

Multi-level PAM 변조를 사용하는 DFT 확산 단일측대파형 WR-OFDM 시스템의 성능 평가

이준구*, 유흥균°

Performance Evaluation of DFT Spreading SSB WR-OFDM System Using Multi-Level PAM Modulation

Jungu Lee*, Heung-Gyoon Ryu°

요약

본 논문에서는 DFT(Discrete Fourier Transform) 확산 SSB(Single Side Band) 방식과 WR-OFDM(Windowing and Restructuring Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 시스템을 동시에 적용하여 DFT 확산 단일측대파형 WR-OFDM 시스템을 구성하고 성능을 평가한다. 기존의 DFT 연산을 적용하여 SSB 심볼을 전송하는 OFDM 방식보다 전송하는 비트의 수를 더 많이 전송하기 위해, $(2N-2)$ -point DFT 연산을 적용하여 SSB 심볼을 만든다. DFT 확산 단일측대파형 WR-OFDM 시스템의 BER(Bit Error Rate) 성능과 스펙트럼 효율은 4-PAM, 8-PAM, 16-PAM 변조를 사용한 경우 각각 기존의 16-QAM, 64-QAM, 256-QAM 시스템과 동일한 성능을 낸다. DFT 확산 단일측대파형 WR-OFDM 시스템은 기존의 OFDM 시스템과 비교하여 약 27dB 낮은 OOB(Out-of-Band) 전력 특성을 보인다.

Key Words : DFT, SSB, OFDM, WR-OFDM, spectral efficiency, OOB

ABSTRACT

In this paper, Discrete Fourier Transform spreading Single Side Band Windowing and Restructuring-OFDM(DFT spreading SSB WR-OFDM) system using DFT spreading SSB method and WR-OFDM system simultaneously is constructed and evaluated its performance. In order to transmit the number of bits to be transmitted more than the OFDM method in which SSB symbols are transmitted by applying the existing DFT operation, $(2N-2)$ -point DFT operation is applied to generate an SSB symbol. The BER (Bit Error Rate) performance and the spectral efficiency of the DFT spreading SSB WR-OFDM system using 4-PAM, 8-PAM, 16-PAM are almost same conventional 16-QAM, 64-QAM, and 256-QAM system. DFT spreading SSB WR-OFDM system exhibits an out-of-band(OOB) power characteristic that is about 27 dB lower than that of the conventional OFDM system.

1. 서론

OFDM(Orthogonal Frequency Division Multi-

plexing)은 기존의 4세대 통신과 IEEE 802.11 표준 기술에 사용되는 시스템이다. OFDM 시스템은 다중 반송파를 사용하여 데이터를 전송하는 시스템으로써,

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

• First Author : Department of Electronics Engineering, Chungbuk National University, leejg1992@gmail.com 학생회원

° Corresponding Author : Department of Electronics Engineering, Chungbuk National University, ecomm@cnu.ac.kr, 정회원

논문번호 : 201807-212-A-RN, Received July 16, 2018; Revised October 22, 2018; Accepted November 21, 2018

여러 가지의 특징이 있다. IFFT(Inverse Fast Fourier Transform) 연산을 사용하여 간단하게 부반송파에 전송신호를 매핑할 수 있고, 수신기에서는 FFT(Fast Fourier Transform)를 사용하여 전송된 데이터를 복조한다. 또한, 단일반송파를 사용하는 이전의 시스템과는 달리 OFDM은 수신기에서 간단한 등화기를 사용하여 신호를 복조할 수 있으며 이는 다중 경로화 채널에서 매우 좋은 장점으로 작용한다. OFDM 시스템은 심볼의 시작 부분에 CP(Cyclic Prefix)가 더해져 GI(Guard Interval) 역할을 하며, 다중경로로 인한 딜레이가 심볼간 간섭을 주는 것을 막을 수 있다^{1,2}.

이러한 4세대 통신에 사용되는 OFDM 시스템을 더욱 개선하여 앞으로의 초고속 통신시스템 구축을 위한 연구가 많이 이루어지고 있다. 폭발적으로 증가하는 데이터 트래픽과 전송량을 사용자들에게 지원해 주기 위해 개선된 OFDM 시스템을 연구한다. 통신 네트워크의 전체적인 통신용량을 올리기 위한 방법 중, 한정된 대역폭 내에서의 전송하는 데이터 통신량을 결정하는 스펙트럼 효율을 올리는 방법에 대해서 여러 대안을 제시하고 있다. 주파수 자원은 한정적이기 때문에 이러한 한정적인 자원을 효율적으로 활용하여 초고속 통신을 이룰 수 있도록 스펙트럼 효율을 올릴 수 있는 방법에는 여러 가지가 있다.

그 중, 아날로그 통신방식에서 사용되는 SSB(Single Side Band) 변조방식이 있다. SSB 변조방식이란, 진폭 변조에 의해 생성되는 신호를 푸리에 변환하여 주파수 영역에서 보면 중심주파수를 기준으로 양쪽으로 스펙트럼이 생기게 된다. 여기서, 스펙트럼은 LSB(Lower Side Band)와 USB(Upper Side Band)가 된다. 이렇게 만들어진 신호는 원래의 신호와 힐버트 변환을 통하여 위상을 천이시킨 신호를 가지고 더하거나 빼져서 한 쪽 스펙트럼인 LSB 또는 USB만 전송을 하게 된다. 따라서 이를 통해 대역폭을 절반으로 줄일 수 있는 통신방식이다.

SSB 변조방식을 통해 사용하고자하는 대역폭을 절반으로 줄여서 통신을 하게 된다면, 이는 스펙트럼 효율을 향상시키는데 직접적인 도움이 된다. 하지만 SSB 변조방식은 아날로그영역에서 사용되는 통신 방식이기 때문에, 현 4세대 통신에 사용되는 OFDM과 같이 디지털영역의 통신에서 사용할 수 있도록 하는 방법이 필요하다. 그 중, DFT(Discrete Fourier Transform) 확산 기법을 사용하여 OFDM 시스템에 SSB 방식을 적용한 연구가 선행되었다^{3,4}. 참고문헌 [3]에서의 시스템은 DFT 연산의 특징을 이용하여 요구되는 대역폭을 절반으로 줄여서 통신한다. 또한, 이

방법은 힐버트 변환을 사용하지 않고 SSB 방식을 OFDM 시스템에 적용하는 방식이다. 이를 통해, 기존의 DFT spreading OFDM(Discrete Fourier Transform Spreading Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 시스템보다 SSB-DFT spreading OFDM(Single Side Band Discrete Fourier Transform Spreading Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 시스템이 비선형 HPA(High Power Amplifier)를 사용할 때 더 좋은 BER 특성을 확인하였다³.

참고문헌 [3]에서의 시스템은 DFT 확산의 길이를 M 으로 지정하여 연산을 진행한다. M 의 크기를 갖는 DFT 연산의 특징은 입력 값이 실수인 경우에 한하여 $(M/2)+1$ 값을 기준으로 양쪽이 켈레복소수의 형태로 대칭이 된다. 따라서 이를 이용하여 전송하려는 심볼의 대칭되는 부분을 제외하여 원래의 심볼 길이보다 작게 만들어 보내기 때문에 부반송파의 개수를 줄일 수 있고, 이는 사용하려는 대역폭을 줄일 수 있다. 하지만, FFT size를 N 이라고 가정하고 M 크기를 갖는 DFT 연산을 통해 SSB 심볼을 만들어낸다고 했을 때, 시스템의 FFT size의 정확히 절반이 되지는 않는다. M 크기의 DFT 연산을 통해 SSB 심볼을 만들어내면, 전송하려는 심볼의 길이는 $(M/2)+1$ 이 되며, 이는 $N/2$ 가 보다 크다.

따라서 시스템의 부반송파개수를 정확히 절반으로 나누어 $N/2$ 씩 부반송파를 사용할 수 있는 방법이 연구되었다^{4,5}. 기존의 M 크기를 갖는 DFT 연산은 $(M/2)+1$ 에서 좌우가 대칭되어 나타나기 때문에, 정확히 $N/2$ 값과 일치하도록 처음 만들어내는 심볼의 길이를 $(M-2)$ 로 지정하여 DFT 연산을 진행한다. 이를 통해, 시스템의 부반송파를 정확히 절반으로 줄여 사용하게 된다^{4,5}. 이에 대한 시스템 모델은 본문에서 다시 한번 설명하기로 한다.

OFDM 시스템은 OOB(Out-of-Band)전력 특성이 매우 높은 특징이 있다. 이는 인접 채널간 간섭으로 작용하기 때문에, 이를 최소화하기 위해서는 넓은 채널간의 간격이 필요하다. 이러한 채널간 간격은 한정된 주파수 자원을 효율적으로 사용하지 못하는 방식이다. 따라서 OOB 전력 특성을 낮추기 위한 연구가 진행되었다^{1,6-8}. 윈도잉 기법을 사용해 OOB 전력을 낮추어 주파수 자원을 좀 더 효율적으로 사용하게 된다면, 통신 용량의 전체적인 성능이 개선된다. 그 중, WR-OFDM 시스템은 기존의 윈도잉 방식과는 달리 별도의 심볼 연장 없이 윈도잉을 적용하는 방법이다⁹. 이러한 윈도잉 기법을 기존의 OFDM 시스템에 적

용하게 된다면, 다른 시스템과는 달리 시간영역에서의 연장이 없기 때문에 시간 자원 손실을 막을 수 있으며 이는 스펙트럼 효율 향상에 도움을 준다.

따라서, 본 논문에서는 참고문헌 [3]에서의 DFT 연산 기반의 SSB 방식을 통해 스펙트럼 효율을 향상시키며, 참고문헌 [9]에서의 WR-OFDM 시스템을 통해 기존의 OFDM의 높은 OOB 전력특성을 저감시키는 시스템을 설계한다. 따라서, DFT 연산을 기반으로 하는 SSB 방식을 WR-OFDM 시스템에 적용하여 성능을 평가한다.

II. 본 론

2.1 DFT spreading SSB OFDM

실수로 이루어진 데이터에 한하여 N-point DFT 연산을 하게 되면, 중간 값을 중심으로 양쪽의 데이터 값이 켈레복소수의 형태로 대칭되는 특징이 있다. DFT 연산을 통해 대칭된 형태로 이루어진 심볼의 값은 첫 번째 값부터 중간 값까지의 데이터를 LSB, 중간 값부터 마지막 데이터 값에 첫 번째 값이 더해진 USB 부분으로 나누어질 수 있다. 이 두 데이터 부분은 켈레복소수의 형태로 대칭된 값이기 때문에, 송신기에서는 LSB 또는 USB 한 쪽 부분만을 전송하더라도 수신기에서 복제를 통해 원래의 데이터를 복원할 수 있다³⁻⁵⁾. 따라서 이러한 성질을 이용하면 디지털 통신 시스템에 SSB 방식을 적용할 수 있다.

그림 1은 N-point DFT 연산을 거친 심볼의 구성을 나타내는 그림이다. 실수로만 이루어진 심볼을 DFT 연산을 하게 되면, 심볼 $S(k)$ 의 구성은 다음과 같다.

$$S(2), S(3), \dots, S(N/2) = S^*(N/2+2), \dots, S^*(N) \quad (1)$$

따라서 켈레복소수의 형태로 대칭되는 성질을 이용해 LSB와 USB 성분을 선택할 수 있다.

$$LSB = S(k) \quad (k = 1, \dots, (N/2) + 1) \quad (2)$$

$$USB = S(1), S(k) \quad (k = (N/2) + 1, \dots, N) \quad (3)$$

N-point DFT 연산을 하게 되면, 전송하려는 LSB 또는 USB 심볼의 길이가 FFT size인 N의 정확히 절반인 N/2보다 크게 된다. 따라서 참고문헌 [4, 5]에서는 FFT size의 정확히 절반의 길이를 갖는 심볼을 만들어냄으로써 LSB와 USB 데이터를 동시에 전송하는 시스템을 제안한다.

그림 2는 참고문헌 [4, 5]에서의 송신기를 그림으로

나타낸 것이다. (N-2)-point DFT 연산을 통해 FFT size의 정확한 절반 길이를 갖는 심볼을 만들어냄으로써 비트열을 A, B 동시에 사용하여 각각의 LSB 데이터를 부반송파에 매핑하는 시스템이다.

그림 3은 참고문헌 [4, 5]에서 사용한 두 개의 비트스트림을 사용하여 각각 (N-2)-point DFT 연산을 거친 후의 심볼의 모습을 나타낸 것이다. OFDM 시스템의 FFT size가 128, 즉 $N=128$ 일 때, 절반의 부반송파를 사용하기 위해서는 64의 길이를 갖는 심볼이어야 한다. 따라서 심볼은 (N-2)의 길이를 갖는 126의 심볼을 사용하여 DFT 연산을 하게 되면 64번째 데이터 값에서 대칭된 값을 갖는다.

그림 4는 부반송파에 매핑되는 두 개의 LSB 데이터를 나타내는 그림이다. 그림 3에서의 (N-2)-point DFT 연산을 통해 각각 64의 길이를 갖는 LSB 데이터가 두 개가 만들어질 수 있다. 따라서 이를 통해 그림 4에서와 같이 OFDM 시스템의 부반송파에 정확히

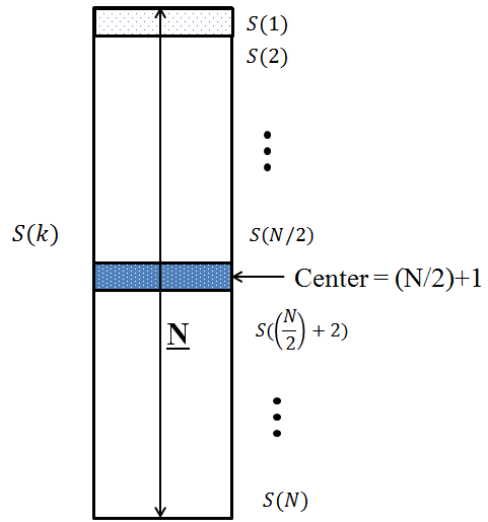


그림 1. N-point DFT 연산을 거친 심볼
Fig. 1. Symbol after N-point DFT operation

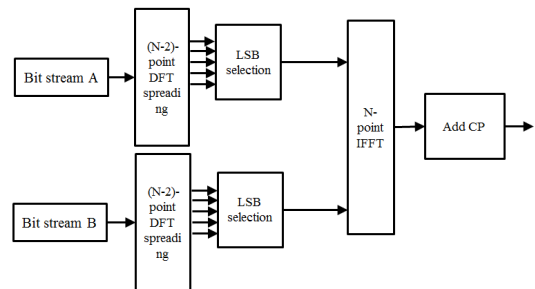


그림 2. 참고문헌 [4, 5]에서의 송신기 블록다이어그램
Fig. 2. Transmitter of reference [4, 5]

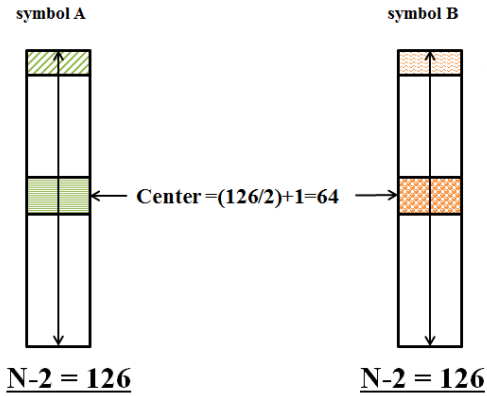


그림 3. (N-2)-point DFT 연산을 거친 심볼
Fig. 3. Symbol after (N-2)-point DFT operation

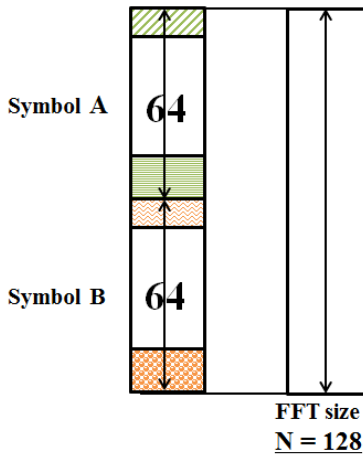


그림 4. 부반송파에 매핑되는 두 심볼 각각의 LSB 데이터
Fig. 4. LSB data of each of two symbols mapped to the subcarrier

크기가 맞게 되며 이를 부반송파에 매핑한다. 또한, 심볼 하나만 보내는 경우 시스템의 부반송파의 개수를 절반으로 사용하여 전송할 수 있으므로 대역폭이 절반으로 줄어들 수 있다.

참고문헌 [3-5]에서는 각각 N-point DFT 연산과 (N-2)-point DFT 연산을 통해 SSB 전송심볼을 만들어내었다. 하지만 이는 전송비트수의 차이가 있다. 따라서 스펙트럼 효율을 가장 높이는 방법으로 전송하려는 비트의 수를 최대한 많이 보내는 방식을 고안한다. 따라서 본 논문에서는 DFT 연산을 통해 만들어지는 SSB 전송심볼에 담겨진 비트의 수를 최대한으로 늘리는 방식을 제안한다.

그림 5는 참고문헌 [4, 5]에서의 시스템과 기존의 OFDM 그리고 설계하려는 시스템 각각의 전송 비트

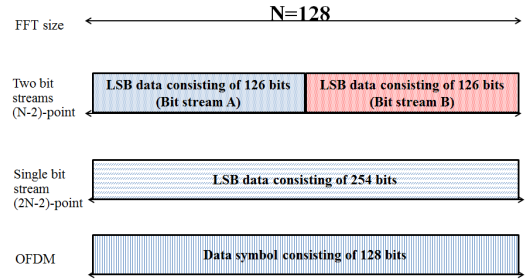


그림 5. 각 시스템별 전송되는 비트의 수 비교
Fig. 5. Comparison of the number of transmitted bits per system

의 수를 비교한 그림이다. 각 시스템별로 BPSK 변조를 하게 되었을 때, 하나의 심볼이 갖는 비트의 수는 1bit이므로 FFT size가 128인 기존의 OFDM 시스템은 128bit를 전송한다. 하지만, 적용한 (N-2)-point DFT 연산을 통해 SSB 방식을 적용하면 같은 FFT size에 총 252bit를 전송할 수 있다. 하지만, 두 개의 비트열을 나누어 각각 LSB를 처리해야하는 시스템의 복잡도가 증가한다. 따라서 이를 해결하며 간단하게 하나의 비트열을 사용해 심볼의 길이를 기존의 FFT size보다 크게 만들어 SSB 심볼을 만들게 되면, (2N-2)-point DFT 연산을 통해 전송하는 비트의 수를 254bit까지 늘리며 시스템의 복잡도도 감소시킬 수 있다.

그림 6은 본 논문에서 설계하고자하는 (2N-2)-point DFT 연산을 통한 SSB 방식을 적용하는 모습이다. FFT size를 128이라고 가정하면, (2N-2)의 값은 254가 된다. 따라서 심볼의 길이가 254가 되도록 데이터 비트를 변조하여 심볼을 만들어낸다. 그 후, (2N-2)-point

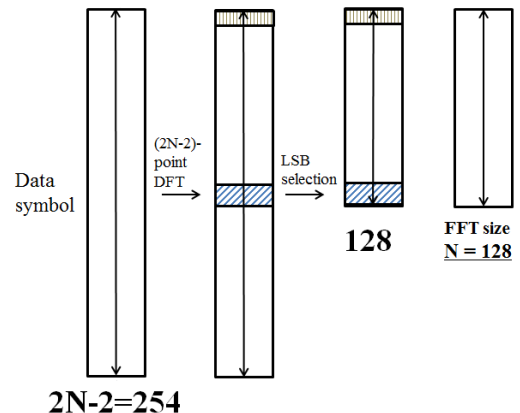


그림 6. (2N-2)-point DFT 연산을 통한 SSB 심볼이 생성되는 과정
Fig. 6. Process of generating SSB symbol through (2N-2)-point DFT operation

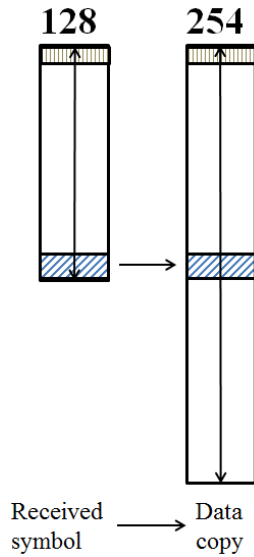


그림 7. 수신한 심볼을 복조하는 과정
Fig. 7. Process of recovering received symbols

DFT 연산을 하면 중앙값 128번째 데이터 값을 기준으로 켈레복소수 형태로 대칭되기 때문에 128의 길이를 갖는 LSB 데이터를 전송 심볼로 사용하여 부반송파에 매핑한다. (2N-2)-point DFT 연산의 경우 시스템의 FFT size에 맞게 심볼의 길이가 정해지므로 모든 부반송파를 사용하게 되며 대역폭이 기존의 OFDM 시스템과 같으며, 대역폭이 절반으로 줄어들 수 있는 (N-2)-point DFT spreading 방식과는 차이가 있다.

그림 7은 수신기에서 수신한 심볼을 복원하는 과정이다. 송신기에서 DFT 연산의 성질을 통해 실수인 데이터에 한하여, 중간 값을 기준으로 켈레복소수의 형태로 대칭되는 성질을 이용해 LSB 또는 USB 일부의 데이터만을 전송한다. 그렇기 때문에 수신기에서는 수신한 심볼을 켈레복소화하여 중간 값을 기준으로 대칭시켜 원래의 심볼로 복원할 수 있다. 이후, DFT 역연산을 통해 원래의 신호로 복조한다.

그림 8은 참고문헌 [4, 5]에서의 (N-2)-point DFT spreading 방식과 본 논문에서의 (2N-2)-point DFT spreading 방식을 비교한 그림이다. FFT size가 128로 동일할 때, (N-2)-point DFT spreading 시스템은 64개의 부반송파를 사용하고 (2N-2)-point DFT spreading 시스템은 128개의 부반송파를 사용한다. 이를 통해, 사용하는 대역폭의 차이가 발생한다.

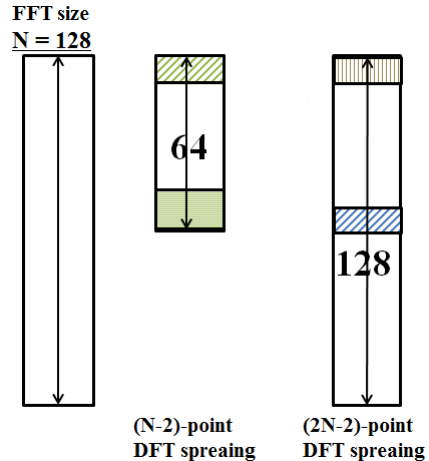


그림 8. (N-2)-point DFT spreading과 (2N-2)-point DFT spreading의 차이점
Fig. 8. Difference between (N-2)-point DFT spreading and (2N-2)-point DFT spreading

2.2 WR-OFDM

WR-OFDM 시스템은 기존의 심볼의 길이를 연장시켜 윈도잉을 적용하는 방법과 달리 별도의 연장 없이 직접 심볼에 윈도잉을 적용하는 시스템이다^[9].

OFDM 시스템은 OOB 전력이 높은 특징이 있기 때문에, 윈도잉을 통해 OOB 전력을 낮추는 처리가 필요하다. 대부분의 방식은 OFDM 심볼의 길이를 연장하여 데이터 부분에 손상이 없도록 연장된 부분에 윈도잉을 하여 OOB 전력을 낮춘다. 하지만 이러한 심볼의 연장은 시간자원에서의 손실이 된다. 따라서 WR-OFDM 시스템은 이러한 시간자원에서의 손실 없이 윈도잉을 적용함으로써, 효율성을 증가시킨다.

그림 9는 WR-OFDM 시스템의 송신기에서 윈도잉을 적용하는 과정이다. 일반적인 OFDM 시스템과 동일하게 데이터를 복제하여 CP를 삽입한다. 이후, 별도의 연장 없이 심볼의 양쪽에 W_L 길이만큼의 윈도잉을 적용한다.

그림 10은 수신기에서의 심볼을 복원하는 과정을 그림으로 나타낸 것이다. 수신한 심볼은 양쪽이 윈도잉으로 인해 신호가 왜곡되어 있는 상태이다. 따라서 이를 복원하기 위해 데이터를 복제하여 앞에 추가한 CP 부분에서 윈도우 길이 W_L 만큼의 데이터를 가져와서 복원한다. 데이터가 복제되어 만들어진 CP를 통해 데이터의 복원이 가능하기 때문에, 최대 윈도우 길이 W_L 은 CP길이의 반을 넘지 못한다. 이를 통해, 윈도잉을 하여 손상된 데이터 부분은 삭제하고 간섭받지 않은 부분을 가져와서 심볼을 복원하므로 수신기에서

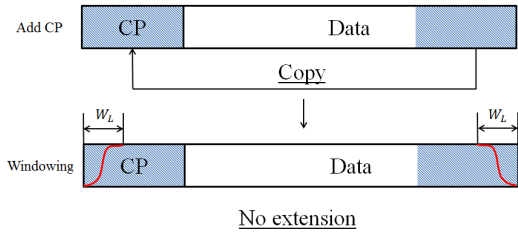


그림 9. WR-OFDM 윈도우 처리 과정
Fig. 9. Process of windowing in WR-OFDM system

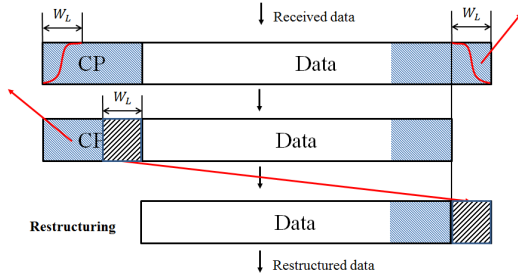


그림 10. 수신기에서의 심볼 복원 과정
Fig. 10. Process of restructuring data in receiver

데이터의 복조가 가능해진다.

2.3 설계하는 DFT 확산 단일측대파형 WR-OFDM 시스템 모델

다음은 본 논문에서 DFT 연산의 방법을 이용하는 SSB 방식과 WR-OFDM 시스템을 동시에 적용하는 DFT 확산 단일측대파형 WR-OFDM 시스템을 설계하여 평가한다.

그림 11은 평가하고자 하는 DFT 확산 SSB WR-OFDM 시스템의 구조를 나타내는 그림이다. 기존의 OFDM 시스템과는 DFT 연산을 통해 각 부반송파에 매핑되는 심볼이 다른 것이 차이가 있다. 또한, 기존의 OFDM 시스템에서 CP가 더해져 송신신호가 만들어지는 반면, DFT 확산 SSB WR-OFDM 시스템은 CP까지 더해져 만들어진 최종 송신신호에 윈도우를

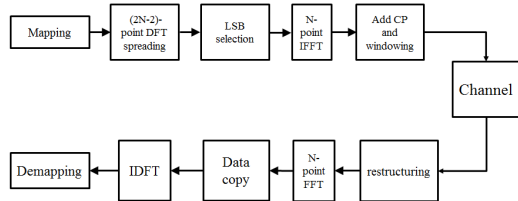


그림 11. DFT 확산 단일측대파형 WR-OFDM 시스템의 구성도
Fig. 11. Block diagram of DFT spreading SSB WR-OFDM system

을 하여 신호를 만든다. 만들어진 신호는 채널을 거쳐 수신기에 도착한다. 그 후, 그림 9에서와 같이 윈도우를 통해 손상된 데이터를 복구하는 과정을 거치게 된다. 또한, SSB 방식을 적용하여 원래의 데이터보다 적은 양의 LSB 또는 USB 데이터만을 수신하였기 때문에, 복제를 통하여 원래 신호를 복구할 수 있다.

III. 시뮬레이션 결과

본 논문에서는 DFT 확산 단일측대파형 WR-OFDM 시스템을 설계하고 성능을 평가한다. 따라서 다음과 같은 조건을 가지고 시스템을 성능을 평가한다.

그림 12는 DFT 확산 SSB WR-OFDM 시스템의 BER 성능을 나타내는 그림이다. 평가하려는 DFT 확산 SSB WR-OFDM 시스템은 각각 4-PAM, 8-PAM, 16-PAM 변조를 사용하여 시스템을 구성한다. 이는, DFT 연산의 성질을 이용해 SSB 방식을 적용하기 위해서는 DFT 연산의 입력 값이 실수여야 한다는 조건이 있기 때문이다. 따라서 이를 통해 BER 성능을 구해본 결과, 4-PAM은 16-QAM의 이론치와 8-PAM은 64-QAM의 이론치와 16-PAM은 256-QAM의 이론치와 같은 BER 성능을 나타낸다. 따라서 이는 DFT 확산 SSB WR-OFDM 시스템이 낮은 레벨의 변조를 사용하여 기존의 OFDM 시스템에서의 높은 레벨의 변조방식을 사용하는 시스템과 동일한 성능을 낼 수 있다는 것을 확인한다³⁾.

그림 13은 4-PAM 변조를 사용하여 DFT 확산 단일측대파형 WR-OFDM 시스템의 다중경로 채널에서의 BER 성능을 나타내는 그림이다. 그림 13은 한 채널에서 경로지연이 1인 경우부터, 32인 경우까지의 각각 다른 BER 성능을 나타낸다. 본 논문에서는 다중경로 채널에서 일어날 수 있는 채널 길이에 따라 시간 축에서 프레임의 길이가 늘어나는 현상만을 적용하여 시뮬레이션을 통해 BER 성능을 구하였다. 기존의

표 1. 시뮬레이션 조건
Table 1. Simulation conditions

| Parameters | Value |
|---------------|----------------------|
| Modulation | 4-PAM, 8-PAM, 16-PAM |
| FFT size | 128 |
| Window | Hanning |
| Window length | 16 |
| CP length | 32 |
| Channel tap | (1, 2, 3, ..., 32) |
| Channel | AWGN, Rayleigh |

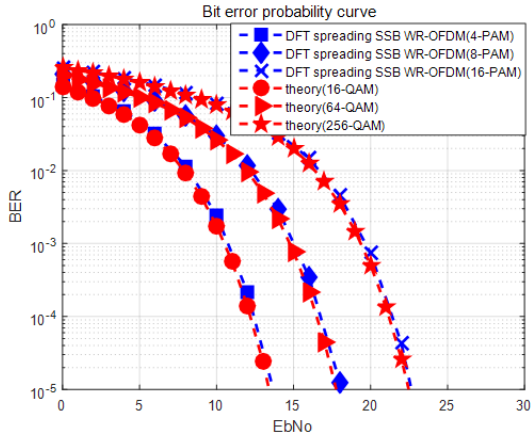


그림 12. DFT 확산 SSB WR-OFDM 시스템의 BER 성능
Fig. 12. BER performance of DFT spreading SSB WR-OFDM system

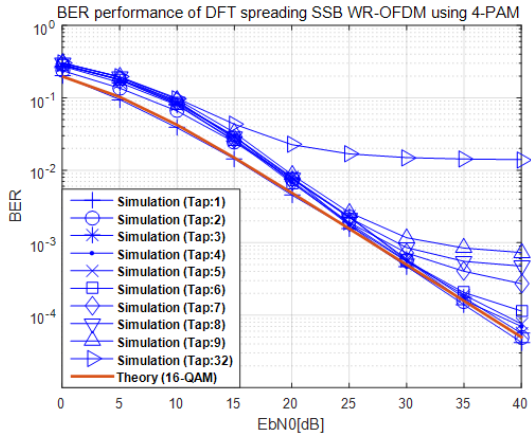


그림 13. 다중경로 페이딩 채널에서의 DFT 확산 단일측대파형 WR-OFDM 시스템의 BER 성능
Fig. 13. BER performance of DFT spreading SSB WR-OFDM system in Rayleigh fading channel

OFDM 시스템의 경우 CP의 길이가 32인 경우, 채널에서 경로지연이 32인 다중경로채널에서는 BER 성능의 열화 없이 잘 전달 수 있게 해준다. 하지만, DFT 확산 단일측대파형 WR-OFDM 시스템의 경우 수신기에서 CP를 활용하여 데이터의 복조가 이루어지는데, 경로지연에 의해 CP의 데이터가 왜곡이 됨으로 restructuring시에 왜곡된 데이터를 가지고 복조하게 된다. 따라서 채널의 경로지연에 따라 DFT 확산 단일측대파형 WR-OFDM 시스템은 BER 성능이 달라지게 된다. 그림 13으로 미루어 보았을 때, 채널의 경로지연이 4인 경우 까지는 BER 성능이 열화되지 않고 기존의 이론값과 동일한 성능을 보이지만, 그 이상이 되는 경우 점차 BER 성능이 열화되어 CP의 길이만큼

채널의 경로지연이 일어났을 때, error floor 현상이 발생하게 된다. 이를 통해, DFT 확산 단일측대파형 WR-OFDM 시스템은 다중경로 페이딩 채널에서 CP 길이만큼의 경로 지연을 견디지 못하는 단점이 있다. 또한, 이를 보완하기 위한 연구의 필요성이 있다.

그림 14는 다중경로 페이딩 채널에서 DFT 확산 단일측대파형 WR-OFDM 시스템의 각 변조별 BER 성능을 나타내는 그림이다. 그림 13에서 확인할 수 있듯이, 경로지연이 4인 경우까지는 AWGN 채널에서와 마찬가지로 각 이론값과 유사한 BER 성능을 보이는 것을 확인할 수 있다.

그림 15는 기존의 OFDM 시스템과 DFT 확산 단일측대파형 WR-OFDM 시스템의 OOB 전력특성을 비교한 그림이다. DFT 연산을 통하여 SSB 방식을 OFDM 시스템에 적용하여 DFT 확산 단일측대파형 WR-OFDM 시스템을 구현하였지만, 통상적으로 알고 있던 SSB 방식을 통한 스펙트럼이 절반으로 줄어드는 모습은 그림 15에서 찾아볼 수 없다. 이러한 이유는, SSB방식을 적용하여 OFDM 시스템을 구현하였지만, 기존의 OFDM 시스템과 동일한 개수의 부반송파를 사용하게 됨으로 대역폭의 차이가 없기 때문이다. WR방식의 윈도우는 윈도우의 길이가 CP의 길이에 영향을 받기 때문에, 그 중 가장 긴 윈도우의 길이인 CP 절반의 길이 16을 적용한다. 또한, 윈도우 함수는 Hanning 윈도우를 사용한다. 그림 15에서 확인할 수 있듯이 기존의 OFDM 시스템에 비해 DFT 확산 단일측대파형 WR-OFDM 시스템은 OOB 전력이 약 27dB 낮은 효과를 보인다.

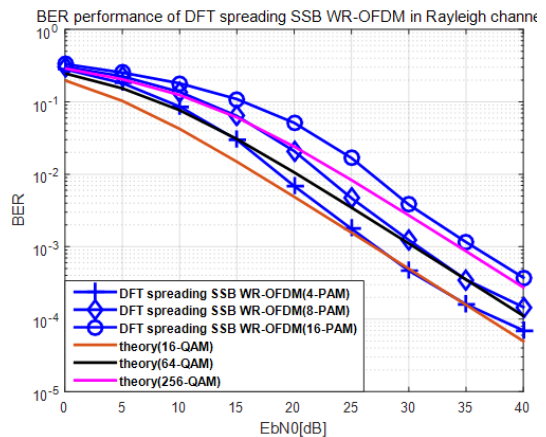


그림 14. 각 변조별 DFT 확산 단일측대파형 WR-OFDM 시스템의 BER 성능
Fig. 14. BER performance of DFT spreading SSB WR-OFDM system for each modulation

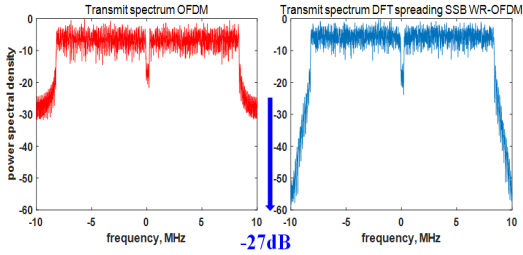


그림 15. OOB 전력 특성 비교(DFT 확산 단일채대파형 WR-OFDM 시스템이 윈도우 길이가 16인 경우에 25dB 낮은 OOB 전력 특성을 보임)
Fig. 15. Comparison of OOB characteristics (DFT spreading SSB WR-OFDM has 25dB lower OOB at window length 16)

표 2, 3, 4는 설계하는 DFT 확산 단일채대파형 WR-OFDM 시스템의 스펙트럼 효율을 계산한 표이다. 시뮬레이션에 사용된 FFT size는 128이므로 변조 방식별로 각각 4-PAM 변조는 3.96 bits/s/Hz, 8-PAM 변조는 5.95 bits/s/Hz, 16-PAM 변조는 7.93 bits/s/Hz로 나타난다. 이를 FFT size를 1024로 사용하게 되면, DFT 확산 단일채대파형에서의 4-PAM 변조는 기존의 16-QAM 변조와 거의 동일한 스펙트럼 효율을 내고, 8-PAM은 64-QAM, 16-PAM은 256-QAM과 거의 유사한 스펙트럼 효율을 갖는다. 따라서 이는 그림 11에서와도 확인할 수 있듯이 낮은 레벨의 변조를 사용하여 심볼을 구성한 DFT 확산 단일채대파형

표 2. 스펙트럼 효율(4-PAM 변조를 사용한 경우)
Table 2. Spectral efficiency(using 4-PAM modulation)

| Modulation | Number of subcarriers | Spectral efficiency |
|-----------------------------------|-----------------------|-------------------------------|
| DFT spreading SSB WR-OFDM (4-PAM) | N | $\frac{((2N-2) \times 2)}{N}$ |
| | 64 | 3.93 bits/s/Hz |
| | 128 | 3.96 bits/s/Hz |
| | 1024 | 3.99 bits/s/Hz |

표 3. 스펙트럼 효율(8-PAM 변조를 사용한 경우)
Table 3. Spectral efficiency(using 8-PAM modulation)

| Modulation | Number of subcarriers | Spectral efficiency |
|-----------------------------------|-----------------------|-------------------------------|
| DFT spreading SSB WR-OFDM (8-PAM) | N | $\frac{((2N-2) \times 3)}{N}$ |
| | 64 | 5.90 bits/s/Hz |
| | 128 | 5.95 bits/s/Hz |
| | 1024 | 5.99 bits/s/Hz |

표 4. 스펙트럼 효율(16-PAM 변조를 사용한 경우)
Table 4. Spectral efficiency(using 16-PAM modulation)

| Modulation | Number of subcarriers | Spectral efficiency |
|------------------------------------|-----------------------|-------------------------------|
| DFT spreading SSB WR-OFDM (16-PAM) | N | $\frac{((2N-2) \times 4)}{N}$ |
| | 64 | 7.87 bits/s/Hz |
| | 128 | 7.93 bits/s/Hz |
| | 1024 | 7.99 bits/s/Hz |

WR-OFDM 시스템은 기존의 OFDM 시스템에서 높은 변조레벨을 사용하여 심볼을 구성한 시스템과 거의 동일한 성능을 낸다.

IV. 결론

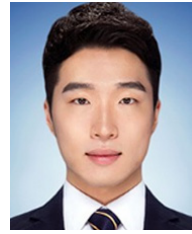
본 논문에서는 DFT 연산의 성질을 이용하여 SSB 방식을 OFDM 시스템에 적용하는 것과 동시에 WR 방식을 적용하여 DFT 확산 단일채대파형 WR-OFDM 시스템의 성능을 평가한다. 기존의 참고 문헌과는 달리 $(2N-2)$ -point DFT 연산을 적용하여 SSB 심볼을 만들어낸다. DFT 확산 단일채대파형 WR-OFDM 시스템의 BER 성능은 4-PAM 변조를 사용하였을 때, 기존의 16-QAM 시스템과 동일한 BER 성능을 나타낸다. 하지만, 다중경로 페이딩 채널에서는 기존의 OFDM 시스템처럼 CP의 길이만큼 경로 지연이 일어나게 되더라도 수신기에서 원활한 복조가 일어나는 반면, DFT 확산 단일채대파형 WR-OFDM 시스템은 경로 지연이 4 이하인 경우에만 수신기에서 복조가 가능하다. 따라서 다중경로 페이딩 채널에서 BER 열화현상의 단점을 보이며, 이를 보완하기 위한 새로운 수신처리의 연구가 필요시 된다. 또한, 8-PAM 변조를 사용하였을 때는 기존의 64-QAM와 같은 성능을, 그리고 16-PAM 변조를 사용하였을 때는 256-QAM 변조와 동일한 BER 성능을 낸다. DFT 확산 단일채대파형 WR-OFDM 시스템은 Hanning 윈도우를 사용하여 윈도우 길이를 16으로 하였을 때, 기존의 OFDM 시스템보다 약 27dB 낮은 OOB 전력 특성을 보인다. DFT 확산 단일채대파형 WR-OFDM 시스템의 스펙트럼 효율은 부반송파의 개수를 1024개 사용하는 경우, 각각 4-PAM 변조는 3.99 bits/s/Hz, 8-PAM 변조는 5.99 bits/s/Hz, 16-PAM 변조는 7.99 bits/s/Hz의 스펙트럼 효율을 나타낸다. 따라서 DFT 확산 단일채대파형 WR-OFDM 시스템은 실수로만 이루어진 낮은 레벨의 변조를 사용하여 기존의

OFDM 시스템에서 높은 레벨의 변조방식을 사용하여 구성된 시스템과 동일한 성능을 낼 수 있는 시스템임과 동시에, 기존의 OFDM 시스템보다 낮은 OOB 전력 특성을 보이며 시간자원에서의 손실 없이 원도형을 적용할 수 있으므로 주파수 자원을 효율적으로 사용하는 시스템이다.

References

- [1] F. Schaich and T. Wild, "Waveform contenders for 5G—OFDM vs. FBMC vs. UFMFC," *2014 ISCCSP*, pp. 457-460, May 2014.
- [2] U. Kumar, et al., "A waveform for 5G: Guard interval DFT-s-OFDM," *2015 IEEE GC Wkshps*, San Diego, CA, USA, Dec. 2015.
- [3] M. Umehira, et al., "Performance evaluation of SSB transmission of DFTs-OFDM using multi-level BPSK through nonlinear HPA," *IEEE VTC Spring*, pp. 1-5, Glasgow, 2015.
- [4] C. An, J. Lee, K. S. Jang, and H.-G. Ryu, "Design of improved DFT-s-SSB-OFDM and spectral efficiency in multiuser environment," *J. KIEES*, vol. 29, no. 3, pp. 192-199, Mar. 2018.
- [5] B. Kim and H.-G. Ryu, "Design and performance evaluation of improved DFT-s-SSB OFDM," *J. KICS*, vol. 42, no. 11, pp. 2086-2092. Nov. 2017.
- [6] F. Schaich, "Filterbank based multi carrier transmission (FBMC)—evolving OFDM: FBMC in the context of WiMAX," *2010 Eur. IEEE Wireless Conf.*, pp. 1051-1058, Apr. 2010.
- [7] R. Zayani, et al., "WOLA-OFDM: a potential candidate for asynchronous 5G," *2016 IEEE Globecom Workshops*, Washington, DC, USA, Dec. 2016.
- [8] M. Mukherjee, et al., "Reduced out-of-band radiation-based filter optimization for UFMFC systems in 5G," *2015 IEEE Veh. Technol. Conf.*, 2015.
- [9] C. An, B. Kim, and H.-G. Ryu, "WR-OFDM system and OOB spectrum comparison," *2017 IEEE ICUFN*, pp. 373-377, Jul. 2017.

이 준 구 (Jungu Lee)



2017년 2월 : 충북대학교 전자공학과(공학사)
2017년 3월~현재 : 충북대학교 전자공학과 석사과정
<관심분야> 무선통신시스템, 차세대 통신시스템

유 흥 균 (Heung-Gyoon Ryu)



1988년 2월~현재 : 충북대학교 전자공학과 교수
2002년 3월~2004년 2월 : 충북대학교 컴퓨터정보통신연구소 소장
<관심분야> 무선통신, 5G/B5G 이동통신, 위성통신, 통신회로 설계 및 통신처리