

개선된 DFT-s-SSB OFDM 설계와 다수 사용자 환경에서의 스펙트럼 효율

Design of Improved DFT-s-SSB OFDM and Spectral Efficiency in Multiuser Environment

안창영 · 이준구 · 장경수 · 유흥균

Changyoung An · Jungu Lee · Kyeongsoo Jang · Heung-Gyoon Ryu

요 약

본 논문은 기존 DFT-s-SSB(Discrete Fourier Transform spread Single Sideband) OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 시스템이 가지는 문제점을 해결하는 개선된 DFT-s-SSB OFDM 시스템을 제안한다. 기존 DFT-s-SSB 시스템은 SSB 변조를 적용하기 위하여 PAM(Pulse Amplitude Modulation) 변조를 사용한다. 때문에 변조레벨이 높아질수록 BER(Bit Error Rate) 성능열화가 심각해진다. 그리고 오직 LSB(Lower Sideband) 스펙트럼을 통해서만 송신이 가능하며 LSB와 USB(Upper Sideband) 스펙트럼을 동시에 사용하여 송신하는 경우, 간섭이 발생하고 스펙트럼 복구가 올바르게 이루어지지 않는다. 제안하는 시스템은 이러한 문제를 해결하기 위해 2/3 convolution coding을 적용하여 BER 성능을 개선하고 DFT 크기를 조절하고 USB 스펙트럼을 선택하는 방법을 제시하여 남은 스펙트럼 자원을 이용할 수 있도록 한다. 또한 다중사용자를 지원하는 환경 혹은 제한적인 대역폭을 갖는 환경에서 이 시스템을 이용하는 경우 스펙트럼을 절반만 사용하기 때문에 남은 스펙트럼 자원을 이용할 수 있고 스펙트럼 효율을 향상시킬 수 있다.

Abstract

This paper proposes an improved discrete Fourier transform spread single sideband(DFT-s-SSB) orthogonal frequency division multiplexing(OFDM) system that solves the problems of conventional DFT-s-SSB OFDM systems. Conventional DFT-s-SSB systems use pulse amplitude modulation(PAM) for applying SSB modulation. The higher the modulation level, the worse is the BER performance. Further, transmission is possible only through the lower sideband(LSB) spectrum. When transmitting using the LSB and upper sideband(USB) spectra simultaneously, interference occurs and spectrum recovery is not performed correctly. To solve this problem, the proposed system applies the 2/3 convolution coding to improve the bit error rate(BER) performance, adjusts the DFT size, and selects the USB spectrum to utilize the remaining spectrum resources. In addition, when using this system in an environment that supports multiuser or limited bandwidth, it uses only half of the spectrum; therefore, it can utilize the remaining spectrum resources and improve the spectral efficiency.

Key words: SSSB-OFDM, SSB, DFT-s-OFDM, DFT Spreading, OFDM

「이 논문은 2016년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임(No. 2016R1D1A1B01008046).」

충북대학교 전자공학과(Department of Electronic Engineering, Chungbuk National University)

· Manuscript received September 4, 2017 ; Revised January 17, 2018 ; Accepted January 19, 2018. (ID No. 20170904-092)

· Corresponding Author: Heung-Gyoon Ryu (e-mail: ecomm@cbu.ac.kr)

I. 서 론

최근 다양한 모바일 기기의 등장으로 인터넷 사용자의 수가 급격하게 증가하고 있다. 이는 3세대 이동통신까지는 전화 서비스나 문자 서비스 정도의 서비스가 주로 제공되었으나 이동통신 기술의 발달로 인해 고화질 사진부터 실시간 방송에 이르기까지 많은 데이터량을 포함하는 통신이 주를 이루게 되었기 때문이다. 이는 기존에서 단일 반송파만을 사용하는 시스템과 달리 다중반송파를 사용할 수 있게 되어 고속전송이 가능하게 된 결과물이다. 이러한 다중반송파 기술로서 4세대 이동통신에 사용되는 LTE 시스템의 핵심기술인 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 기술이 있다^[1]. 각각의 부반송파들은 직교성을 가지고 있어 중첩이 가능하기 때문에 각 부반송파에 다른 정보들을 맵핑함으로써 다중 부반송파 전송이 가능한 시스템이다. 이외에도 다양한 다중부반송파 기술들이 5세대 이동통신을 위해서 혹은 지금 사용되는 4세대 이동통신을 개선하기 위해서 연구되어지고 있다^[2].

이런 높은 데이터 전송률을 가지는 다중 부반송파 시스템들을 사용함으로써 그에 따라 스펙트럼 요구량, 사용량 역시 증가되었다. 다양한 분야에서 이동통신 혹은 무선통신이 이루어지고 있는 만큼 한정적인 스펙트럼 자원이 포화에 가까운 상태에 이르렀다. 하지만 5세대 이동통신에서는 지금의 4세대 이동통신에서 보다 더 많은 정보량을 고속으로 전송할 수 있어야 하기 때문에 높은 스펙트럼 효율을 가지는 시스템이 요구되어 새로운 시스템을 연구 개발하고 있고 혹은 기존 시스템의 스펙트럼 효율을 향상시키려는 연구들이 많이 있다. 이러한 스펙트럼 효율성은 최근 사용되는 디지털 통신시스템들에서 뿐만 아니라 아날로그 통신시스템에서도 중요한 요소들 가운데 하나였으며 그러한 스펙트럼 효율 향상을 위해 연구된 SSB(Single-Sideband) 변조 기술이 있다. SSB 변조는 신호의 스펙트럼이 신호가 실수인 경우 대칭이 되는 것을 이용하여 스펙트럼에서 USB(Upper Sideband) 또는 LSB(Lower Sideband)만을 전송하는 변조 기술이다. 신호에 힐버트 변환을 적용하여 USB 혹은 LSB 스펙트럼만을 얻거나 혹은 USB와 LSB 스펙트럼을 제외한 나머지 부분을 필터링하여 전송하는 기술이다. 다시 말해 SSB 변조는 절반

의 스펙트럼만을 사용하는 변조 방법이다.

이와 같이 SSB 변조는 기존 대비 절반의 스펙트럼만을 사용하기 때문에 스펙트럼 효율이 높은 기술로서 이를 4세대 이동통신 기술인 OFDM 시스템에 적용하려는 연구가 있다^{[3][4]}. 이 가운데 DFT spreading OFDM에 SSB 변조기술을 적용한 DFT-s-SSB OFDM 시스템이 연구되었다^{[5]~[7]}. DFT-s-SSB OFDM은 SSB 변조 기술을 적용하기 위해 데이터 변조는 PAM(Pulse Amplitude Modulation)을 사용하고 그 이후에는 DFT spreading 연산을 적용한 값이 중심을 기준으로 대칭인 것을 이용하여 각각 USB 혹은 LSB에 해당하는 것과 같이 절반만을 선택하여 OFDM 변조 후 송신하는 방법이다. 기존 SSB 변조와 마찬가지로 절반에 가까운 스펙트럼만을 사용하여 송신할 수 있지만, PAM 변조로 인한 BER 성능열화와 LSB 혹은 USB만 전송가능한 문제점이 있다. 본 논문에서는 convolution coding을 적용하여 BER 성능을 개선함과 동시에 DFT 연산 크기를 조절하여 남은 스펙트럼 자원 또한 사용 가능하도록 하는 개선된 DFT-s-SSB OFDM을 제안하고 이 시스템을 다수 사용자 환경에 적용하여 사용할 때의 스펙트럼 자원 이용 효율 향상을 비교하고 분석한다. 또한 이 개선된 DFT-s-SSB OFDM 시스템의 평가를 위하여 시뮬레이션을 진행한다. 시뮬레이션에서는 시스템의 스펙트럼을 확인하고 BER 성능을 평가한다.

II. 개선된 DFT-s-SSB OFDM 시스템

그림 1은 기존 DFT-s-SSB OFDM의 문제점들을 개선하기 위하여 본 논문에서 제안하는 개선된 DFT-s-SSB OFDM 시스템의 구성도이다^[7]. 순차적으로 볼 때 데이터를 2/3의 비율을 갖는 convolution coding을 하고 PAM 변조를 한다. OFDM 시스템에 SSB 변조를 적용하기 위해서는 스펙트럼이 대칭이 되도록 실수인 신호가 필요하다. 따라서 실수값만을 가지도록 PAM 변조를 사용한다. 기존 DFT-s-SSB OFDM 시스템 또한 PAM 변조를 사용하며 PAM 변조 사용으로 BER 성능 열화가 심각한 편이다. 때문에 BER 성능 열화 문제를 개선하기 위하여 2/3 convolution coding을 적용한다^[8]. 이때 1/2이하의 convolution coding을 적용하는 경우 스펙트럼을 절반만 사용하게 되더라도 SSB 변조로 인한 스펙트럼 효율 향상 효과를 잃어버린다. 이는

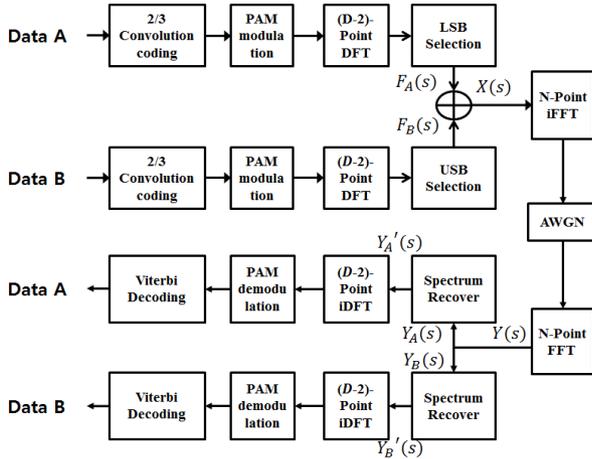


그림 1. 제안하는 개선된 DFT-s-SSB OFDM 구성도
Fig. 1. Block diagram of improved DFT-s-SSB OFDM.

사용되는 스펙트럼이 절반이 되는데 비해 전송되는 데이터의 양도 절반 이하로 줄어들기 때문이다. 따라서 본 논문에서는 1/2이 넘는 2/3의 convolution coding을 사용하고 있다. 이때 적용되는 convolution coder의 형태는 그림 2와 같다. 적용되는 convolution coder는 구속장 길이가 5와 4 이고 Polynomial Octal은 023 035 000; 000 005 013이며, 128 State를 가지는 형태이다.

그 다음으로는 DFT spreading을 이용하여 SSB 변조를 OFDM에 적용하는 과정이다. PAM 변조된 신호를 N_D -point DFT spreading 연산한 다음 중심을 기준으로 USB 혹은

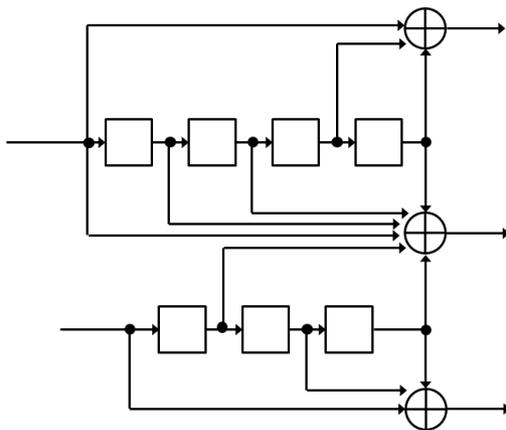


그림 2. 적용된 2/3 컨볼루션 코더
Fig. 2. Applied 2/3 convolutional coder.

은 LSB만을 선택하게 된다. 이때 기존 DFT-s-SSB OFDM의 경우 DFT 연산 출력 값과 IFFT 입력 값은 다음과 같은 수식처럼 정의된다. 이때 $N_D \leq N$ 이다.

식 (1) 및 식 (2)와 같이 기존 DFT-s-SSB OFDM은 DFT spreading 연산 출력값인 $F(k)$ 에서 $N_D/2 + 1$ 까지 해당되는 성분을 선택한다. 이는 $N_D/2 + 1$ 를 기준으로 대칭이기 때문에 LSB 성분만을 선택하는 것과 같은 것이다.

$$F(k) = \sqrt{1/N_D} \sum_{n=1}^{N_D} f(n) \exp(-j2\pi kn/N_D),$$

$$k = 1 \sim N_D \tag{1}$$

$$X(k) = \begin{cases} F(k), & k = 1 \sim N_D/2 + 1 \\ 0, & k = N_D/2 + 2 \sim N_D \end{cases} \tag{2}$$

여기에서 선택되는 성분의 개수는 $N_D/2 + 1$ 개 즉 절반보다 1개의 성분이 더 선택된다. 이런 기존 시스템의 경우 LSB를 선택하는 것과 유사한 방법으로 USB 성분을 선택하거나 LSB 선택 후 conjugation을 적용하여 USB를 선택할 수 있다. 이때 만약 USB 스펙트럼을 활용하기 위하여 서로 다른 두 신호를 각각 LSB와 USB를 선택하게 하는 경우 그림 3과 같은 문제점을 보인다.

그림 3은 기존 DFT-s-SSB OFDM 시스템에서 DFT spreading 출력값에서 LSB 성분이 선택되는 과정과 두 신호 각각 LSB, USB 성분을 선택하여 송신하는 경우 발생하는 문제점을 보이고 있다. 선택되는 USB와 LSB의 크기가 $N_D/2 + 1$ 이 되기 때문에 그림에서 확인할 수 있듯이 중첩되어 서로에게 간섭을 일으킨다. 이러한 기존 시스템의

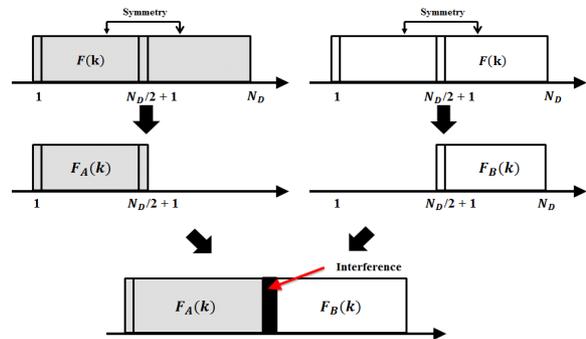


그림 3. 기존 DFT-s-SSB OFDM의 문제점
Fig. 3. Problem of conventional DFT-s-SSB OFDM.

경우, 서로 다른 두 신호를 각각 DFT-s-SSB OFDM에 적용하여 LSB와 USB를 선택하는 경우 간섭이 발생한다. 이러한 간섭 문제는 SSB 변조를 적용하기 위해 DFT spreading 출력값을 선택할 때 기존 DFT-s-SSB OFDM의 경우 $N_D/2 + 1$ 개의 성분을 선택해야 하므로 발생하는 문제이며 더불어 USB를 선택하는 경우에는 1번 성분을 포함하지 않기 때문에 수신기에서 복조과정에서 문제가 된다.

그림 4는 그림 3에서 보이는 기존 DFT-s-SSB OFDM의 USB와 LSB를 동시에 송신하는 경우 발생하는 문제점을 해결하기 위해 제안하는 개선된 DFT-s-SSB OFDM의 DFT spreading 출력값 선택 방법이다. 우선적으로 그림 3에서의 문제점이 나타나는 원인은 수신기에서 복조를 위해 선택을 할 때 필요한 성분은 $N_D/2 + 1$ 개의 성분이기 때문에 중심에서 간섭이 발생하게 된다. 이는 남은 USB 스펙트럼을 사용하지 못할 뿐더러 BER 성능에 영향을 미친다. 때문에 제안하는 시스템은 $N_D - 2$ 의 크기로 DFT spreading을 진행하고 복조에 필요한 성분의 수가 $N_D/2$ 개가 되어 정확히 절반의 스펙트럼만을 사용하게 된다.

$$X(k) = \begin{cases} F_A(k) & , k = 1 \sim N_D/2 \\ F_B^*(N_D + 1 - k) & , k = N_D/2 + 1 \sim N_D \end{cases} \quad (3)$$

식 (3)은 제안하는 시스템의 스펙트럼 선택 방법이다. LSB 성분은 기존 시스템과 유사하되 DFT spreading의 크기를 조절하였기 때문에 절반의 스펙트럼을 사용하게 되고, USB 성분의 경우 $(N_D - 2)$ -Point DFT spreading의 출력값이 $N_D/2$ 에서 대칭이 되고, 복조에 필요한 스펙트럼이 $1 \sim N_D/2$ 까지의 성분이기 때문에 $1 \sim N_D/2$ 성분을 선택

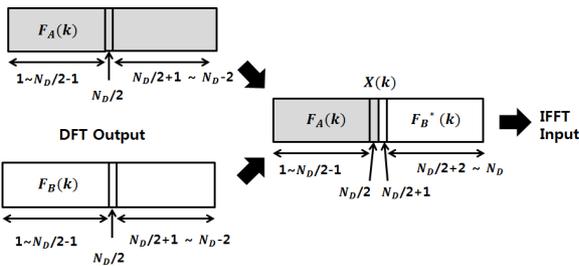


그림 4. 개선된 DFT-s-SSB OFDM SSB 선택 방법
Fig. 4. SSB selection of improved DFT-s-SSB OFDM.

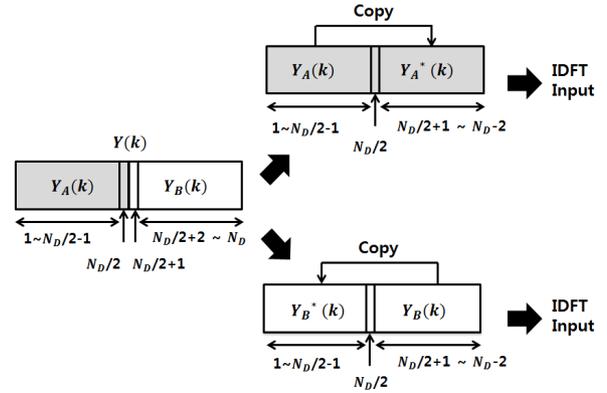


그림 5. 개선된 DFT-s-SSB OFDM SSB 복조
Fig. 5. SSB recovery of improved DFT-s-SSB OFDM.

하고 공역을 취하여 좌우 반전시켜 선택한다. 이와 같은 방법을 통해 LSB 뿐만 아니라, 남은 USB 성분에도 또한 DFT-s-SSB OFDM 시스템을 사용할 수 있다.

그 다음 선택된 입력을 IFFT 연산을 통해 OFDM으로 변조하고 송신하게 된다. 다시 수신단에서 복조를 위해서는 일련의 과정이 필요하다. SSB 변조기술과 동일하게 대칭인 절반의 스펙트럼만을 사용하여 송신하였기 때문에 다시 원래의 스펙트럼을 복조하는 과정이 요구된다. 그러한 복조과정을 그림 5에서 보이고 있다.

그림 5는 제안하는 시스템에서 SSB 선택 및 복조 방법에 대하여 설명하는 그림이다. FFT 연산 후에 출력된 값에서 합쳐진 두 스펙트럼을 분리하는 과정이다. 먼저 N-Point FFT 연산된 출력값에서 각각 절반에 해당하는 LSB와 USB 스펙트럼을 선택한다. 그리고 앞서 송신기의 스펙트럼 선택에서도 설명한 바와 같이 스펙트럼이 대칭인 점을 이용하여 복조한다. 우선 LSB 스펙트럼으로 수신된 신호의 경우 LSB 스펙트럼과 함께 중심이 되는 성분과 첫 번째 성분을 제외한 나머지 성분들을 공역을 취하여 USB에 복사한다. 이와 마찬가지로 USB 스펙트럼으로 수신된 신호 역시 USB 스펙트럼과 함께 중심이 되는 스펙트럼을 제외한 나머지를 공역을 취하여 LSB에 복사하고 맨 마지막 성분만을 제외하여 복조한다. 이러한 과정은 다음 식 (4)~(6)과 동일하다.

$$Y(k) = \begin{cases} Y_A(k) & , k = 1 \sim N_D/2 \\ Y_B(k - M/2) & , k = N_D/2 + 1 \sim N_D \end{cases} \quad (4)$$

$$Y_A'(k) = \begin{cases} Y_A(k) & , k = 1 \sim N_D/2 \\ Y_A^*(N_D - k) & , k = N_D/2 + 1 \sim N_D - 2 \end{cases} \quad (5)$$

$$Y_B'(k) = \begin{cases} Y_B^*(N_D - k + 1) & , k = 1 \sim N_D/2 \\ Y_B(k + 1) & , k = N_D/2 + 1 \sim N_D - 2 \end{cases} \quad (6)$$

위 수식에서 확인할 수 있듯이 스펙트럼이 중심을 기준으로 실수값이 같고 허수값이 공액대칭인 성질을 이용하여 LSB, USB 스펙트럼 모두 위 식과 같은 조건으로 원래의 스펙트럼으로 복조 가능하다.

복조된 스펙트럼을 통해서 IDFT 연산 후 PAM 신호를 복조하고 복조된 PAM 신호를 비트로 변환하여 비트정보를 얻을 수 있게 된다. 또한 앞서 BER 성능 열화를 방지하기 위한 목적으로 추가했던 convolution coding을 복조하기 위하여 viterbi decoding을 사용하여 원래의 데이터를 복조할 수 있다. 이러한 DFT-s-SSB OFDM 시스템의 경우 스펙트럼 자원이 한정적인 상황에서 효과적이다. 기존과 동일하게 QAM 신호를 사용하는 경우, 스펙트럼이 고정적이지만 제안하는 시스템의 경우 스펙트럼을 다양하게 활용할 수 있다.

위와 같은 시스템을 통해서 DFT-s-SSB OFDM에서 LSB만 사용가능한 부분을 DFT spreading 크기 조절과 SSB 선택법을 개선하여 LSB와 USB를 모두 사용할 수 있게 하고, convolution coding을 이용하여 BER 성능열화를 개선한다. 하지만 DFT spreading의 크기가 줄어들고, convolution coding으로 인해 생기는 데이터 전송률 손실은 code rate를 적절히 조절하는 등 고려해야할 부분이 있다.

III. 다중 사용자를 위한 스펙트럼 이용

본 논문에서는 기존 아날로그 시스템에서 사용되던 SSB 기술을 OFDM에 적용하기 위한 방법인 DFT-s-SSB OFDM을 개선하여 개선된 형태의 DFT-s-SSB OFDM 시스템을 제안하고 있다. 이러한 시스템은 다수 사용자를 지원하는 환경 및 제한된 스펙트럼에서 효과적인 방법이다. 이는 DFT-s-SSB OFDM 시스템을 이용하여 절반의 스펙트럼만을 가지고도 전송이 가능하기 때문이다. 이 시스템을 이용하여 다수 사용자를 지원하는 환경과 스펙트럼 자원이 제한된

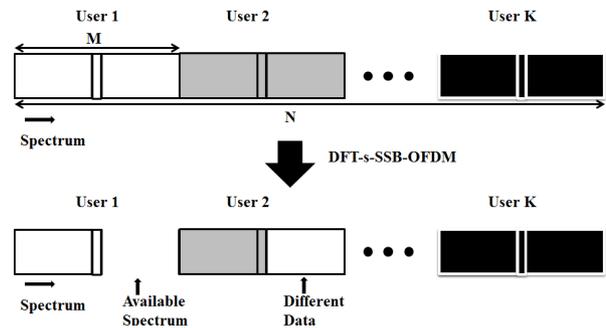


그림 6. 다중사용자환경에서 DFT-s-SSB OFDM 적용 후 스펙트럼 이용

Fig. 6. Spectrum utilization of DFT-s-SSB OFDM in multi-user environment.

환경에서 스펙트럼 자원을 다양하게 이용할 수 있다.

그림 6은 다중 사용자 환경에서 스펙트럼 이용에 관해 설명하는 그림이다. 그림 6에서 User1 번의 경우처럼 기존 DFT-s-SSB OFDM 혹은 개선된 DFT-s-SSB OFDM을 적용하여 절반의 스펙트럼만을 사용하여 송신하게 되면 추가적인 스펙트럼을 확보할 수 있다. 이때 다른 변조 즉 OFDM 시스템이 아니더라도 빈 스펙트럼 대역을 이용하여 전송이 가능하다. 또한 개선된 형태의 DFT-s-SSB OFDM을 이용하는 경우, User 2의 형태와 같이 남는 스펙트럼 자원을 이용하여 다른 정보를 보낼 수 있다. 다시 말해 기존 LSB 성분만을 사용하여 전송하는 시스템과 달리 USB 성분에도 다른 정보를 송신할 수 있기 때문에 매우 효과적이다. 마찬가지로 스펙트럼 자원이 한정적인 환경에서 여분의 스펙트럼 자원을 만들거나, 만들어진 스펙트럼 자원을 이용할 수 있다.

그림 7은 또 다른 DFT-s-SSB OFDM의 이용 예시를 보이고 있다. 기존 DFT-s-SSB OFDM의 경우에는 LSB 스펙트럼을 통해 송신하기 때문에 남는 스펙트럼자원의 크기가 일정하나, 제안하는 개선된 DFT-s-SSB OFDM의 경우 그림 7과 같이 사용자 1은 LSB를 사용하고, 사용자 2는 USB를 사용하는 경우 둘 사이에 넓은 대역의 스펙트럼을 이용할 수 있다.

IV. 시뮬레이션 및 분석

본 논문에서는 제안하는 시스템의 스펙트럼과 BER 성

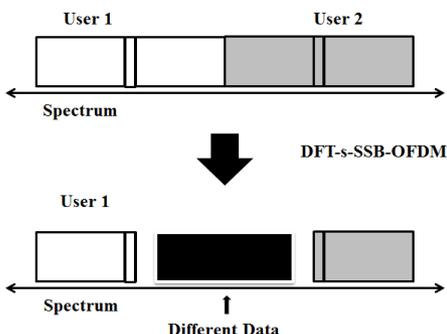


그림 7. 개선된 DFT-s-SSB OFDM을 적용한 스펙트럼 이용 예시

Fig. 7. Example of improved DFT-s-SSB OFDM utilization.

능을 확인하고 분석하기 위하여 MATLAB 프로그램을 이용하여 시뮬레이션을 진행하였다.

표 1에 나와 있는 시뮬레이션 환경은 제안하는 개선된 DFT-s-SSB OFDM 시스템을 확인하기 위해 설정한 값들이다. 시뮬레이션은 제안하는 시스템의 SSB 효과 및 LSB와 USB를 동시에 이용할 수 있는지를 확인하기 위해 스펙트럼을 우선적으로 확인하고 시스템의 BER 성능도 함께 확인하였다. 이때 시뮬레이션은 64의 FFT 크기를 가지고 52개의 부반송파를 사용하며, 52에서 2를 뺀 50의 크기로 DFT spreading을 적용한 다음 AWGN 채널에서만 시뮬레이션을 진행하였다.

그림 8은 시뮬레이션을 통해서 확인한 본 논문에서 제안하는 개선된 DFT-s-SSB-OFDM 시스템의 스펙트럼이다. 좌우 각각 LSB 및 USB 스펙트럼으로 각각 52개의 부반송파 중에서 26개씩을 사용하여 나타난 스펙트럼이다. 기존 시스템에서 27개의 부반송파가 요구되었지만 DFT spreading 크기를 줄여 간섭을 방지하고 있으며, 남은 스

표 1. 시뮬레이션 환경
Table 1. Simulation parameters.

Modulation	2/3 Conv. DFT-s-SSB OFDM
Data modification	PAM
DFT spreading	50
OFDM FFT size	64
# of subcarriers	52
Channel	AWGN

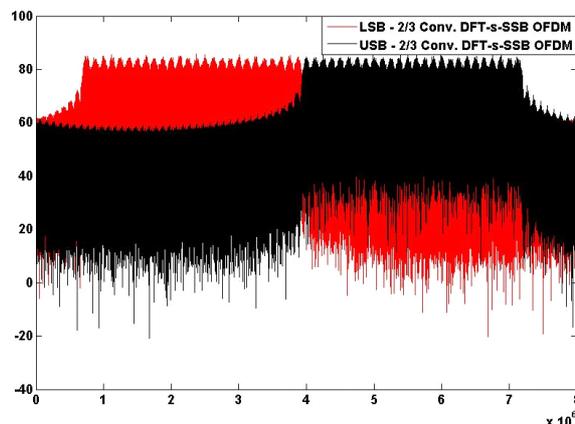


그림 8. 개선된 DFT-s-SSB OFDM의 스펙트럼
Fig. 8. Spectrum of improved DFT-s-SSB OFDM.

펙트럼 자원 역시 DFT-s-SSB OFDM을 적용할 수 있다.

그림 9는 제안하는 시스템의 BER 성능을 시뮬레이션을 통해 구한 그래프이다. 그림 9에서 확인할 수 있듯이 기존 DFT-s-SSB-OFDM 시스템은 PAM 변조레벨이 높아 질수록 BER 성능열화가 심각하다. 이러한 문제점을 해결하기 위해 하지만 제안하는 시스템의 경우 적용된 2/3 convolution coding을 통해 BER 성능을 개선시킨다. 2 PAM을 사용하는 경우, 기존 대비 제안하는 시스템의 경우 1.5 dB의 성능향상을 보이고, 4 PAM의 경우 약 4dB의 성능 향상을 확인할 수 있다. 하지만 제안하는 시스템의 경우 BER 성능열화를 개선하였지만, 스펙트럼 효율 측면에서는 기

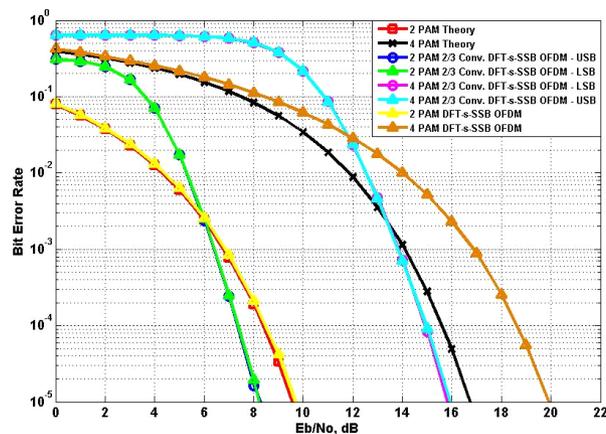


그림 9. 개선된 DFT-s-SSB OFDM의 BER 성능
Fig. 9. BER performance of improved DFT-s-SSB OFDM.

존 DFT-s-SSB OFDM보다는 손실이 있다. 그러나 시간영역의 자원의 낭비를 막고 스펙트럼 자원을 다양하게 활용할 수 있게 만든다.

표 2는 실질적인 다중사용자 환경에서 DFT-s-OFDM 시스템, 기존 DFT-s-SSB OFDM, 개선된 DFT-s-SSB OFDM 시스템의 필요 대역폭, 데이터 전송률 그리고 스펙트럼 이용 효율을 계산하여 정리한 것이다. 그림 6에서 보이듯이 K 명의 사용자가 각각 N_D 만큼의 대역폭을 사용할 때 전체 대역폭은 $N_D \times K = N$ 이라고 할 수 있다. 이때의 각각 필요 대역폭 및 데이터 전송률 스펙트럼 효율을 계산하여 보면 기존 DFT-s-OFDM의 경우 $N_D \times K$, 즉 전체 대역폭인 N 과 같고, DFT spreading 크기인 N_D 와 같다. 이때의 스펙트럼 이용 효율을 1이라 할 때 비교를 위한 기존 DFT-s-SSB OFDM과 개선된 DFT-s-SSB OFDM의 스펙트럼 이용 효율을 계산하여 보면 각각 필요대역폭은 절반보다 1개의 성분을 더 사용하기 때문에 $(N_D/2 + 1) \times K$ 이고, 데이터 전송률은 N_D 이다. 개선된 시스템의 경우, 절반만을 사용하기 때문에 $N_D/2 \times K$, 전송률은 $N_D - 2$ 임을 알 수 있다. 데이터 전송률을 필요 대역폭으로 나누어 스펙트럼 이용 효율을 계산할 수 있다. 각각의 스펙트럼 이용 효율은 기존 DFT-s-SSB OFDM은 $2N_D / (N_D + 2)$ 이고 개선된 DFT-s-SSB OFDM의 경우 $2(N_D - 2) / N_D$ 으로 계산된다. 모두 2배의 가까운 스펙트럼 이용 효율 향상을 보인다.

표 2. 스펙트럼 이용 효율
Table 2. Spectrum utilization efficiency.

	Required BW	Data rate	Spectrum utilization efficiency
DFT-s-OFDM	$N_D \times K$	N_D	$\frac{N_D \times K}{N} = 1$
N_D -Point DFT-s-SSB OFDM	$\left(\frac{N_D}{2} + 1\right) \times K$	N_D	$\frac{2N_D}{N_D + 2}$
$(N_D - 2)$ -Point DFT-s-SSB OFDM	$\frac{N_D}{2} \times K$	$N_D - 2$	$\frac{2(N_D - 2)}{N_D}$

V. 결 론

본 논문에서는 아날로그 통신에서 사용되는 SSB 변조를 OFDM 시스템에 적용하기 위해 PAM 변조를 사용하고, DFT spreading을 이용하는 DFT-s-SSB OFDM 시스템에서 발생하는 문제점들을 개선하는 개선된 DFT-s-SSB OFDM 시스템을 제안하고, 이 시스템이 다수사용자를 지원하는 환경에서의 스펙트럼 이용성과 이용 효율 개선이 얼마나 이루어지는지를 확인한다. 기존 DFT-s-SSB OFDM 시스템은 LSB 스펙트럼만 사용가능한 형태이나 제안하는 시스템은 LSB와 USB를 모두 사용 가능하고 SSB로 인해 생기는 스펙트럼 효율 향상을 유지하되 PAM 변조레벨이 올라감에 따라 심각하게 열화되는 문제점을 개선하기 위하여 2/3 convolution coding을 이용하여 BER 성능을 개선시켰다. 이러한 결과들로 미루어볼 때 제안하는 시스템은 convolution coding을 적용하고 DFT spreading 크기를 조절하기 때문에 데이터 전송률에 약간의 손해가 발생하지만, 기존 시스템과 달리 남은 USB 스펙트럼 자원을 제안하는 시스템을 통해 사용 가능하며, BER 성능열화 문제를 개선시킨다. 또한 다수의 사용자를 지원하거나 제한적인 주파수 대역에서 제안하는 시스템을 이용하여 스펙트럼 이용을 다양하게 활용할 수 있고, 스펙트럼 이용 효율을 올릴 수 있다.

References

[1] Y. Wu, W. Y. Zou, "Orthogonal frequency division multiplexing: A multi-carrier modulation scheme," *IEEE Transactions on Consumer Electronics*, vol. 41, no. 3, pp. 392-399, Aug. 1995.

[2] T. Hwang, C. Yang, G. Wu, S. Li, and G. Y. Li, "OFDM and its wireless applications: A survey," *IEEE Transactions on Vehicular Technology*, vol. 58, no. 4, pp. 1673-1694, May 2009.

[3] Y. Jiang, Z. Zhou, M. Nanri, G. I. Ohta, and T. Sato, "Performance evaluation of four orthogonal single sideband elements modulation scheme in multi-carrier transmission systems," in *2011 IEEE Vehicular Technology Conference(VTC Fall)*, San Francisco, CA, Sep. 2011,

pp. 1-6.

- [4] G. I. Ohta, T. Sato, "An orthogonal frequency multiplexed (OFDM) four-layer SSB-QAM modulation method," *IEICE Technical Report*, vol. 114, no. 490, pp. 159-164, Mar. 2015.
- [5] Y. Tang, W. Shieh, and B. S. Krongold, "DFT-spread OFDM for fiber nonlinearity mitigation," *IEEE Photonics Technology Letters*, vol. 22, no. 16, pp. 1250-1252, Aug. 2010.
- [6] F. Hasegawa, S. Shinjo, A. Okazaki, A. Okamura, L. Brunel, and D. Mottier, "Static sequence assisted out-of-band power suppression for DFT-s-OFDM," in *2015*

IEEE 26th Annual International Symposium on Personal, Indoor, and Mobile Radio Communications(PIMRC), Hong Kong, 2015, pp. 61-66.

- [7] K. Abo, T. H. Vo, A. Boonkajay, and F. Adachi, "Spectrum efficient single-sideband single-carrier with frequency-domain equalization," in *2015 IEEE 81st Vehicular Technology Conference(VTC Spring)*, Glasgow, 2015, pp. 1-5.
- [8] N. Arshad, A. Basit, "Implementation and analysis of convolutional codes using MATLAB," *International Journal of Multidisciplinary Sciences and Engineering*, vol. 3, no. 8, pp. 9-12, 2012.

안 창 영



2013년 2월: 충북대학교 전자공학과 (공학사)
 2013년 3월~현재: 충북대학교 전자공학과 석사과정
 [주 관심분야] 무선통신시스템, 신호처리

장 경 수



2017년 2월: 충북대학교 전자공학과 (공학사)
 2017년 3월~현재: 충북대학교 전자공학과 (공학석사)
 [주 관심분야] 무선통신시스템, 신호처리

이 준 구



2017년 2월: 충북대학교 전자공학과 (공학사)
 2017년 3월~현재: 충북대학교 전자공학과 석사과정
 [주 관심분야] 무선통신시스템, 차세대 통신시스템

유 흥 균



1988년~현재: 충북대학교 전자공학과 교수
 2002년 3월~2004년 2월: 충북대학교 컴퓨터정보통신연구소 소장
 [주 관심분야] 무선통신시스템, 위성통신, B5G/6G 이동통신 시스템, 통신회로 설계 및 통신 신호처리