSB SC-FDMA system can be obtained without any significant increase of system computational complexity by implementing block code with the complex conjugates symmetric characteristic of SSB system. The simulation result shows that the SNR performance of the proposed multiple-relay-assisted SSB SFBC SC-FDMA system is about 4 dB better than the performance of the single-relay-assisted SSB SC-FDMA system at the symbol error rate of 10^{-2}.

Keywords: Relay, SFBC, SSB, SC-FDMA, Diversity gain

* Corresponding Author: hcwon@daegu.ac.kr
+ 이 논문은 대구대학교 2017학술연구비 지원에 의해 연구되었음.
Manuscript received March 19, 2020 / revised April 09, 2020 / accepted April 14, 2020
1) 대구대학교 컴퓨터정보공학부

1. 서 론

중계기 (Relay)를 이용한 멀티홉 (Multi-hop) 전송은 개별 링크의 송신 거리를 줄여줌으로써 전송 신뢰도를 향상시킬 수 있는 기술로 각광받고 있다. 셀룰러 무선통신시스템에 중계기를 적용하면 전송 커버리지 확장과 음영 지역 해소, 전송률 향상 효과를 얻을 수 있다. 중계기가 신호를 처리하는 방식은 신호를 수신한 후 단순히 신호 크기를 증폭하여 수신국에 전달하는 AF (Amplify and forward) 방식과, 신호를 복호한 후 수신국에 전달하는 DF (Decode and forward) 방식으로 구분되는데, 복호 과정에서 잡음을 제거하는 DF 방식이 더 좋은 성능을 나타낸다 (Pabst et al., 2004; Yune et al., 2008; Won, 2011).

OFDM (Orthogonal frequency division multiplexing) 통신 방식은 구조가 상대적으로 간단하고 주파수 선택적 페이딩 채널환경에서 우수한 성능을 제공한다. OFDMA (Orthogonal frequency division multiple access)는 OFDM 기반 다중 사용자 접속 시스템으로, 여러 사용자들이 OFDM 통신 방식의 부반송파들을 서로 분할하여 정보를 전송하는데 사용한다 (Nee et al., 1999; Nee and Prasad, 2000; Kim et al., 2003; Kwon et al., 2005). 한편, SC (Single carrier)-FDE (Frequency domain equalization) 통신 방식은 OFDM 시스템의 송신부에 포함된 DFT (Discrete Fourier transform)를 수신부로 옮긴 구조와 유사하기 때문에 OFDM과 거의 동일한 수신 성능과 시스템 복잡도를 갖는다. SC-FDMA (Frequency division multiple access)는 SC-FDE 통신 방식을 부반송파 방식으로 확장한 전송 시스템이다. OFDM 방식과 SC-FDE 방식이 매우 유사하기 때문에, OFDMA 시스템과 SC-FDMA 시스템 역시 유사한 수신 성능과 시스템 복잡도를 가지며, 차세대 광대역 통신 시스템의 기본적인 전송 방식으로 폭넓게 연구되고 있다 (Falconer et al., 2002; Won and Kim, 2009).

단일 측대 파형 (Single side band: SSB) 변조 방식은 아날로그 통신에 주로 사용된 방식으로, 주파수 영역에서 절반의 신호 대역만을 전송하여 2배의 전송 효율을 획득할 수 있다. 전송 신호를 푸리에 변환하면 중심주파수를 기준으로 아래쪽의 LSB (Lower side band) 신호의 켤레복소수 대칭 형태로 윗 쪽의 USB (Upper side band) 신호가 형성되기 때문에, 송신부에서 LSB (또는 USB) 신호를 전송하고, 수신부에서 켤레복소수 대칭을 이용하여 USB (또는 LSB) 신호를 획득하는 절차를 따른다. 최근에 다중 레벨의 PAM (Pulse amplitude modulation) 신호를 사용하는 디지털 전송 시스템에 아날로그 방식인 SSB를 적용한 DFT 확산 SSB OFDM 및 SC-FDMA 시스템이 제안되기도 하였다 (Umehira et al., 2015; Kim and Ryu, 2017; Lee and Ryu, 2018; Won, 2019).

OFDMA 및 SC-FDMA 전송 시스템에서는 페이딩 채널 특성을 극복하여 수신 성능을 향상시키기 위하여 블록 부호를 적용하여 송신 다이버시티 이득을 획득한다. 블록 부호는 다중 송신 안테나를 통해 적용할 수도 있고 다중 중계기를 이용하여 적용하기도 한다. 통신 기지국에서는 일반적으로 Fig. 1(a)처럼, 다중 송신 안테나를 사용하여 다중 경로를 획득하고 블록 부호를 적용한다. 그러나, 휴대폰과 같은 통신 단말기에서는 휴대폰 크기 및 복잡도 한계로 인해 송신 안테나 간 거리를 일정 범위 이상 띄우는 것이 쉽지 않기 때문에 Fig. 1(b)처럼 중계기를 활용하기도 한다. 다만, 수신국이 셀 커버리지 범위를 벗어나 위치하거나 음영 지역에 있는 경우에는 Fig. 1(c)처럼 다중 경로 확보에 실패할 수 있기 때문에

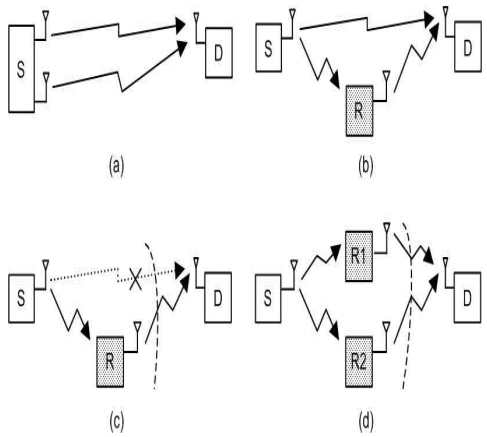

Fig. 1 (a) Two Paths from Two Transmit Antennas, (b) Two Paths from a Relay (R) and a Source Station (S), (c) Single Path from a Relay (R), (d) Two Paths from Two Relays (R1, R2)

Fig. 1(d)처럼 다중 중계기를 활용하는 것이 보다 안정적이다 (Alamouti, 1998; Tarokh et al., 1999; Al-Dhahir, 2001; Jang et al., 2006; Ueng et al., 2013; Won, 2014).

본 논문에서는 기본적인 SSB SC-FDMA 시스템을 구현하여 성능을 측정한 후, 다중 중계기를 활용하여 블록 부호(특히, 주파수 공간 블록 부호 (Space frequency block code: SFBC))를 적용함으로써 송신 다이버시티 이득을 추가로 획득하고자 한다. 이를 위하여 다중 중계기 기반의 SSB SFBC SC-FDMA 시스템을 최초로 제안하고 시뮬레이션을 통해 성능 검증을 진행한다. 2장과 3장에서는 기존에 알려져 있는 다중 중계기를 활용한 SFBC 기법과 SSB SC-FDMA 전송시스템에 대하여 각각 설명하고 4장에서는 본 논문에서 제안한 다중 중계기 기반의 SSB SFBC SC-FDMA 전송시스템에 대하여 설명한다. 5장에서 성능 검증을 위한 시뮬레이션 결과를 제시하고, 6장에서 결론을 맺는다.

2. 중계기를 활용한 SFBC 기법

2개의 송신 안테나에 적용하는 SFBC 기법은 Fig. 2처럼, t_0 심볼 구간에서 2개의 송신 안테나 및 이웃하는 두 개의 주파수 대역(f_0, f_1)에 직교 블록 코드를 적용한다. 첫 번째 안테나의 경우, s_0과 s_1 신호를 이웃하는 두 주파수 대역을 통해 전송하고, 두 번째 안테나에서는 s_1*와 $-s_0$* 신호를 각각 전송한다. 이때, *는 켤레복소수를 의미한다. 수신국에서 이웃하는 두 주파수 대역(f_0, f_1)을 통해 수신한 신호를 각각 r_0과 r_1이라고 하면 식(1)과 같이 표현된다.

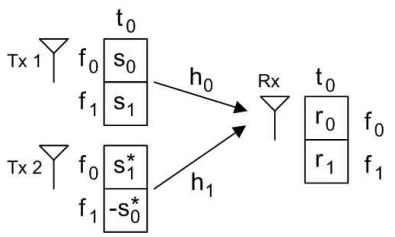

Fig. 2 SFBC with Two Transmit Antennas

$$r_0 = s_0 h_{0,0} + s_1^* h_{1,0} + n_0$$
$$r_1 = s_1 h_{0,1} - s_0^* h_{1,1} + n_1 \quad (1)$$

이 때, $h_{i,j}$ 는 수신 안테나와 i번째 송신 안테나 간의 f_j 부채널에서의 채널값이고, n_j는 f_j 부채널에서 더해지는 잡음이다.

이웃하는 주파수 대역에서의 채널 특성이 일정 ($h_i \equiv h_{i,0} = h_{i,1}$, i=0,1) 하다고 가정하면 전송 신호 (s_0, s_1)를 위한 추정 값은 식(2)와 같은 복원 과정으로 쉽게 얻을 수 있다.

$$\hat{s}_0 = \frac{h_0^* r_0 + h_1 r_1^*}{|h_0|^2 + |h_1|^2}, \ \hat{s}_1 = \frac{h_0^* r_1 - h_1 r_0^*}{|h_0|^2 + |h_1|^2} \quad (2)$$

또한, 식 (2)에 식 (1)을 대입하면, 추정 신호는 식 (3)과 같이 원 전송신호와 변형된 잡음의 합으로 얻어지며, 이때 변형된 잡음은 페이딩 채널의 다이버시티 효과가 반영되어 수신 성능 개선 효과로 이어진다.

$$\hat{s}_0 = s_0 + \frac{h_0^* n_0 + h_1 n_1^*}{|h_0|^2 + |h_1|^2}, \ \hat{s}_1 = s_1 + \frac{h_0^* n_1 - h_1 n_0^*}{|h_0|^2 + |h_1|^2} \quad (3)$$

한편, Fig. 3(a)와 Fig. 3(b)와 같이 통신서비스(커버리지) 밖에 수신국이 있거나 지형지물에 의해 음영지역 안에 수신국이 있는 경우에는 2개의 송신 안테나 대신 2개의 중계기를 이용하여 SFBC 기법을 적용하는 것이 효과적이며, Fig. 3(c)처럼 2-슬롯 단위의 중계 프로토콜을 적용할 수 있다. 첫 번째 슬롯에서는 송신국(S)이 두 개의 이웃하는 주파수 대역으로 s_0과 s_1 신호를 전송한다. 두 번째 슬롯에서는 중계기(R1, R2)에서 송신국이 전송한 신호를 복호한 후 직교 블록 코드를 적용하여 수신국(D)으로 재전송하면 수신국에서 다이버시티 이득을 얻게 된다.

3. DFT 확산 SSB SC-FDMA 시스템

신호 처리에 있어서, 실수 값을 입력하여 DFT 연산을 수행하면 Fig. 4와 같이, 중간 값을 중심으로 DFT 결과는 켤레복소수 대칭이 되는 특성이 있다 (Oppenheim and Schafer, 1989). 2M개 값을 입력데이터로 사용하면, LSB 신호 (앞쪽 낮은 대역 M개 데이터)와 USB 신호 (뒷쪽 높은 대역 M

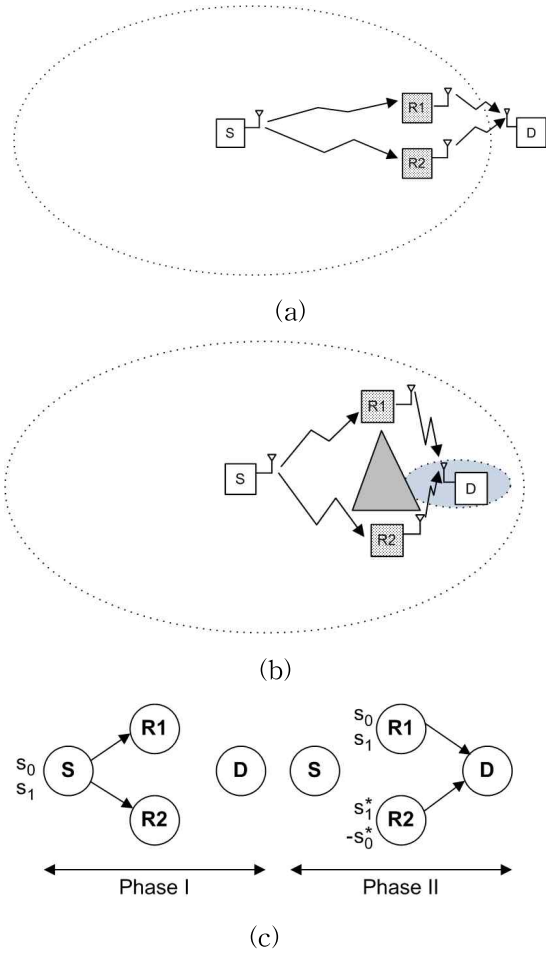

Fig. 3 (a) Relays for Coverage Extension, (b) Relays for Shadow Area, (c) 2-slot Relaying Protocol for SFBC

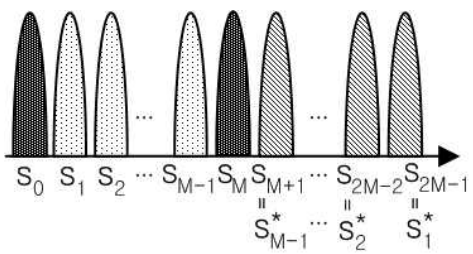

Fig. 4 Characteristic of Simbols, which are Spreaded after DFT

개 데이터)로 구분되고, LSB 신호의 맨 처음 값 (S_0), USB 신호의 맨 처음 값 (S_M) 이외의 전체 나머지 값들은 식 (4)처럼 켤레복소수 대칭 관계를 형성한다.

$$\begin{aligned} s_{M+1} &= s^*_{M-1} \\ s_{M+2} &= s^*_{M-2} \\ &\vdots \\ s_{2M-2} &= s^*_2 \\ s_{2M-1} &= s^*_1 \end{aligned} \tag{4}$$

식 (4)에서 알 수 있듯이, 각각의 USB 신호 값은 각각의 대칭하는 LSB 신호값의 켤레복소수를 취하면 쉽게 얻을 수 있다. 따라서, 송신기에서 어느 한쪽 대역 신호 (LSB 또는 USB)만을 전송하더라도 수신기에서는 Eq. (4)의 켤레복소수 대칭 관계를 이용하여 LSB 신호와 USB 신호 모두 획득할 수 있기 때문에 거의 2배만큼 전송 효율을 증가시킬 수 있다. 단, LSB 신호의 첫 번째 값 (S_0)과 USB 신호의 첫 번째 값 (S_M)은 대칭 신호가 없어서 둘 다 전송해야 하므로 Umehira et al. (2015), Kim and Ryu (2017), Lee and Ryu (2018), Won (2019)에서는 2M개 데이터 대신에 (2M-2)개 데이터를 사용하여 DFT 확산한 후 M개 데이터를 전송하는 방식을 제안하였다.

Fig. 5는 SSB 방식을 적용한 SC-FDMA 전송 시스템의 송신기 및 수신기 구조를 보여주고 있다. 일반적인 SC-FDMA 시스템에서는 사용자 별 전송 비트를 입력받아 부호기와 인버리버를 거쳐 부채널 맵핑한 후, 할당받은 채널 크기 (예: M=64)의 DFT 연산을 수행한다. DFT 연산이 끝나면 다른 사용자들을 위해 배정된 부채널들을 0으로 채우고, 전체 시스템 크기 (예: N=1024)에 맞게 IFFT (Inverse fast fourier transform) 연산이 수행된다. 송신기에서는 마지막 과정으로 주기적 프리픽스 (Cyclic Prefix: CP)를 추가한 후 송신 안테나를 통해 전송한다. 수신기에서는 송신기 과정을 역으로 수행한다. 신호를 수신한 후 CP를 제거하고 전체 시스템 크기 (N=1024)에 맞게 FFT 연산을 수행한 후 등화기를 거쳐 신호를 복원한다. 각 사용자는 본인에게 할당된 M개 부채널에 대하여 IDFT (Inverse DFT) 연산을 수행하고 MAP (Maximum a posteriori) 디텍터로부터 얻은 LLR (Log-likelihood ratio) 결과 값을 디인터리버와 디코더에 입력하여 원 전송신호 비트를 복원한다. 전송 효율을 높이기 위하여 일반적인 SC-FDMA 전송 시스템에 SSB 방식을 적용하면, Fig. 5와 같이, M개 데이터의 2배에 가까운 (2M-2)

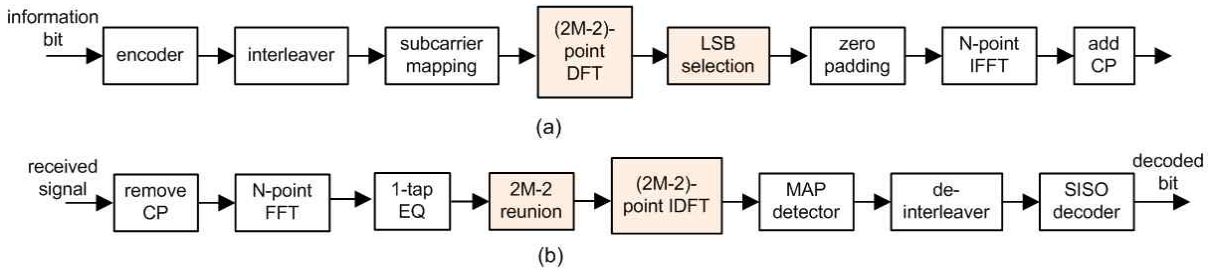

Fig. 5 SSB SC-FDMA System with No Diversity (a) Transmitter, (b) Receiver

개 단위로 DFT 연산을 수행하고, LSB 선택 (LSB selection)을 거쳐 M개 신호만을 송신기에서 전송한다. 수신기에서는 1-탭 등화기를 통과한 M개 신호에 대하여 켤레복소수 대칭 관계를 이용하여 (2M-2)개의 데이터 복원 (2M-2 reunion)과정이 추가로 수행된다.

4. 다중 중계기 기반의 SSB SFBC SC-FDMA 시스템

Fig. 6은 본 논문에서 제안하는 다중 중계기 기반의 SSB SFBC SC-FDMA 전송 시스템의 송수신기 구조를 보여주고 있다. Fig. 3의 2-슬롯 중계 프로토콜에 맞게 송신국과 수신국 사이에 두 개의 중계기를 구축하고 중계기 복원 신호에 SFBC를 적용한다. Fig. 6(a)의 송신국 송신기 구조는 Fig. 5(a)와 같이 일반적인 SSB SC-FDMA 송신기 구조와 동일하고, Fig. 6(b)의 중계기 수신기 구조는 Fig. 5(b)와 같이 일반적인 SSB SC-FDMA 수신기 구조와 동일하다. 한편, 중계기 송신기 구조와 수신국 수신기 구조는 SFBC를 적용함에 따라 일반적인 SSB SC-FDMA 송수신기 구조와 달라진다. Fig. 6(c)에서 알 수 있듯이, 첫 번째 중계기는 송신 신호를 복호한 후 SSB 방식의 LSB 신호만을 선택하여 수신국에게 전송하고, 두 번째 중계기는 Fig. 6(d)와 같이, 첫 번째 중계기의 LSB 신호와 블록 코드 관계가 형성되도록 SFBC를 적용한 후 신호를 전송한다. Fig. 6(e)에서 볼 수 있듯이, 수신국에서는 중계기들로부터 수신된 신호를 Eq. (2)와 같이 블록 디코딩 과정을 거쳐서 다이버시티 이득을 획득한다. 특히, 두 번째 중계기의 송신기 구조(Fig. 6(d))에 포함된 SFBC 인코딩 블록 (SF block coding w/ USB)는 구체적으로 Fig. 7과 같이 구현된다.

Fig. 7(a)와 같이 LSB 신호를 가공하여 SFBC를 적용하도록 생성할 수도 있고, Fig. 7(b)와 같이, USB 신호를 재배치하여 SFBC를 적용할 수도 있다. 자세히 설명하면, Fig. 7(a)의 경우, LSB 대역의 신호(S_1과 S_2)를 가져와서 켤레복소수 과정과 부호 변경을 거쳐 S_2*와 $-S_1$*를 생성한 후 전송하는 방식이다. 나머지 신호 (S_3부터 S_{62}까지)도 동일하다. Fig. 7(b)의 경우에는 Eq. (4)에서 제시된 켤레복소수 대칭 관계를 활용하여 켤레복소수 변환 과정 없이 전송하는 방식이다. LSB 대역 신호 (S_1과 S_2)는 각각 대칭되는 USB 대역의 신호 (S_{125}와 S_{124})의 켤레복소수와 같기 때문에, USB 대역의 S_{124}와 $-S_{125}$를 가져와 전송하면 SFBC를 적용한 신호 (S_2* 및 $-S_1$*)와 동일한 효과를 갖는다. 나머지 신호 (S_3부터 S_{62}까지)도 각각 대칭되는 USB 대역 신호를 가져와 전송하면 SFBC를 적용한 효과를 갖게 된다.

5. 실험 결과

총 256개 부채널을 사용하여 시뮬레이션을 진행하였고 각 사용자에게 64개 부채널을 할당하였다 (N=256, M=64). BPSK (Binary phase shift keying) 방식으로 부채널 맵핑하였고, 1/2 비율의 길쌈 부호 (제한길이=7)와 S-랜덤 인터리버 (S=5)를 적용하여 비트 신호를 부호화하였다. 정규화된 도플러 주파수 값 (f_d)은 0.001로 설정하고 무선 채널 모형은 6-탭 TU (Typical urban)

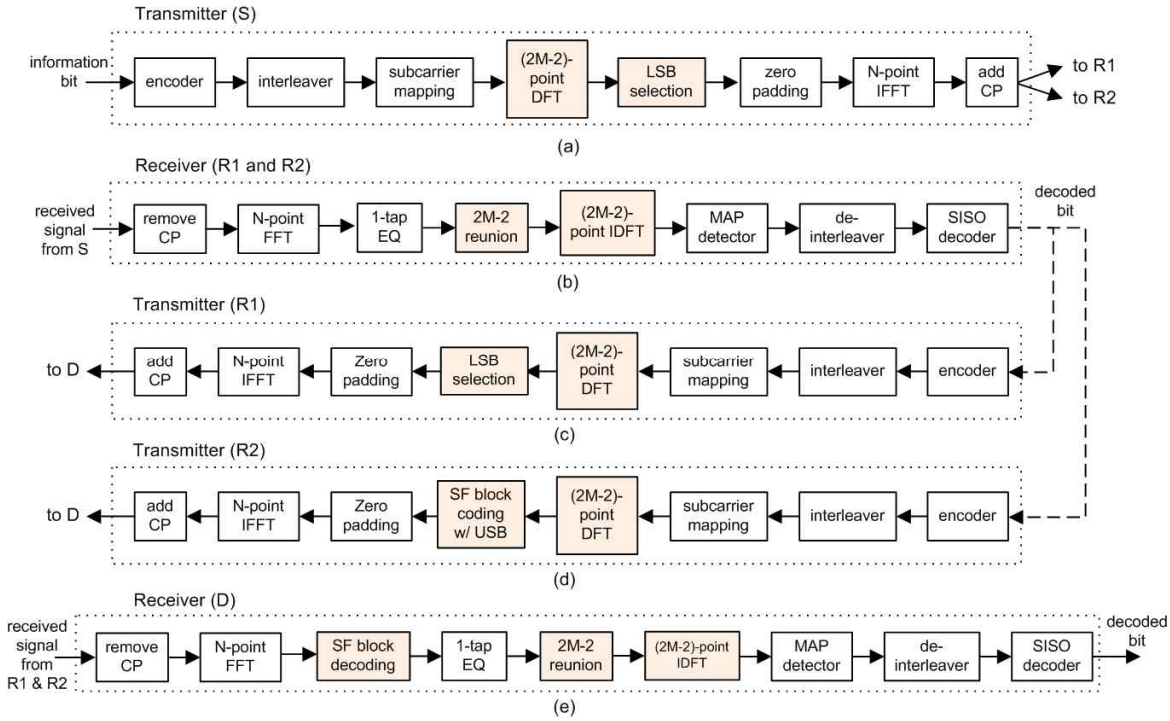

Fig. 6 Proposed Multiple-relay-assisted SSB SFBC SC-FDMA System
(a) Transmitter of Source Station, (b) Receiver of Relays, (c) Transmitter of 1st Relay, (d) Transmitter of 2nd Relay, (e) Receiver of Destination Station

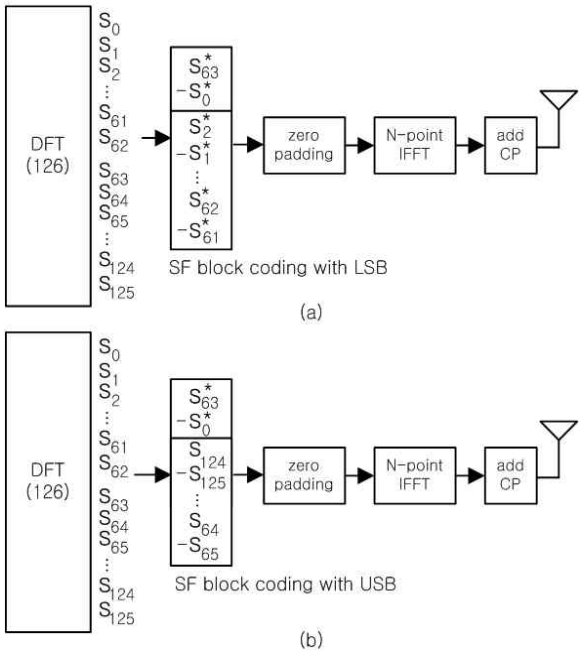

Fig. 7 SFBC (a) using LSB Signals (b) using USB Signals

모형을 사용하였다. 등화 과정을 위하여 완벽하게 추정된 채널값을 사용하는 것으로 가정하였다. Fig. 8은 중계기와 수신국 간의 SNR (Signal-to-noise power ratio) 값을 기준으로, SSB SC-FDMA 시스템의 SER (Symbol error rate) 성능을 보여주고 있다. 이 때, 송신국과 중계기 간의 신호 수신 상태는 양호하도록 설정하였다 (SNR=20dB). Fig. 8에서 네모 모양의 실선은 Fig. 1(c)처럼 수신국이 통신서비스 범위(커버리지)를 벗어나거나 2개의 중계기 중에서 1개의 중계기 전송이 실패하여 송신국과 수신국 사이에 중계기를 통한 단일 경로만이 형성된 경우의 SSB SC-FDMA 중계 시스템의 성능을 보여주고 있다. Fig. 8에서 세모 모양의 실선은 Fig. 1(d)와 같이 송신국과 수신국 사이에 두 개의 중계기를 구축하고 SFBC를 적용한 경우, 즉, Fig. 6과 같이, 두 개의 중계기를 기반으로 블록 부호화된 SSB SFBC SC-FDMA 중계 시스템의 성능을 보여주고 있다. 이때, Fig. 7(b)와 같이, 송

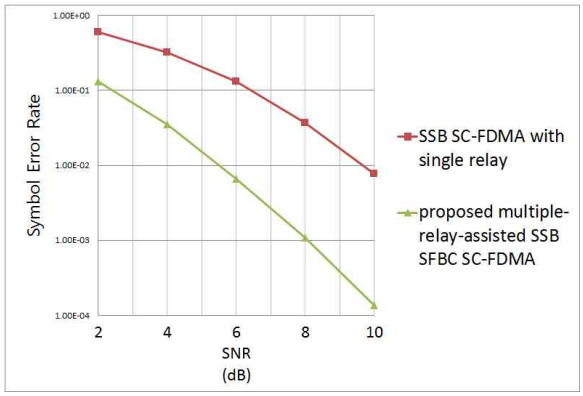

Fig. 8 SER Performance

신기의 USB 신호들을 재배치하여 SFBC를 적용하였다. 다중 중계기를 통해 블록 부호가 적용된 SSB SFBC SC-FDMA 전송 시스템은 단일 중계기 기반의 SSB SC-FDMA 전송 시스템과 비교하여, 10^{-2} SER 수준에서 4 dB 이상 SNR 성능이 개선되었고 SER 수준이 낮아질수록 성능 곡선의 기울기가 가파르게 되어 성능 간격이 더욱 벌어짐을 확인할 수 있다. 또한, 송신국과 중계기 간의 신호 수신 상태가 매우 양호하다면, 통신 서비스 범위(커버리지) 안에서 2개의 송신 안테나를 사용하는 SSB SFBC SC-FDMA 시스템(Won, 2019)과 정확하게 동일한 성능 결과를 얻게 됨을 시뮬레이션을 통해 확인할 수 있다.

6. 결 론

본 논문에서는 다중 중계기를 기반으로 블록 부호를 적용한 SSB SFBC SC-FDMA 전송 시스템을 제안하였다. 제안된 시스템에서는 SSB 시스템의 켤레 복소수 대칭 특성을 활용하여 SFBC를 구현하였고 다중 중계기를 기반으로 구현된 SFBC를 통해 송신 다이버시티 이득을 크게 획득하여 SSB SC-FDMA 전송 시스템의 성능을 개선할 수 있었다. 향후, 주파수 프리픽스를 사용하지 않는 시스템에 적용하여 SSB 적용을 통해 얻은 전송 효율 뿐만 아니라 주파수 프리픽스 부분에 대한 전송 효율까지 추가로 획득하는 연구를 진행하고자 한다.

References

Al-Dhahir, N. (2001). Single-Carrier Frequency-Domain Equalization for Space-Time Block Coded Transmissions over Frequency-Selective Fading Channels, *IEEE Communications Letters*, 5, 304-306, http://doi.org/10.1109/4234.935750

Alamouti, S. (1998). A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications, *IEEE Journal of Selected Areas in Communications*, 16, 1451-1458. http://doi.org/10.1109/49.730453

Falconer, D., Ariyavisitakul, S., Benyamin, S., and Edison, B. (2002). Frequency Domain Equalization for Single-carrier Broadband Wireless Systems, *IEEE Communications Magazine*, 40, 58-66. http://doi.org/10.1109/35.995852

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. http://doi.org/10.1109/LSP.2006.870374

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. http://doi.org/10.7840/KICS.2017.42.11.2086

Kim, Y., Jeong, B., Chung, J., Hwang, C., Ryu, J., Kim, K., and Kim, Y. (2003). Beyond 3G: Vision, Requirement, and Enabling Technologies, *IEEE Communications Magazine*, 41, 120-124. http://doi.org/10.1109/MCOM.2003.1186555

Kwon, T., Lee, H., Choi, S., Kim, J., Cho, D., Cho, S., Yun, S., Park, W., and Kim, K. (2005). Design and Implementation of a Simulator Based on a Cross-layer Protocol Between MAC and PHY Layers in a WiBro Compatible IEEE 802.16e OFDMA System, *IEEE Communications Magazine*, 43,

136-146.
http://doi.org/10.1109/MCOM.2005.1561931

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.
http://doi.org/10.7840/KICS.2018.43.12.2032

Nee, R., and Prasad, R. (2000). OFDM for Wireless Multimedia Communications, Artech House Publishers.

Nee, R., Awater, G., Morikura, M., Takanashi, H., Webster, M., and Halford, K. (1999). New High-rate Wireless LAN Standards, *IEEE Communications Magazine*, 37(12), 82-88.
http://doi.org/10.1109/35.809389

Oppenheim, A., and Schafer, R. (1989). Discrete-time Signal Processing, Prentice-Hall Publishers.

Pabst, R., Walke, B., Schultz, D., Herhold, P., Yanikomeroglu, H., Mukherjee, S., Viswanathan, H., Lott, M., Zirwas, W., Dohler, M., Aghvami, H., Falconer, D., and Fettweis, G. (2004). Relay-based Deployment Concepts for Wireless and Mobile Broadband Radio, *IEEE Communications Magazine*, 42, 80-89.
http://doi.org/10.1109/MCOM.2004.1336724

Tarokh, V., Jafarkhani, H., and Calderband, A. (1999). Space-Time Block Codes from Orthogonal Designs, *IEEE Transactions on Information Theory*, 45, 1456-1467.
http://doi.org/10.1109/18.771146

Ueng, F., Shen, Y., Chang, J., Chang, Y., and Hsu, M. (2013). MIMO Receivers for SFBC SC-FDMA Communication Systems, *2013 IEEE Symposium on Computational Intelligence for Communication Systems and Networks (CIComms),* 66-71.
http://doi.org/10.1109/CICommS.2013.6582856

Umehira, M., Nihei, S., Fusayasu, H., Miyajima, T., Takeda, S., Mashino, J., and Sugiyama, T. (2015). Performance Evaluation of SSB Transmission of DFTs-OFDM Using Multi-level BPSK through Nonlinear HPA, *Proceedings of 81st IEEE Vehicular Technology Conference,* IEEE, Glasgow, UK, July.
http://doi.org/10.1109/VTCSpring.2015.7146006

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.
http://doi.org/10.9723/jksiis.2011.16.4.019

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.
http://doi.org/10.9723/jksiis.2014.19.4.001

Won, H. (2019). Space-Frequency Block Coded Single Side Band SC-FDMA Transmission System, *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, 20, 423-429.
http://doi.org/10.5762/KAIS.2019.20.7.423

Won, H., and Kim, S. (2009). Channel Selective Relay-based Multiple-input SC-FDMA/OFDMA Transmission System, *Journal of the Korea Industrial Information Systems Research*, 14, 1-9.
http://doi.org/10.9723/jksiis.2009.14.5.001

Yune, T.. Lim, J., Cheong, Y., and Im, G. (2008). Iterative Multiuser Detection with Spectral Efficient Protocol for Relay-assisted SC-FDE, *IEEE Communications Letters*, 12, 182-184.
http://doi.org/10.1109/LCOMM.2008.071688

원 희 철 (HuiChul Won)
- 종신회원
- 포항공과대학교 전자전기공학과 공학사
- 포항공과대학교 전자전기공학과 공학석사
- 포항공과대학교 전자컴퓨터공학부 공학박사
- (현재) 대구대학교 컴퓨터정보공학부 교수
- 관심분야: 차세대 이동통신시스템