

# 주파수 공간 블록 부호화된 단일 측대 파형 SC FDMA 전송 시스템

원희철  
대구대학교 컴퓨터정보공학부

## Space-Frequency Block Coded Single Side Band SC-FDMA Transmission System

Hui-Chul Won

Division of Computer and Information Engineering, Daegu University

**요약** 최근에 초고속 광대역 무선통신 전송 시스템의 수신 성능 개선을 위한 다양한 기술들이 제안되고 있다. 본 논문에서는 주파수 공간 블록 부호화된 단일 측대 파형 SC (Single Carrier) FDMA (Frequency Division Multiple Access) 전송 시스템을 제안한다. 본 논문에서 제안된 주파수 공간 블록 부호화된 단일 측대 파형 SC FDMA 전송 시스템에서는 PAM (Pulse Amplitude Modulation) 신호의 DFT (Discrete Fourier Transform) 확산에 따라 생성되는 결레 복소수 대칭을 활용하여 주파수 공간 블록 부호를 구현한다. 이를 통해 시스템 계산 복잡도를 크게 증가시키지 않으면서 단일 측대 파형 SC FDMA 전송 시스템의 성능 개선을 위한 송신 다이버시티 이득을 획득할 수 있다. 본 논문에서 제안된 주파수 공간 블록 부호화 단일 측대 파형 SC FDMA 시스템의 신호 대 잡음 비 성능이 단일 안테나 기반의 단일 측대 파형 SC FDMA 시스템보다  $10^{-2}$  심볼 오류율 수준에서 약 4 dB 이상 개선되는 것을 실험을 통해 확인할 수 있다.

**Abstract** Recently, a variety of methods for the performance improvement of ultra-high speed wideband wireless transmission systems have been suggested. This paper proposes a space-frequency (SF) block coded single side band (SSB) single carrier (SC)-frequency division multiple access (FDMA) transmission system. In the proposed SSB SC-FDMA system, SF block code is implemented with the complex conjugates, which are formed from discrete Fourier transform (DFT) spreading of pulse amplitude modulation (PAM) signals. As a result, transmit diversity gain can be obtained in the proposed SF block coded SSB SC-FDMA system without any significant increase of the system computational complexity. The simulation result shows that the signal-to-noise power ratio (SNR) performance of the proposed SF block coded SSB SC-FDMA system is approximately 4 dB better than the SNR performance of the conventional SSB SC-FDMA system with single transmit antenna at a symbol error rate (SER) of  $10^{-2}$ .

**Keywords** : SF Block Code, SC-FDMA, DFT-Spreading, Diversity Gain, SSB, Complex Conjugate

### 1. 서론

OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 다중 반송파 통신 방식은 4세대 광대역 이동통신 및 IEEE 802.11 기반의 무선 LAN (Local

Area Network) 시스템의 핵심 기반 기술로 채택되어 사용되고 있다. 송수신 구조가 간단하고 주파수 효율이 높으면서 주파수 선택적 페이딩 환경에서 우수한 성능을 제공한다. OFDMA (Orthogonal Frequency Division Multiple Access) 전송 시스템은 OFDM 기반의 다중

본 논문은 대구대학교 2016학술연구비 과제로 수행되었음.

\*Corresponding Author : Hui-Chul Won(Daegu Univ.)

email: hcwon@daegu.ac.kr

Received April 8, 2019

Accepted July 5, 2019

Revised May 8, 2019

Published July 31, 2019

사용자 접속 시스템으로, 다수의 사용자들이 OFDM 다중 반송파 통신 방식의 부반송파들을 분할하여 정보를 주고받는데 사용한다[1-4].

SC (Single Carrier)-FDE (Frequency Domain Equalization) 단일 반송파 통신 방식은 OFDM 방식의 송신부에 존재하는 DFT (Discrete Fourier Transform) 모듈을 수신부로 옮긴 구조와 비슷하기 때문에 OFDM 방식과 거의 동일한 시스템 복잡도와 수신 성능을 갖는다. SC-FDMA (Frequency Division Multiple Access) 전송 시스템은 SC-FDE 방식을 부반송파 방식으로 확장한 다중 사용자 접속 시스템이다. OFDM과 SC-FDE 간 유사성을 기반으로, OFDMA와 SC-FDMA는 비슷한 시스템 복잡도 및 수신 성능을 갖기 때문에 차세대 광대역 이동통신 시스템의 기본 전송 방식으로 널리 연구되고 있다[5-8].

단일 측대 파형(SSB: Single Side Band, 이하 SSB) 변조 방식은 주파수 영역에서 신호의 절반 대역만을 전송하여 전송 효율을 2배로 증가시키는 아날로그 통신 방법이다. 전송 신호를 푸리에 변환하여 주파수 영역에서 살펴보면 중심주파수를 기준으로 아래 대역의 LSB (Lower Side Band) 신호와 위 대역의 USB (Upper Side Band) 신호로 구분되고, LSB 또는 USB 신호만을 전송한 후 신호 대역 간 연관성을 이용하여 LSB 신호와 USB 신호를 모두 획득하는 절차를 따른다. [9-11]에서는 아날로그 방식인 SSB를 다중 레벨 PAM (Pulse Amplitude Modulation)을 사용하는 디지털 전송 시스템에 적용하여 주파수 효율적인 DFT 확산 SSB OFDM 시스템을 제안하였다.

OFDMA 및 SC-FDMA 광대역 전송 시스템에서는 페이딩 채널에서의 수신 성능을 향상시키기 위하여 다중 송신 안테나 또는 다중 중계기를 활용하여 송신 다이버시티 기술을 적용할 수 있다. 시공간 블록 부호(STBC: Space-Time Block Code, 이하 STBC)와 주파수 공간 블록 부호(SFBC: Space-Frequency Block Code, 이하 SFBC)는 이론적으로 동일 성능을 갖는 대표적인 송신 다이버시티 기법으로, 각각 다중 송신 안테나(또는 중계기)와 연속적인 전송 심볼 간, 다중 송신 안테나(또는 중계기)와 연속적인 부채널 간에 블록 부호를 적용함으로써 다이버시티 이득을 획득하여 수신 성능을 크게 개선할 수 있다[12-16].

본 논문에서는 SSB 기반의 SC-FDMA 시스템을 구현하여 시스템 성능을 측정 후, SFBC를 적용하여 송신 다이버시티 이득을 추가로 얻고자 한다. 특히, PAM 신호

의 DFT 확산에 따라 생성되는 켈레 복소수 대칭을 활용하여 SFBC를 구현하도록 제안함으로써 시스템

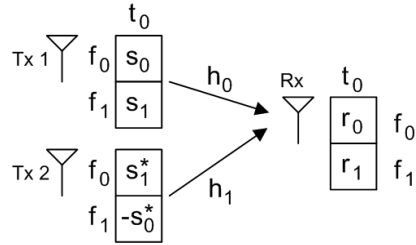


Fig. 1. Space-Frequency block code

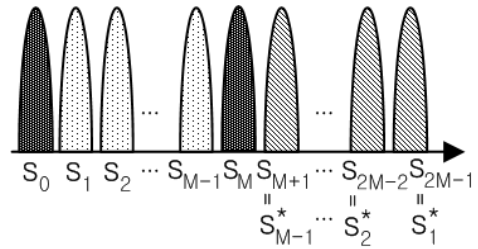


Fig. 2. The characteristic of symbols spreaded after DFT

계산 복잡도를 크게 증가시키지 않으면서 송신 다이버시티 이득을 획득한다. 2장과 3장에서는 SFBC 기법과 DFT 확산 SSB에 대하여 설명하고 4장에서는 SFBC를 적용한 SSB SC-FDMA 시스템에 대하여 설명한다. 5장에서 시뮬레이션을 통해 성능을 검증한 후, 6장에서 결론을 맺는다.

## 2. SFBC 기법

기본적인 SFBC 기법은 Fig. 1과 같이, 특정 심볼 구간  $t_0$ 에서 2개의 송신 안테나와 이웃하는 두 주파수 대역  $f_0$  과  $f_1$ 에 걸쳐 직교 블록 코드를 적용한다. 첫 번째 안테나를 통해 이웃하는 두 주파수 대역에서  $s_0$ 과  $s_1$  신호를 전송하고, 두 번째 안테나를 통해 이웃하는 두 주파수 대역에서  $s_1^*$ 와  $-s_0^*$  신호를 전송하는 방식이다. 이때, \*는 켈레복소수 연산을 의미한다. 수신국의 이웃하는 두 주파수 대역  $f_0$ 과  $f_1$ 에서 수신한 신호를  $r_0$ 과  $r_1$ 이라고 하면 다음과 같이 표현된다.

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

Where,  $h_{i,j}$  denotes the channel frequency response

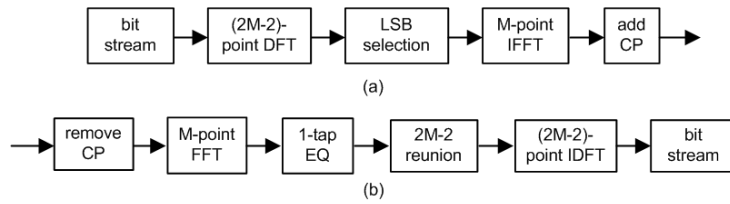


Fig. 3. DFT spreading SSB OFDM system  
(a) Transmitter (b) Receiver

of the subcarrier  $f_i$  between the receive antenna and  $i$ th transmit antenna, and  $n_i$  denotes additive noise at the subcarrier  $f_i$

이웃하는 두 주파수 대역에서의 채널이 일정하다고 가정하면, 즉,  $h_i \equiv h_{i,0} = h_{i,1}$ ,  $i=0,1$ 이면 전송 신호  $s_0$ 과  $s_1$ 에 대한 추정 값은 다음과 같은 결정 과정을 통해 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, Eq. (1)을 Eq. (2)에 대입하면, 다이버시티 효과 가 반영된 변형 형태의 잡음과 원 신호의 합으로 추정 신호를 얻어낼 수 있다.

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

### 3. DFT 확산 SSB 방식

실수 데이터를 입력으로 사용하여 DFT 연산을 하면 Fig. 2와 같이 중간 기준 값을 중심으로 양쪽의 데이터 값이 켈레복소수 형태로 대칭이 되는 특징이 있다[17].  $2M$ 개의 데이터를 사용할 경우, 앞부분(낮은 대역)의  $M$ 개 데이터로 구성되는 LSB 신호와 뒷부분(높은 대역)의  $M$ 개 데이터로 구성되는 USB 신호로 구분되고, LSB 신호의 기준 값( $S_0$ )과 USB 신호의 기준 값( $S_M$ )을 제외한 나머지 데이터들은 아래와 같이 켈레복소수 대칭 관계를 형성한다.

$$\begin{aligned} s_{M+1} &= s_{M-1}^* \\ s_{M+2} &= s_{M-2}^* \\ &\vdots \\ s_{2M-2} &= s_2^* \\ s_{2M-1} &= s_1^* \end{aligned} \quad (4)$$

Eq. (4)에서 알 수 있듯이, USB 신호는 LSB 신호 순서를 뒤집고 켈레복소수를 취하면 얻을 수 있기 때문에,

송신기에서 LSB 신호와 USB 신호 중에서 한쪽 대역 신호만을 전송하더라도 수신기에서는 Eq. (4)의 켈레복소수 관계를 이용하여 모든 대역 신호(LSB 신호와 USB 신호)를 획득할 수 있기 때문에 전송 효율을 높일 수 있다. 다만, LSB 신호의 기준 값  $S_0$ 과 USB 신호의 기준 값  $S_M$ 은 모두 전송되어야 하기 때문에 [9]-[11]에서는  $(2M-2)$ 개 데이터를 DFT 확산한 후 그 중에서  $M$ 개 데이터를 전송하도록 제안하였다.

Fig. 3은 SSB 방식을 적용한 OFDM 전송 시스템의 송수신기 구조를 간략하게 보여주고 있다. [9]-[11]에서 기술한 바와 같이, 송신기에서는  $(2M-2)$ 개 데이터를 DFT 연산을 통해 확산한 후 LSB 신호(LSB 기준값 포함해서  $(M-1)$ 개)와 USB 기준값을 모아서 총  $M$ 개의 신호만을 선택한다. 선택된  $M$ 개 신호를 역 패스트 푸리에 변환(IFFT: Inverse Fast Fourier Transform, 이하 IFFT)한 후 주기적 프리픽스(CP: Cyclic Prefix, 이하 CP)를 추가하여 송신 안테나를 통해 전송한다. 수신기에서는 수신 신호로부터 CP를 제거하고  $M$ 개 신호에 대한 패스트 푸리에 변환(FFT: Fast Fourier Transform, 이하 FFT)을 수행한 후 등화 과정을 거쳐  $M$ 개 신호를 복원한다. 복원된  $M$ 개 신호 중에서 LSB 신호의 기준값과 USB 신호의 기준값을 제외한 나머지  $(M-2)$ 개의 LSB 신호를 가져와서 켈레복소수를 취함으로써 전송하지 않았던  $(M-2)$ 개의 USB 신호를 추가로 얻게 된다. 이러한 reunion 과정을 거치면 최종적으로  $(2M-2)$ 개 신호를 모두 복원하게 되고, 복원된  $(2M-2)$ 개의 신호를 역 DFT(IDFT: Inverse DFT, 이하 IDFT) 연산하여 원 데이터를 획득하게 된다.

### 4. SFBC SSB SC-FDMA 시스템

DFT 확산 OFDM 방식은 송신기에서 DFT 연산과 IFFT 연산을 수행하고 수신기에서 FFT 연산과 IDFT 연산을 수행한다는 점에서 OFDMA 전송시스템보다는

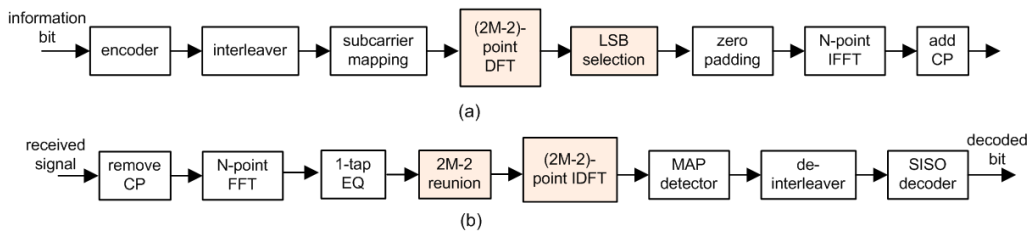


Fig. 4. SSB SC-FDMA system with no diversity  
(a) Transmitter (b) Receiver

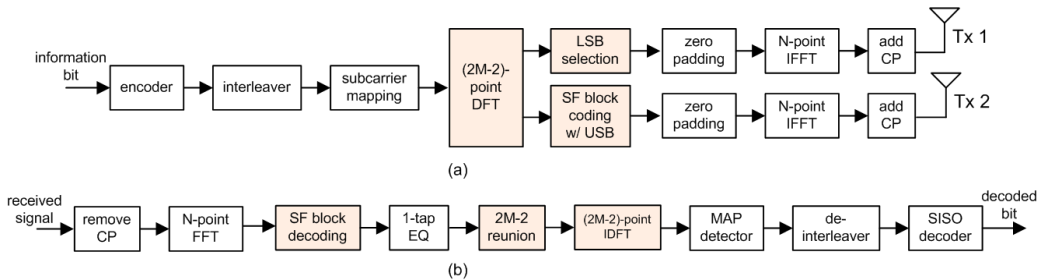


Fig. 5. Proposed SF block coded SSB SC-FDMA system  
(a) Transmitter (b) Receiver

SC-FDMA 전송 시스템과 유사하다고 볼 수 있다. 일반적인 SC-FDMA 전송 시스템에서는 각 사용자 별로 전송 비트를 부호기와 인버리버에 입력한 후 부채널 맵핑하고, 할당받은 채널 크기(M, 예를 들면 64)에 맞게 DFT 연산을 수행한 후 다른 사용자들을 위한 부채널들을 0으로 채워서 전체 시스템 크기(N, 예를 들면 1024)에 맞게 IFFT 연산을 수행한다. 최종적으로 CP를 붙여 송신 안테나를 통해 전송한다. 수신기에서는 수신 신호로부터 CP를 제거한 후 전체 시스템 크기(N)에 맞게 FFT 연산을 수행한다. 등화기를 통해 신호를 복원하고 각 사용자에게 할당된 M개 부채널을 선택하여 IDFT 연산(크기 M)을 수행한 후 MAP (Maximum A Posteriori) 디텍터로부터 얻은 신호 비트의 LLR (Log-Likelihood Ratio) 값을 디인터리버와 디코더에 입력하여 원 신호 비트를 복원한다. Fig. 4는 일반적인 SC-FDMA 전송 시스템에 SSB 방식을 적용한 송수신기 구조를 보여주고 있다. Fig. 3에서 살펴본 DFT 확산 SSB OFDM 시스템과 같이, M개 데이터보다 많은 (2M-2)개 데이터 단위로 (2M-2)개 DFT 연산을 적용하고, SSB 방식을 적용하여 LSB만을 선택하여 M개 신호만을 전송함으로써 기존 SC-FDMA 전송 시스템의 전송 효율 증대를 꾀하였다. 수신기에서는 등화기를 통과한 M개 신호를 기반으로 켈레복소수 관계를 활용하여 (2M-2)개 데이터를 복원하는 과정이 추가

되었음을 확인할 수 있다.

Fig. 5는 본 논문에서 제안하는 SFBC SSB SC-FDMA 전송 시스템의 구조를 보여주고 있다. 단일 송신 안테나를 사용하는 Fig. 4와 달리, 두 개의 송신 안테나를 사용하여 신호를 전송한다. 첫 번째 송신 안테나는 SSB 방식의 LSB 신호를 선택하여 전송하고, 두 번째 송신 안테나는 Fig. 1과 같이, 첫 번째 송신 안테나를 통해 전송되는 LSB 신호와 직교 블록 코드 관계가 되도록 만들어진 신호를 전송한다. 두 번째 송신 안테나를 위한 전송 신호는 Fig. 6과 같이 LSB 신호를 이용하여 SFBC를 적용하여 생성할 수 있다. M=64인 시스템을 예로 들면, LSB 대역의  $S_1$ 과  $S_2$ 를 첫 번째 송신 안테나를 통해 전송하고, 켈레복소수와 음수로의 부호 변경을 통해  $S_2^*$ 와  $-S_1^*$ 를 생성하여 두 번째 송신 안테나를 통해 전송하는 방식이다. 나머지  $S_3$ 부터  $S_{62}$ 까지 신호들도 동일하다. 또한, Eq. (4)에서 제시한 켈레복소수 관계를 활용하여 Fig. 7과 같이, 송신기에서 버려지는 USB 신호를 재배치하여 SFBC를 쉽게 적용할 수도 있다. M=64인 시스템을 예로 들면, LSB 대역의  $S_1$ 과  $S_2$ 는 각각 USB 대역의  $S_{125}$ 와  $S_{124}$ 의 켈레복소수와 동일하므로, LSB 대역의  $S_1$ 과  $S_2$ 를 첫 번째 송신 안테나를 통해 전송하고,  $S_2^*$  및  $-S_1^*$ 과 동일한 값을 갖는 USB 대역의  $S_{124}$ 와  $-S_{125}$ 를 두 번째 송신 안테나를 통해 전송하면 간단하게 SFBC를 적용할 수 있다.

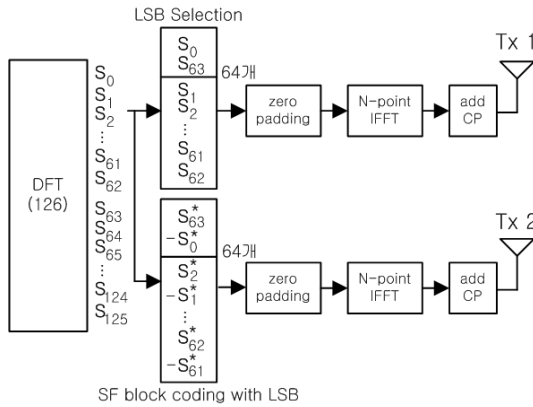


Fig. 6. SF block coding with LSB signals (e.g. M=64)

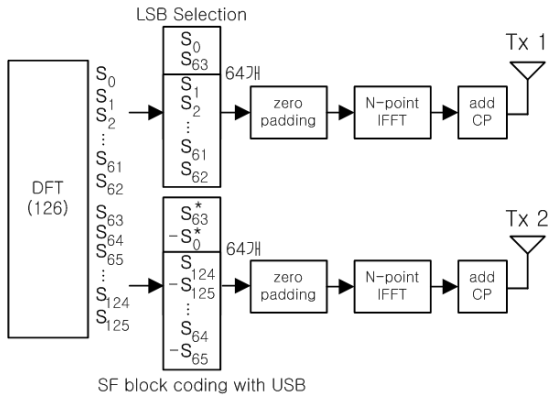


Fig. 7. SF block coding with USB signals (e.g. M=64)

나머지  $S_3$ 부터  $S_{62}$ 까지 신호들도 USB 대역 신호를 사용하여 동일하게 적용할 수 있다.

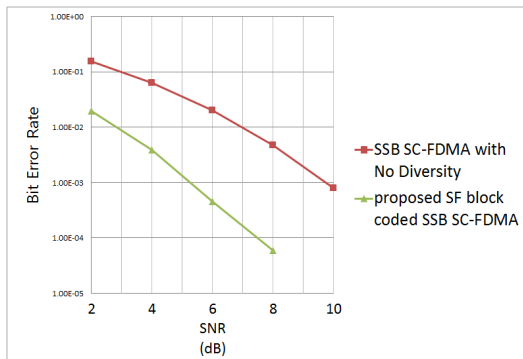


Fig. 8. Bit error rate performance

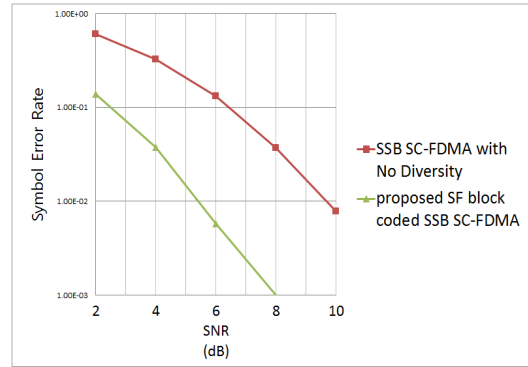


Fig. 9. Symbol error rate performance

## 5. 실험 결과

실험을 위하여 총 256개 부채널(N=256)을 사용하고 각 사용자에게 64개 부채널(M=64)을 할당하였다. 각 부채널은 BPSK (Binary Phase Shift Keying) 변조 방식을 적용하였고, 제한 길이 7을 갖는 1/2 비율의 길쌈 부호와 S-랜덤 인터리버(S=5)를 사용하여 비트 신호를 부호화하였다. 정규화된 도플러 주파수 값은 0.001로 설정하고 6-탭 TU (Typical Urban) 무선 채널 모형을 사용하였다. 등화 과정에 있어 완벽하게 추정된 채널 정보를 사용하는 것으로 가정하였다. Fig. 8과 Fig. 9는 SSB SC-FDMA 시스템의 비트 오류율(BER: Bit Error Rate, 이하 BER)과 심볼 오류율(SER: Symbol Error Rate, 이하 SER) 성능을 각각 보여주고 있다. 각 그림에서 네모 모양의 실선은 Fig. 4와 같이 단일 송신 안테나를 기반으로 구현된 SSB SC-FDMA 시스템의 성능을 보여주고 있다. 각 그림에서 세모 모양의 실선은 Fig. 5와 같이 두 개의 송신 안테나를 기반으로 SFBC를 적용한 SSB SC-FDMA 시스템의 성능을 보여주고 있다. 이때, Fig. 7과 같이, 송신기에서 버려지는 USB 신호들을 재배치하는 방법을 사용하여 SFBC를 구현하였다. [12]-[16]에서 검증된 바와 같이 SFBC를 통해 송신 다이버시티 이득을 획득함으로써, 본 논문에서 제안한 SFBC SSB SC-FDMA 전송 시스템은 단일 안테나 기반의 SSB SC-FDMA 전송 시스템과 비교하여,  $10^{-3}$  BER 수준과  $10^{-2}$  SER 수준에서 모두 4dB 이상 신호 대 잡음비 (SNR: Signal-to-Noise Power Ratio) 성능이 개선됨을 확인할 수 있다.

## 6. 결론

본 논문에서는 주파수 공간 블록 부호화된 SSB SC-FDMA 전송 시스템을 제안하였다. 제안된 시스템에서는 BPSK 신호의 DFT 확산에 따라 생성되는 컬레 복소수 대칭을 활용하여 SFBC를 구현함으로써 시스템 계산 복잡도를 크게 증가시키지 않으면서 송신 다이버시티 이득을 획득하여 SSB SC-FDMA 전송 시스템의 성능을 크게 개선할 수 있었다. 향후 BPSK 뿐만 아니라 다양한 레벨의 PAM 신호를 적용하여 성능 실험을 확대 진행할 예정이다.

## References

- [1] R. V. Nee and R. Prasad, "OFDM for Wireless Multimedia Communications", pp.33-51, Artech House Publishers, 2000.
- [2] R. V. Nee, G. Awater, M. Morikura, H. Takanashi, M. Webster and K. W. Halford, "New High-rate Wireless LAN Standards", *IEEE Communications Magazine*, Vol.37, Issue 12, pp.82-88, Dec. 1999.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/35.809389>
- [3] Y. Kim, B. Jeong, J. Chung, C. Hwang, J. Ryu, K. Kim and Y. Kim, "Beyond 3G: Vision, Requirement, and Enabling Technologies", *IEEE Communications Magazine*, Vol.41, Issue 3, pp.120-124, March 2003.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/MCOM.2003.1186555>
- [4] T. Kwon, H. Lee, S. Choi, J. Kim, D. Cho, S. Cho, S. Yun, W. Park and K. Kim, "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*, Vol.43, Issue 12, pp.136-146, Dec. 2005.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/MCOM.2005.1561931>
- [5] D. Falconer, S. Ariyavisitakul, A. Benyamin-Seeyar and B. Edison, "Frequency Domain Equalization for Single-carrier Broadband Wireless Systems", *IEEE Communications Magazine*, Vol.40, Issue 4, pp.58-66, April 2002.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/35.995852>
- [6] R. Pabst, B. Walke, D. Schultz, P. Herhold, H. Yanikomeroglu, S. Mukherjee, H. Viswanathan, M. Lott, W. Zirwas, M. Dohler, H. Aghvami, D. Falconer and G. Fettweis, "Relay-based Deployment Concepts for Wireless and Mobile Broadband Radio", *IEEE Communications Magazine*, Vol.42, Issue 9, pp.80-89, Sept. 2004.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/MCOM.2004.1336724>
- [7] T. Yune, J. Lim, Y. Cheong and G. Im, "Iterative Multiuser Detection with Spectral Efficient Protocol for Relay-assisted SC-FDE", *IEEE Communications Letters*, Vol.12, Issue 3, pp.182-184, March 2008.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/LCOMM.2008.071688>
- [8] H. Won, "Space-Frequency Block Coded Relay Transmission System for a Shadow Area", *Journal of the Korea Academia-Industrial Cooperation Society*, Vol.15, No.9, pp.5776-5782, Sept. 2014.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.5762/KAIS.2014.15.9.5776>
- [9] M. Umehira, S. Nihei, H. Fusayasu, T. Miyajima, S. Takeda, J. Mashino and T. Sugiyama, "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 2015.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/VTCspring.2015.7146006>
- [10] B. Kim and H. Ryu, "Design and Performance Evaluation of Improved DFT-s-SSB OFDM", *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, Vol.42, No.11, pp.2086-2092, Nov. 2017.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.7840/KICS.2017.42.11.2086>
- [11] J. Lee and H. Ryu, "Performance Evaluation of DFT Spreading SSB WR-OFDM System Using Multi-level PAM Modulation", *The Journal of Korean Institute of Communications and Information Sciences*, Vol.43, No.12, pp.2032-2040, Dec. 2018.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.7840/KICS.2018.43.12.2032>
- [12] S. Alamouti, "A Simple Transmit Diversity Technique for Wireless Communications", *IEEE J. Select. Areas Communications*, Vol.16, No.8, pp.1451-1458, Oct. 1998.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/49.730453>
- [13] V. Tarokh, H. Jafarkhani and A. Calderband, "Space-Time Block Codes from Orthogonal Designs", *IEEE Trans. on Information Theory*, Vol.45, No.5, pp.1456-1467, July 1999.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/18.771146>
- [14] N. Al-Dhahir, "Single-Carrier Frequency-Domain Equalization for Space-Time Block Coded Transmissions over Frequency-Selective Fading Channels", *IEEE Communications Letters*, Vol.5, No.7, pp.304-306, July 2001.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/4234.935750>
- [15] J. Jang, H. Won and G. Im, "Cyclic Prefixed Single Carrier Transmission with SFBC over Mobile Wireless Channels", *IEEE Signal Processing Letters*, Vol.13, No.5, pp.261-264, May 2006.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/LSP.2006.870374>
- [16] F. Ueng, Y. Shen, J. Chang, Y. Chang and M. Hsu, "MIMO Receivers for SFBC SC-FDMA Communication Systems", *2013 IEEE Symposium on Computational Intelligence for Communication Systems and Networks(CIComs)*, pp.66-71, April 2013.  
DOI: <http://dx.doi.org/10.1109/CICommS.2013.6582856>
- [17] A. Oppenheim and R. Schaffer, "Discrete-time Signal Processing", pp.55-64, Prentice-Hall Publishers, 1989.

원 희 철(Hui-Chul Won)

[중신회원]



- 2000년 2월 : POSTECH 대학원 전자전기공학과 (공학석사)
- 2004년 8월 : POSTECH 대학원 전자컴퓨터공학부 (공학박사)
- 2004년 9월 ~ 2006년 8월 : 삼성 전자 통신연구소 책임연구원
- 2006년 9월 ~ 현재 : 대구대학교 컴퓨터정보공학부 교수

<관심분야>

차세대 이동통신 시스템