

# 수중통신에서 비선형 왜곡과 전력효율을 위한 DFT-spread OFDM 통신 시스템

준회원 이우민\*, 정회원 유흥균\*<sup>o</sup>

## DFT-spread OFDM Communication System for the Power Efficiency and Nonlinear Distortion in Underwater Communication

Woo-Min Lee\* Associate Member, Heung-Gyoon Ryn\*<sup>o</sup> Regular Member

### 요약

최근 수중 통신에 대한 관심이 급증하고 있으며, 수중 통신을 통한 음성 및 고해상도 영상 데이터와 같은 다양한 데이터 전송의 요구가 증가하고 있다. 수중 음향 통신 시스템의 성능은 수중 채널의 특성에 의해 크게 영향을 받으며, 특히 수중 채널 환경은 다중경로(Multi-path)에 따른 지연확산(delay spread)으로 인하여 데이터 전송 시 인접 심볼 간의 간섭(Inter Symbol interference: ISI)이 발생하여 통신의 성능을 저하시킨다. 본 논문에서는 지연 확산에 강한 성능을 나타내는 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 기법을 수중 통신 시스템에 적용하고, OFDM의 CP(Cyclic Prefix)를 이용하여 수중 채널 환경의 다중경로로 인한 지연 확산을 보상한다. 하지만 수중 통신 시스템에 OFDM을 적용할 때, OFDM 시스템이 갖는 고유한 문제인 높은 PAPR(Peak-to-Average Power Ratio)이 발생한다. 그러므로 본 논문에서는 높은 PAPR로 인한 신호의 비선형 왜곡을 피하고 증폭기의 효율을 위하여 DFT-spread OFDM 기법을 적용한다. DFT-spread OFDM 방식은 IFFT 수행 이전에 DFT(discrete Fourier transform) 확산을 수행하여 각각의 병렬 데이터를 모든 부반송파들에 실어 줌으로써 좋은 PAPR 저감 효과를 얻는다. 그러므로 본 논문에서는 OFDM 시스템을 통해 수중 채널에서 지연 확산에 대한 성능 이득을 보이고, 일반적인 OFDM 시스템보다 DFT-spread OFDM이 수중 통신 환경에서 더 적합한 통신 방식을 시뮬레이션을 통하여 보였다. 그리고 DFT-spread OFDM의 두 가지 자원 분배 방식(Interleaved, Localized)에 따른 성능을 분석하고 수중 통신 환경에서 자원 분배 방식에 따른 성능의 적응성에 대하여 논의하였다. 시뮬레이션 결과를 통해 CP 삽입을 통한 보상후의 BER 성능은 DFT-spread OFDM 방식이 일반 OFDM에 비하여 10<sup>-4</sup>에서 약 5-6dB 정도 좋은 것을 보였으며, 자원 분배 방식에 따른 BER 성능을 비교하였을 때, Interleaved 방식은 Localized 방식에 비하여 10<sup>-4</sup>에서 약 3.5dB 정도 좋은 것을 보였다.

Key Words : Underwater Communication, OFDM , DFT Spread OFDM, PAPR, Interleaved, Localized

### ABSTRACT

Recently, the necessity of underwater communication and demand for transmitting and receiving various data such as voice or high resolution image data are increasing as well. The performance of underwater acoustic communication system is influenced by characteristics of the underwater communication channels. Especially, ISI(inter symbol interference) occurs because of delay spread according to multi-path and communication performance is degraded. In this paper, we study the OFDM technique to overcome the delay spread in

\* 충북대학교 전자정보대학 전자공학과(ecomm@cbu.ac.kr) (° : 교신저자)  
논문번호 : KICS2010-04-152, 접수일자 : 2010년 4월 5일, 최종논문접수일자 : 2010년 8월 6일

underwater channel and by using CP, we compensate for delay spread. But PAPR which OFDM system has problem is very high. Therefore, we use DFT-spread OFDM method to avoid nonlinear distortion by high PAPR and to improve efficiency of amplifier. DFT-spread OFDM technique obtains high PAPR reduction effect because of each parallel data loads to all subcarrier by DFT spread processing before IFFT. In this paper, we show performance about delay spread through OFDM system and verify method that DFT spread OFDM is more suitable than OFDM for underwater communication. And we analyze performance according to two subcarrier mapping methods(Interleaved, Localized). Through the simulation results, performance of DFT spread OFDM is better about 5~6dB at  $10^{-4}$  than OFDM. When compared to BER according to subcarrier mapping, Interleaved method is better about 3.5dB at  $10^{-4}$  than Localized method.

### I. 서 론

수중 통신은 매질의 특성으로 인해 초음파를 사용하여야 하며, 채널의 특성은 지상에 비해 매우 복잡하다. 특히 수중 통신 시스템의 성능은 채널의 특성에 의해 크게 좌우되며, 수중 채널의 경우 전달과정에서 다중경로에 의해 수신 신호가 크게 왜곡된다. 수중에서 고속 데이터를 전송하려면 수중 통신 채널 특성을 결정하는 해수면, 수심 등의 시공간 변화에 따른 다중경로 특성이나 도플러 확산이 시스템의 설계에 고려되어야 하며, 이런 채널 특성의 변화는 인접 심볼간의 간섭(Inter Symbol Interference: ISI)을 발생시키는데 수중 통신에서는 이로 인한 통신 성능의 열화를 보상해야 한다. 이러한 수중 통신 채널의 특성 때문에 과거에는 FSK(frequency shift keying) 등과 같은 비동기 위상 변조기법을 이용하여 수중 통신 시스템을 구현하였다<sup>1)</sup>. 하지만 미국 WHOI(Woods Hole Oceanographic Institution)에서 PSK(phase shift keying) 기법을 이용한 수중 통신의 실험결과를 발표한 이후로 PSK나 QAM(quadrature amplitude modulation) 등과 같은 동기위상 디지털 변조 기법을 활용한 수중 통신 시스템 연구가 활발히 진행 중이다<sup>2)</sup>. 국내의 경우 수중 통신에서 전송률을 향상시키기 위해 송신 하이드로폰 어레이를 사용하거나 채널 추정을 이용한 방법들이 연구되었다<sup>3)</sup>. 또한 수중 채널 모델을 이용하여 FSK 방식뿐만 아니라, PSK와 같은 변조 기법에 따른 성능을 모의실험을 통해 성능을 분석하였으며, 최근에는 OFDM과 같은 다중 반송파 기법을 적용한 연구가 진행되고 있다<sup>15),16),18)</sup>. 현재 수중 음향 통신에서 대용량 정보 전송이 가능하고 인접 심볼간의 간섭에 좋은 OFDM 시스템의 적용을 고려하고 있지만 수중 채널에 대한 충분한 보상이 이루어지지 않고 있는 실정이다.

OFDM 시스템은 주파수 효율이 우수하고 고속

광대역 전송을 가능하게 한다. 또한 OFDM 시스템은 다중 경로 간섭 및 주파수 선택적 페이딩 채널에 의한 신호 왜곡에 대해 강인한 특성을 갖고, 이로 인해 복잡도가 낮은 주파수 영역 등화기의 사용이 가능하므로 수중 음향 통신 분야에서 각광받고 있다. 그러나 OFDM 신호는 다수의 반송파 사용으로 인해 시간 영역에서 신호의 중첩에 의한 높은 PAPR을 갖는다.

그러므로 본 논문에서는 수중 통신에 OFDM 시스템을 적용하는데 있어 문제점으로 작용하는 PAPR 문제를 해결하기 위하여 DFT-spread OFDM 적용한다. 다중 반송파 시스템에서 PAPR은 송신기의 전력 증폭기의 효율을 떨어뜨리고, 송신 신호의 비선형 왜곡을 일으켜 신호 품질을 나쁘게 한다<sup>9),10)</sup>. DFT-spread OFDM은 PAPR 저감을 위한 해결책으로 큰 관심을 받고 있으며 OFDM보다 3dB 정도 낮은 PAPR을 성능을 보인다. 그러므로 기본적으로 OFDM 방식을 채택하고 있는 DFT-Spread OFDM은 수중 채널에서 지연 확산에 대한 성능 이득을 보이고, 높은 PAPR을 줄이기 때문에 기존의 OFDM 시스템보다 수중 통신 환경에서 성능 향상을 보인다. 그리고 수중 채널에서 DFT-spread OFDM의 두 가지 자원 분배 방식(Interleaved, Localized)에 따른 성능을 분석하고, 수중 통신 환경에서 두 가지 자원 분배 방식의 적응성 및 적합성에 대하여 논의한다.

### II. 수중 음향 통신 채널

수중 환경에서 음파 신호는 수심, 수온, 전송거리, 해수면의 변화, 해저면의 상태 등으로 인해 다양하며 복잡한 특성을 가진다. 특히 천해의 경우 해수면과 해저면의 반사 등으로 인해 다중 전파 경로의 특성을 나타낸다. 각각의 다중경로 신호는 지연 시간  $\tau_k(t)$ 와 신호의 감쇄  $\alpha_k(t)$ 를 갖는다. 채널의 임펄스 응답은 다음과 같다.

$$g(\tau, t) = \sum_p \alpha_p(t) \delta[\tau - \tau_p(t)] \quad (1)$$

위의 식에서  $\tau_p(t)$ 와  $\alpha_p(t)$ 는 바닥이나 수표면이 기하학적이고, 수표면의 움직임을 예측할 수 없기 때문에 랜덤 프로세스로 표현한다. 전송신호가  $x(t)$  이고 채널을 통과하여 수신된 신호가  $y(t)$ 일 때, 다음과 같은 식으로 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} y(t) &= x(t) * g(\tau, t) + n(t) \\ &= \sum_p \alpha_p(t) x[t - \tau_p(t)] + n(t) \end{aligned} \quad (2)$$

위의 식에서  $n(t)$ 는 AWGN 이다. 시간과 주파수의 분산 때문에 채널의 특성은 시변적이고 주파수 선택적 채널의 특성을 띤다. 대략 최대 전파 지연  $\tau_{\max}(t)$ 의 역수가 coherence bandwidth가 된다.

### III. OFDM 시스템

OFDM (orthogonal frequency division multiplexing) 시스템은 sub-band 사이의 채널 간섭 없이 채널 간격을 최소화한 매우 효율적인 주파수 분할 다중 전송 기술로, 정보데이터를 많은 부반송파들을 이용하여 병렬 전송하고, 각 부반송파들은 서로 간의 직교성을 유지하며 고속 데이터 전송율과 함께 뛰어난 스펙트럼 효율을 갖는다. 그리고 디지털영역에서의 IFFT와 FFT 처리 기술을 이용하므로 하드웨어상 구현이 용이하며, 다중경로 간섭 및 주파수 선택적 페이딩에 강한 특성을 갖는다.

그림 1은 수중 통신에서 OFDM 시스템의 간단한 송수신 블록도를 나타낸다. 입력 데이터는 맵퍼를 거쳐 PSK나 QAM 복소 데이터 심볼로 변환된다. S/P 변환 후의 데이터는 N 개 IFFT를 통과하면서 OFDM 신호로 변조된다. IFFT 블록을 거친 신호에 Cyclic Prefix를 추가하여 최종 출력 신호를 생성한다. 기저 대역의 출력 신호는 다음과 같다.

$$x(t) = \sum_{k=0}^{N-1} X_k \cdot e^{j2\pi f_k t} = \sum_{k=0}^{N-1} X_k \cdot e^{j \frac{2\pi}{NT_s} kt} \quad (3)$$

OFDM에서 N개의 심볼에 대한 블록은  $\{X_k, k = 0, 1, \dots, N-1\}$ 이고, 각각의 심볼은 N개의 부반송파들로 변조된다. 각각의 부반송파  $f_k, (k = 0, 1, \dots, N-1)$ 는 직교 한다. 여기서  $f_k = k\Delta f$ 이고,  $\Delta f = 1/NT_s$  이고,  $T_s$ 는 original 심볼구간  $t = nT_s, (n = 0, 1, \dots, N-1)$ 이다. 반송 주파수  $f_c$ 로 송신한 신호는 식 (2)이다.

$$x_{uc}(t) = \sum_{k=0}^{N-1} X_k \cdot e^{j2\pi \left( \frac{k}{NT_s} + f_c \right) t} \quad (4)$$

본 논문에서 고려한 수중 채널을 통과한 OFDM 신호는 앞 장의 수중 채널 특성을 갖고 수신 된다. 수중 채널 특성을 반영한 수신 신호는 다음과 같다.

$$y_R(t) = \sum_p \alpha_p(t) \sum_{k=0}^{N-1} X_k \cdot e^{j2\pi \left( \frac{k}{NT_s} + f_c \right) [t - \tau_p(t)]} + n(t) \quad (5)$$

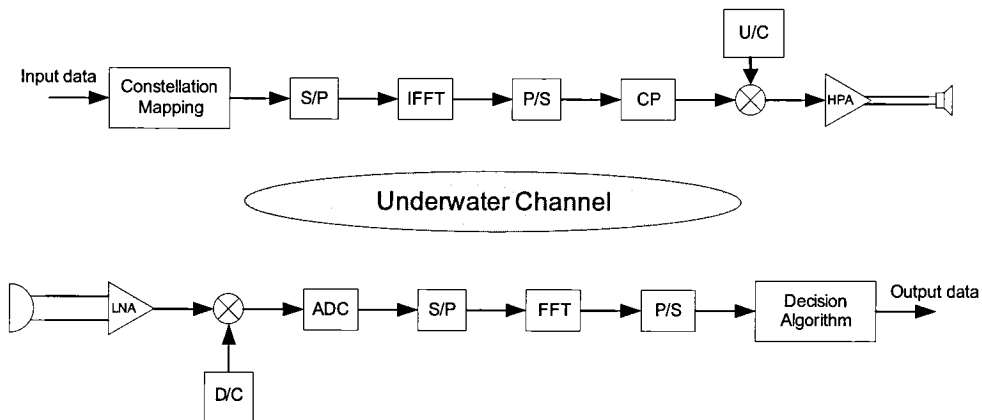


그림 1. 수중 통신 OFDM 시스템 블록도  
Fig. 1. OFDM system for underwater communication

여기서  $\alpha_p(t)$ 는 다중 경로로 인한 신호 감쇄이고  $\tau_p(t)$ 는 지연 시간이다.  $n(t)$ 는 AWGN이다. 하향 변환 후 수신된 신호는 LNA를 거친 후, Inverse OFDM 과정을 거쳐 데이터를 복조 한다. 수중 음향 통신 신호는 다중경로 특성으로 인해 인접 심볼 간 간섭(ISI)에 영향을 받으며, 이 영향으로 인해 통신 성능이 열화 된다. OFDM 시스템은 심볼 사이에 보호 구간을 삽입하여 ISI를 방지하는 좋은 장점이 있다. 본 논문에서는 ISI와 인접 채널 간 간섭(ICI: inter-channel interference)를 줄이기 위하여 CP를 삽입한다. CP 길이는 예상 되는 채널의 최대 지연 확산 보다 길어야 하며, 본 논문에서는 다중 경로로 인한 지연 확산을 최대한 피하기 위해 최대 CP 길이를 사용한다.

#### IV. DFT-spread OFDM 시스템

DFT-Spread OFDM 시스템은 각각의 병렬 데이터를 모든 부반송파들에 실어 줌으로써 좋은 PAPR 저감 효과를 얻는다. 수중 통신에서 기존의 OFDM 시스템은 CP 삽입으로 수중 채널에서 발생하는 다중 경로에 의한 지연 확산에 대하여 통신 성능을 확보할 수 있기 때문에 수중 통신에 매우 좋은 방식으로 고려되고 있다. 하지만 OFDM 시스템에서 높은 PAPR로 인해 발생하는 성능 열화 문제를 반드시 고려해야 한다. 그러므로 본 논문에서는 OFDM의 장점을 유지하면서 PAPR을 줄이기 위한 방법으로 DFT-Spread OFDM을 적용한다.

그림 2은 DFT-spread OFDM 시스템의 블록도이다. 본 논문에서는 [12]의 수학적 표현들을 사용한다.  $M > N$ 에서  $M$ 은 전체 부반송파 수이고,  $N$ 은

각각의 DFT 수이다. 입력 데이터는 DFT 크기에 맞추어 QPSK 복소수 심볼에  $x_n$ 을 생성한다 ( $n=0, \dots, N-1$ ). DFT 변환을 거친 후 출력 신호  $X_k$ 는 다음과 같다.

$$X_k = \sum_{n=0}^{N-1} x_n \cdot e^{-j \frac{2\pi}{N} kn} \quad (6)$$

DFT-Spread OFDM 시스템의 특징 중 하나는 DFT보다 IFFT 크기가 크기 때문에 부반송파 배분이 가능해지며, 부반송파 배분은 신호의 PAPR 특성을 다르게 갖게 한다. DFT 변환 후 부반송파 배분을 한 신호를  $\tilde{X}_l$ 라 하면, IFFT 후 출력 신호는 다음과 같다.

$$\tilde{x}_m(t) = \sum_{l=0}^{M-1} \tilde{X}_l e^{j \frac{2\pi}{MT} l t} \quad (7)$$

여기서  $M$ 은 IFFT 크기이고,  $T_s$ 는 original 심볼 구간,  $t = l T_s$ , ( $l = 0, 1, \dots, M-1$ )이다. DFT-Spread OFDM 신호는 앞 장에서 보인 OFDM 신호와 비슷한 출력 신호를 갖지만, IFFT 전의 DFT 확산으로 인해 PAPR이 줄어든다.

반송 주파수  $f_c$ 로 상향 변환 한 송신 신호는 식 (3)와 같은 형식을 갖는다. 수중 채널을 통과한 DFT-Spread OFDM 신호는 다음과 같다.

$$\tilde{y}_R(t) = \sum_p \alpha_p(t) \sum_{l=0}^{M-1} \tilde{X}_l e^{j 2\pi \left( \frac{l}{MT} + f_c \right) [t - \tau_p(t)]} + n(t) \quad (8)$$

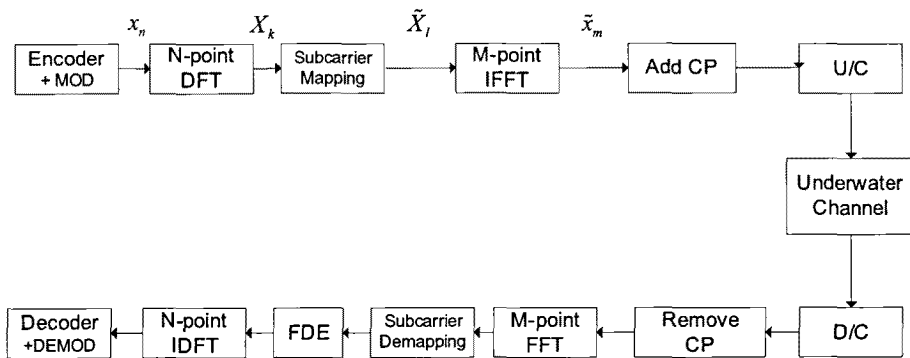


그림 2. DFT-spread OFDM 시스템  
Fig. 2. System model of DFT-spread OFDM

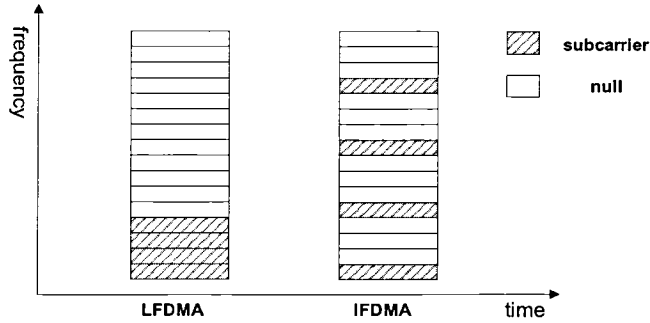


그림 3. DFT-spread OFDM 시스템의 부반송파 할당  
Fig. 3. Sub-carrier allocation of DFT-spread OFDM system

DFT-Spread OFDM 시스템도 OFDM 방식을 기본으로 하기 때문에 CP 삽입으로 수중 채널에서 발생하는 다중 경로로 인한 지연 확산에 대해 좋은 성능을 갖는다. 뿐만 아니라 DFT-Spread OFDM 시스템은 수신기에서 간단한 주파수 영역 등화 방식으로 인해 수중 채널에서 발생하는 도플러 지연 확산 또는 오프셋 등을 보상할 수 있으므로 기존의 OFDM 방식 보다 더 수중 통신에 적합한 방식이다. 하지만 본 논문에서는 다중 경로로 인한 지연 확산에 DFT-Spread OFDM 시스템의 적합성을 논의하므로 주파수 영역 등화 방식은 시뮬레이션 상에서 고려하지 않는다.

또한 DFT-Spread OFDM 시스템은 DFT와 IFFT 크기가 다른 점 때문에 발생하는 부반송파 맵핑에 대하여 고려한다. 부반송파 맵핑 방식에는 LFDMA (localized frequency division multiple access), IFDMA(interleaved frequency division multiple access), Random FDMA 방식이 있으며, 이 세가지는 각각 다른 PAPR 특성을 갖는다<sup>[12],[13]</sup>.

### V. 시뮬레이션 결과 및 분석

본 논문에서 시뮬레이션에 사용한 모의수중 채널 환경은 [16]을 참고하여 구성하였으며 파라미터는 표 1과 같다. 대역은 8000Hz, 즉 8kHz로 할당하였고, 최대 지연시간은 50ms이다. 따라서 최소 coherent bandwidth는 20Hz이다. 그림 4는 수중 채널의 다중 경로 신호의 임펄스 응답이다. 그림에서와 같이 수중 통신 채널은 다중경로의 특성을 가지며, 수중 통신 신호는 다중경로 특성으로 인해 인접 심볼 간 간섭(ISI)이 발생하고 이 영향으로 인해 통신 성능이 열화 된다.

수중 통신에서 OFDM 시스템은 CP 삽입으로 수중 채널에서 발생하는 다중 경로에 의한 지연 확산에 대하여 통신 성능을 확보할 수 있기 때문에 수중 통신에 매우 좋은 방식이지만, 높은 PAPR로 인해 발생하는 성능 열화 문제를 반드시 고려해야 한다. 그러므로 본 논문에서는 OFDM의 장점을 유지 하면서 PAPR을 줄이기 위한 방법으로 DFT-Spread OFDM을 사용하였다. 전체 부반송파  $M$ 은 256, 각각의 사용자는 부반송파를 64로 할당하고( $N=64$ ), interleaved 맵핑에서 확산 인자  $Q$ 는 4로 하였다. 기저대역 변조 방식은 QPSK로 하고 송신 데이터 블록은 10000으로 하여 PAPR과 BER의 성능을 확인한다.

수중 채널의 시변성을 고려하여 각각의 다중경로 신호의 크기와 지연 시간을 랜덤으로 나타내었다. 하지만 시뮬레이션 상황에선 보상성능과 시스템의 성능 비교를 위하여 랜덤값이 아닌 고정값을 대입하여 시뮬레이션 하였다.

표 1. 시스템 규격  
Table 1. System Specification

|   |                            |
|---|----------------------------|
| Bandwidth : $B$   | 8000 Hz                    |
| Maximum Delay Spread : $\tau_{max}$                       | 50 ms                      |
| Coherent Bandwidth : $B_c=1/\tau_{max}$                   | 20 Hz                      |
| Number of Sub-carrier : $M$<br>(Such that $B_c \gg B_s$ ) | 512<br>( $20 \gg 15.625$ ) |
| Sub-carrier Bandwidth : $B_s = B/M$                       | 15.625 Hz                  |
| Guard Interval : $T_g (\tau_{max} \leq T_g)$              | 50 ms                      |
| Symbol Duration : $T = 1/B_s$<br>( $T \gg T_g$ )          | 64 ms<br>( $64 \gg 50$ )   |
| Symbol Rate : $R_s=1/(T + T_g)$                           | 8.77 symbols/sec           |
| Number of Bits per Sub-carrier : $M_b$                    | 2(QPSK Mod.)               |

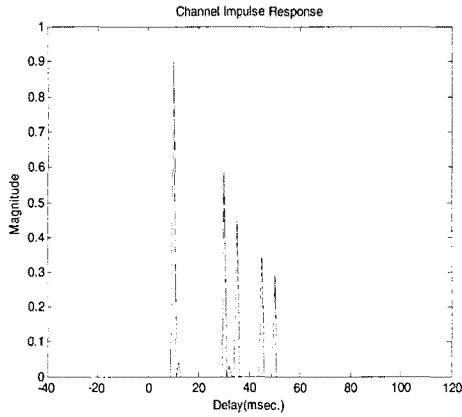


그림 4. 수중 채널의 임펄스 응답  
Fig. 4. Impulse response of underwater channel

그림 5는 비선형 증폭기 SSPA(solid state power amplifier)를 사용한 OFDM 시스템의 다중경로 채널에서의 CP 유무에 따른 BER 성능 곡선이다. 지연 신호의 감쇄 크기가 0.2이고 지연 시간이 30ms 일 때의 OFDM 신호의 성능을 나타낸 것이다. 위의 결과에서와 같이 OFDM 신호가 CP를 삽입함으로써 다중경로 환경에서 시스템의 성능이 보상됨을 확인할 수 있다.

그림 6는 DFT-spread OFDM과 OFDM의 PAPR 성능을 보여준다. 위의 결과에서 DFT-spread OFDM 방식이 기존의 OFDM 방식보다 PAPR 성능이 좋은 것을 알 수 있다. DFT-spread OFDM의 부반송과 할당에 따라 PAPR 성능이 크게 달라짐을 확인할 수 있다.

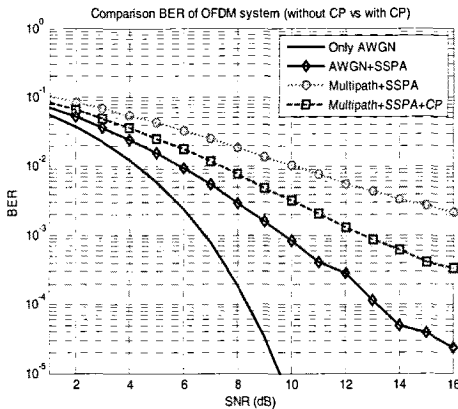


그림 5. CP의 유무에 따른 OFDM 시스템의 BER 성능 비교 ( $\alpha=0.2, \tau=30ms$ )  
Fig. 5. Compare the BER of OFDM system according to CP ( $\alpha=0.2, \tau=30ms$ )

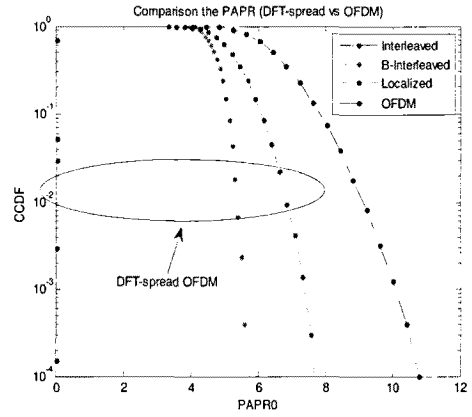


그림 6. OFDM과 DFT-spread OFDM의 자원할당에 따른 PAPR 비교  
Fig. 6. Compare the PAPR of OFDM and DFT-spread OFDM

그림 7는 DFT-spread OFDM과 OFDM의 BER 성능을 보여준다. PAPR의 특성과 마찬가지로 BER 특성 역시 DFT-spread OFDM 시스템의 성능이 기본 OFDM 시스템의 성능에 비해 BER 성능이 좋은 것을 확인할 수 있다.

그림 8은 CP삽입을 통하여 수중채널의 다중경로 영향을 보정한 DFT-spread OFDM 시스템과 OFDM 시스템의 BER 성능을 보여준다. 다중경로 환경에서 CP를 삽입하였을 때, 성능 그래프와 비교하여 성능이 개선됨을 볼 수 있다. 특히 DFT-spread OFDM의 경우 그림 8의 결과에서 보였던 성능이 크게 보상된 것을 볼 수 있다. CP 삽입에 의한 보상 후의

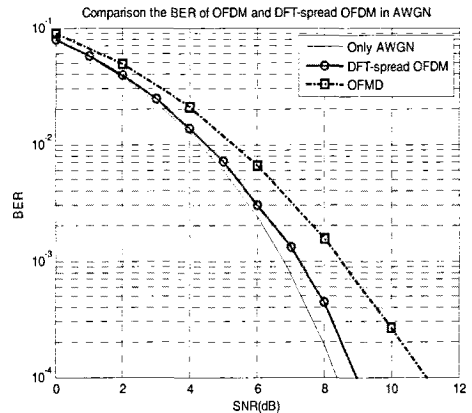


그림 7. SSPA를 사용한 OFDM과 DFT-spread OFDM의 BER 성능  
Fig. 7. Compare the BER of OFDM and DFT-spread OFDM with SSPA

참 고 문 헌

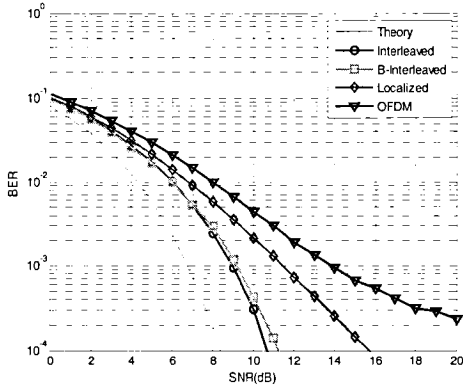


그림 8. CP를 삽입하여 다중경로 채널을 보정한 BER 성능 비교  
Fig. 8. BER performance in Multi-path Channel with CP

성능은 DFT-spread OFDM 시스템은 자원분배 방식에 따라 Interleaved 방식이 가장 좋은 것을 보였고 OFDM 보다  $10^{-4}$ 에서 더 좋은 BER 성능을 보였다. 다중경로 환경 조건은 그림 5와 같이 동일하게 설정하여 시뮬레이션 하였다.

VI. 결 론

본 논문에서는 수중 채널에서 고속 데이터 전송을 위해 OFDM 방식의 통신 시스템을 설계하고 OFDM 시스템의 단점인 PAPR 저감을 위하여 DFT-spread OFDM 기법을 사용하였다. 그리고 DFT-spread OFDM 신호의 수중 채널의 다중경로 환경에서 부반송파 배분에 따른 성능변화를 분석하여 수중 채널에 가장 적합한 혹은 가장 좋은 성능을 나타내는 시스템에 대한 연구를 하였다. 마지막으로 수중채널의 환경에서 신호에 DFT-spread OFDM 시스템의 신호에 CP를 삽입하여 성능을 개선한 BER 성능을 분석하였다. BER 성능 곡선의 결과에서 다중경로 신호의 크기와 지연시간이 커질 수록 성능의 열화가 커짐을 확인할 수 있었고, CP 삽입에 의한 보상 후 성능은 DFT-spread OFDM 시스템이 OFDM 시스템에 비하여  $10^{-4}$ 에서 약 5~6dB 정도 좋은 것을 보였으며, 자원분배 방식에 따라 Interleaved 방식이 Localized 방식에 비하여  $10^{-4}$ 에서 약 3.5dB 더 좋은 BER 성능 보였다. 결과적으로 수중 통신 환경에서의 시뮬레이션 결과 DFT-spread OFDM 방식이 일반적인 OFDM 시스템과 비교하여 PAPR 저감과 향상된 BER 성능을 보였다.

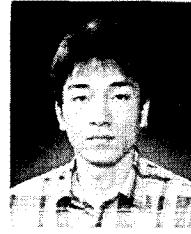
- [1] Daniel B. Kilfoyle and Athur B. Baggeroer, "The state of art in underwater acoustic telemetry," *IEEE J. Oceanic Eng.*, Vol.25, No.1, pp.4-27, 2000.
- [2] L. Freitag, M. Stojanovic, M. Grund, S.Singh, "Acoustic Communications For Regional underwater Observatories," in *Proc. Oceanology International 2002*, Mar., 2002.
- [3] M. Suzuki and T. Sasaki, "Digital acoustic image transmission system for deep sea research submersible," *IEEE Oceanic Eng. Conf.*, pp.567-570, Oct., 1992.
- [4] Oe-Hyung Lee, Yoon-Jun Son, and Ki-Man Kim, "underwater acoustic communications using channel estimation," *IEEE Oceanic Eng. Conf.*, Vol.4, pp.2453-2456, Oct., 2002.
- [5] A. Kaya and S. Yauchi, "An acoustic communication system for subsea robot," *IEEE Oceanic Eng. Conf.*, Vol.3, pp.765-770, 1989.
- [6] L. Cimini Jr., "Analysis and Simulation of a Digital Mobile Channel Using Orthogonal Frequency Division Multiplexing," *IEEE Trans. On Commun.*, Vol.33, No.7, pp.400-411, July, 1985.
- [7] D. Falconer, S. L. Ariyavisitakul, A. Benyamin-Seeyar and B. Eidson, "Frequency Domain Equalization for Single-Carrier Broadband Wireless Systems," *IEEE Commun. Mag.*, Vol.40, No.4, pp.58-66, April, 2002.
- [8] 3rd Generation Partnership Project (3GPP), "Technical specification Group Radio Access Network; Physical Layer Aspects for Evolved UTRA," <http://www.3gpp.org/ftp/Specs/htmlinfo/25814.htm>, Sep., 2006.
- [9] D. Galda and H. Rohling, "A Low-Complexity Transmitter Structure for OFDM-FDMA Uplink Systems," in *Proc. of the IEEE VTC*, Vol.4, pp.1737-1741, May, 2002.
- [10] R. Dinis, D. Falconer, C. T. Lam and M. Sabbaghian, "A Multiple Access Scheme for the Uplink of Broadband Wireless Systems," in *Proc. of the IEEE Globecom*, Vol.6, pp.3803-

3812, Nov., 2004.

- [11] A. M. Tonello, N. Laurenti and S. Pupolin, "Analysis of the Uplink of an Asynchronous Multi-user DMT OFDMA System Impaired by Time Offsets, Frequency Offsets and Multi-path Fading," in Proc. of the *IEEE VTC*, Vol.3, pp.1094-1099, Oct., 2000.
- [12] H. G. Myung, J. Lim and D. J. Goodman, "Peak-to-Average Power Ratio of Single Carrier FDMA Signals with Pulse Shaping," in Proc. Of the *IEEE PIMRC*, pp.1-5, Sep., 2006.
- [13] Anja Sohl, Anja Klein, "Comparison of Localized, Interleaved and Block-interleaved FDMA in terms of pilot multiplexing and channel estimation," *Eusipco2007*.
- [14] C. Rapp, "Effects of HPA-nonlinearity on a 4-DPSK/OFDM-signal for a digital sound broadcasting system," Proc. *2nd European Conference on Satellite Communications*, pp.179-184, Oct., 1991.
- [15] Jeong-woo Han, Se-young Kim, Ki-man Kim, Seung-yong Chun, Kwon Son, "Design of OFDM System for High Speed Underwater Communication," *CSE 2009*, August 29-31, Vancouver, Canada.
- [16] Byung-Chul Kim, I-Tai Lu, "Parameter Study of OFDM Underwater Communication System," *OCEANS 2000 MTS/IEEE Conference and Exhibition*, Sept.11~14, Vol.2, pp.1251-1255, 2000.
- [17] Nejah NASRI, Abdennaceur KACHOURI, Laurent ANDRIEUX, Mounur SMAET, "Design Consideration For Wireless Underwater Communication Transceiver," *SCS2008, 2nd International Conference*, Nov.7~8, pp.1~5, 2008.
- [18] Nejah NASRI, Helmi BEN HNIA, Abdennaceur KACHOURI, Mahmoud ABDELLAOUI, "Modulation/Demodulation Techniques With FPGA's Architecture to improve OFDM Wireless Underwater Communication Trasceiver," *DTIS 2006 International Conference*, Sept.5~7, pp.400-403. 2006.

이 우 민 (Woo-Min Lee)

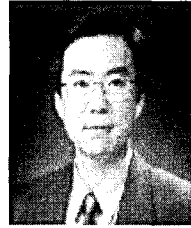
준회원



2009년 2월 충북대학교 전기전자컴퓨터공학부 학사  
 2009년 2월~현재 충북대학교 전자공학과 석사과정  
 <관심분야> 무선통신, 4세대 이동통신, 디지털 통신방식, 수중통신 등

유 흥 균 (Heung-Gyoon Ryn)

정회원



1988년~현재 충북대학교 전자공학과 교수  
 2002년 3월~2004년 2월 충북대학교 컴퓨터정보통신연구 소장  
 1996년~현재 IEEE, IET 논문심사위원  
 2002년 한국전자과학회 학술상

수상

2008년 ICWCM2008 국제학술대회 "Best Paper Award" 수상

<관심분야> 무선통신 시스템, 위성통신, 3G/4G 이동통신 시스템, 통신회로 설계 및 통신신호처리