

논문 2012-49-11-25

## 수중 음향 채널에서 OFDM 시스템의 성능 분석

(Performance Analysis of an OFDM System over an underwater acoustic channel)

강 희 훈\*, 이 영 중\*, 한 완 옥\*\*

(Heehoon-Kang, Youngjong-Lee, and Wanok-Han)

### 요 약

최근 심해 해난 구조 통신, 해저 탐사와 환경오염에 대한 모니터링과 같은 서비스에서 수중 음향 채널을 통한 데이터의 전송은 고속이 요구되고 있다. 그러나 수중 음향 채널은 매우 복잡하고 지속적인 시변 특성을 가지므로 양질의 통신 서비스를 제공하기란 쉽지 않다. 이러한 수중 음향 채널의 열악한 환경상에서 고속의 데이터 전송율과 신뢰성 그리고 강건성을 제공하기 위해서 다중경로 지연확산과 동기오류를 가지는 OFDM 시스템에 대한 성능개선 방안을 제안한다.

### Abstract

Such as disaster rescue in deep water, undersea exploration and monitoring for environmental pollution, many applications require the acoustic communication for high data rate over underwater acoustic channel. As underwater channel is very complex and is time-varying, In this paper, The proposed OFDM system with synchronization errors and multipath delay spread is analyzed for high data rate and reliability and robust service over UWA channels.

**Keywords :** Orthogonal Frequency Division Multiplexing(OFDM), Acoustic, Underwater Communication, Multipath, Doppler shift)

### I. 서 론

지난 10여년 동안 수중 음향 통신(UnderWater Acoustic Communication : UWAC)은 지속적인 발전을 거듭해 왔다. UWAC은 최근 환경 시스템의 오염 감시, 해양 오일 산업의 원격제어나 심해의 과학적 데이터등을 수집하기 위해서 다양한 분야에서 관심이 집중되고 있다. 상업적이나 군사 분야와 같은 많은 응용 분야에서

잠수함이나 심해 무인 장치와의 실시간 통신에 대한 요구가 증가하고 있는 추세이다. 이러한 수중 음향 통신에서 고속 데이터를 전송할 수 있는 OFDM (Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 전송기술이 적용되고 있다.<sup>[1~4]</sup> 수중 전송매체를 사용하는데 있어 주된 제약은 매우 복잡하고 지속적으로 변화하는 바다의 특성이다. 수중 음향채널이 사용되고 있다. 이러한 특성에 의해서 UWA 매체의 사용은 아날로그 음성 통신 시스템으로 제한되고 통신도 긴급통신으로 한정되어 사용되어 왔다. 그러나 최근에는 다양한 해양 서비스를 위해서 고속의 데이터 전송이 요구되고 있으며 그에 따른 신뢰성도 요구되고 있다.<sup>[5~6]</sup> 이러한 요구에 대해서 수중 채널의 복잡성과 지속적인 시변 특성에 대해서 고속의 데이터 전송을 보장하고 통신 시스템의 신뢰성과 강건성을

\* 정회원, 여주대학교 전자과  
(Department of Electronic Engineering, Yeosu Institutes of Tech.)

\*\* 정회원, 여주대학교 자동차과  
(Department of Automobile engineering, Yeosu Institutes of Tech.)

접수일자: 2012년5월15일, 수정완료일: 2012년10월24일

제공하기 위해서 다중경로 지연확산과 동기오류를 가지는 OFDM를 고려하여 성능을 분석한다.

## II. OFDM 시스템

### 1. 시스템 블록도

그림 1은 본 논문에서의 성능분석을 위해서 제안한 OFDM 시스템 시뮬레이션 블록도를 나타낸다.

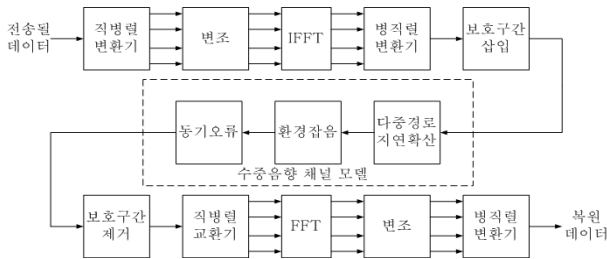


그림 1. 수중 음향 채널에 제안한 OFDM 시스템 블록도

Fig. 1. The proposed OFDM system for simulation under an underwater acoustic channel.

#### 가. 직병렬 변환

입력되는 직렬 데이터 스트림이 직병렬변환기에서 전송에 적합한 워드 크기로 변환된다. 워드 크기로 DBPSK(Differential Binary Phase-Shift Keying)는 1[bits/symbol], DQPSK은 2[bits/symbol], 차동16진 PSK은 4[bits/symbol]이다. 이 데이터들은 전송에서 하나의 반송파에 각 워드 데이터를 할당함으로써 병렬로 전송된다.

#### 나. 변조

반송파 하나로 전송되는 데이터는 이전 심볼에 대해서 차동으로 부호화되고 위상편이변조(Phase Shift Keying : PSK) 변조 포맷에 사상된다. 차동 부호화는 초기 기준 위상이 필요하기 때문에 가상실험 환경에서는 추가적인 심볼이 시작에서 추가된다. 그 후 심볼에 대한 각 데이터는 변조 방법에 기초해서 위상에 사상된다.

#### 다. 역푸리에 변환

변조등과 같이 스펙트럼에 대한 작업이 수행된 후, 역푸리에 변환은 이이 부합하는 시간 파형으로 변환한

다. 그 다음 보호구간이 각 심볼의 시작에 부가된다.

#### 라. 보호 구간

보호구간(Guard Period)은 2 부분으로 구성된다. 보호구간의 반은 진폭크기가 0인 신호로 구성된다. 나머지 반은 전송되어질 심볼의 주기 확장으로 구성된다. 이는 포락선 검파에 의해서 쉽게 복원될 수 있도록 심볼 타이밍을 제공한다. 보호구간이 추가된 후, 심볼은 직렬 파형으로 다시 변환되고 이는 OFDM 전송을 위한 기본적인 기저대역신호가 된다.

#### 마. 수신부

수신부는 기본적으로 송신부의 역과정을 수행한다. 보호구간이 제거되고 각 심볼에 대해서 푸리에변환이 수행된다. 그 후 수신된 신호에 대한 복조과정이 진행되어 원 데이터를 복원한다.

## III. 수중음향 채널의 특성

수중 음향 통신채널은 매우 복잡한 특성을 나타낸다. 이러한 복잡성은 채널이 이질적이라는 것을 나타낸다. 주로 고체나 기체의 입자들에 의해서 수중의 이질성과 밀도 그리고 온도 기술에 의해서 수중 채널의 불완전성이 나타난다.

일정한 바닷물의 이동과 해저 바닥과 해수표면과 같은 채널 경계들은 복잡성을 더 증가시킨다. 이러한 복잡한 채널 특성의 영향은 강력한 다중 경로와 도플러 현상을 나타낸다. 이러한 현상들은 일정하지 않고 지속적인 시변 특성을 가진다. 수중 채널에 대한 복잡한 특성은 간섭과 반향, 기하학적인 왜곡과 흡수에 기인한 전송 손실, 환경 잡음, 송신기와 수신기사이의 상대적인 이동으로 인한 도플러 확산등 4가지 관점에서 정의할 수 있다.<sup>[7~10]</sup>

#### 가. 다중경로 현상

그림 2는 수중 음향 채널의 다중경로를 나타낸다. 해 표면과 해저바닥의 경계는 에너지를 반사한다. 이러한 반사파는 다양한 경로를 통해서 송신기에서 수신기에 도달한다. 이는 더 나아가 불완전한 경계에 의해서 보다 복잡해진다. 수중 경로의 전체적인 다중경로 현상은 신호의 시간 분산을 야기한다. 시간 확산은 깊은 수중

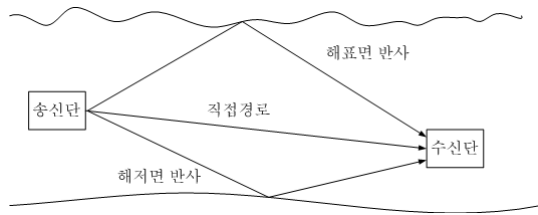


그림 2. 수중음향 채널의 다중경로 모델  
Fig. 2. The Multipath Model of an underwater acoustic channel.

의 수초에 비해서 얇은 수중에서 수백 밀리 초 만큼 많은 높을 수 있다. 높은 주파수에서, 전체 시간 확산은 경계에서 흡수와 수중에서 감쇠로 인해서 적다.

본 논문에서의 채널은 채널길이 2000[m], 채널 깊이 300[m], 송수신기의 깊이 50[m], 해수면과 해저면에 의한 손실 3[dB]를 사용한다.<sup>[7]</sup> 이 수중 음파 채널에서 2차 다중경로는 사용하지 않았으며 다중경로 중 가장 큰 영향을 미치는 1차분만을 적용하였다. [7]로부터 채널모델은 직접파와 감쇠를 겪은 1차 다중경로의 손실을 4[dB]로 설정하고 있으며 직접파 신호의 0.63배에 해당한다.

나. 전송손실

음파의 세기는 기하학적 확산과 흡수 매커니즘에 의해서 수중을 전파하는 동안 감쇠된다. 수중에서 음파의 감쇠는 RF(Radio Frequency)전자기파에 비해서 무시될 수 있지만 수중에서 흡수되는 에너지의 손실은 상당하다. 수중에서 발생하는 기하학적 확산에 기인한 손실은 구형이거나 원통형 특성이다. 이는 TL(Transmission Loss : 전송손실)이라고 표기하며 이는 음향 에너지의 손실율로 정의하며 식(1)와 같다.<sup>[8]</sup>

$$TL = 20\log(P_0/P_R) \tag{1}$$

여기서 P0는 음향원으로부터 1[m]떨어진 점에서 압력을 나타내며 PR은 음향원으로부터 R[m] 떨어진 범위에서 압력을 나타낸다.

일반적인 형태의 수중채널에서의 전송 손실은 식(2)와 같이 표현된다.

$$TL = N \times \log(R) - \alpha R \tag{2}$$

여기서 SPL은 [dB re 1uPa]에서 잡음의 침투 음향 압력 레벨, SL은 [dB re 1uPa]에서 잡음원의 음향 레벨, R은 음향원으로부터 거리, N은 기하학적 확산 계수,

$\alpha$ 는 흡수 계수이다. 높은 N과  $\alpha$  값은 음향의 빠른 감쇠와 관계가 있고 낮은 값은 반대로 느린 감쇠를 발생한다. 10[Km] 미만의 범위에서 선형 감쇠  $\alpha$ 항은 일반적으로 무시된다. N=20인 값에 대해서 역제곱에 비례하는 음향의 구형 확산에 해당한다.

다. 환경잡음

환경 잡음은 수신된 SNR에 영향을 주고 송신 전력을 조절하게 한다. 환경 잡음 관심 영역에 대해서 주파수에 따라 일반적으로 감소한다. 해변 환경이나 수중 작업장은 깊은 해저 환경보다 잡음이 더 많다.

라. 도플러 천이 영향

도플러 천이는 송신기와 수신기 사이의 상대적인 이동이나 물의 이동에 의해서 나타난다. 한 방향에 대해서 1[knots.KHz]당 0.35[Hz]의 주파수 천이가 발생한다. 상대적인 이동이 양방향인 경우, 0.70[Hz/(knots. KHz)]의 주파수 천이가 발생한다. 흡수 손실과 송수신기 특성에 의해 야기되는 채널 대역의 부족으로 인해서, 도플러 확산은 가용 대역을 축소시킨다.

IV. 가상실험 결과

수중음향채널에서 OFDM의 성능을 검증하기 위한 시뮬레이션 시스템 파라미터를 표 1에 정리한다.

표 1. 가상실험을 위한 매개변수  
Table 1. Parameters for the simulation.

파라미터	값
표본주파수	50000[Hz]
FFT/IFFT	2048
보호구간	4[ms]
보호구간 유형	보호구간의 반은 '0', 반은 심볼의 주기 확장
부반송파 변조	차동 BPSK, 차동 QPSK, 차동 16PSK
심볼 구간(주기 프리픽스 제외)	40[ms]
심볼 구간(파일럿 심볼 포함)	45[ms]
부반송파 수	200
반송파 간격	50[Hz]
주파수 대역	10000~20000[Hz]

가. 수중음향 채널에 대한 OFDM 시스템 성능 분석

그림 3은 수중음향 채널에 대한 2진 PSK-OFDM, QPSK-OFDM, 16진 PSK-OFDM 시스템의 성능을 나타낸다. 그 결과는 2진 PSK의 성능이 가장 좋음을 나타내고 있으나 전송량은 가장 낮다. 부반송파의 변조레벨에 대해서 4[dB]수준이 전송전력이라면 2진 PSK를 사용하는 것이 좋으며 20[dB]이상이라면 16진 PSK를 사용하는 것이 좋다는 것을 알 수 있다.

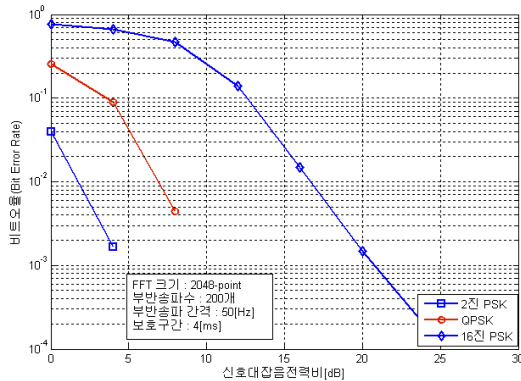


그림 3. 각 변조방식에 대한 OFDM의 BER성능  
Fig. 3. BER verse SNR for OFDM for different modulations.

나. 다중경로 지연확산 수중음향 채널에 OFDM 시스템 성능 분석

그림 4는 수중음향 채널에서 다중경로 반사파에 의해서 수신된 OFDM 신호에 대한 영향을 분석한 결과를 나타낸다. 가상실험을 위해서 반사파 신호는 위에서 언급한 직접 경로 신호에 대해서 지연시간 53[ms]이고 크기가 4[dB]정도인 약한 1차 가장 강한 다중경로 신호 하나만을 고려한다. 그림 4는 256개의 표본보다 적은 지연 확산에 대해서 BER(Bit Error Rate)이 대단히 낮음을 나타내고 있다. 이 가상실험에서 사용된 보호구간은 256개의 '0'으로 구성된 데이터와 심볼 주기를 확장한 256개의 데이터를 사용하였다.

그 결과 OFDM 신호에 보호구간을 삽입하여 지연확산에 대한 강건성을 나타냄을 알 수 있었다. BER 성능은 심볼간 간섭에 의해서 급격히 악화되는데 지연확산이 매우 길 때 최악의 BER 성능이 나타냄을 알 수 있었다. 이러한 현상은 강한 심볼간 간섭에 의한 것이라는 것을 이 가상실험을 통해서 알 수 있었다.

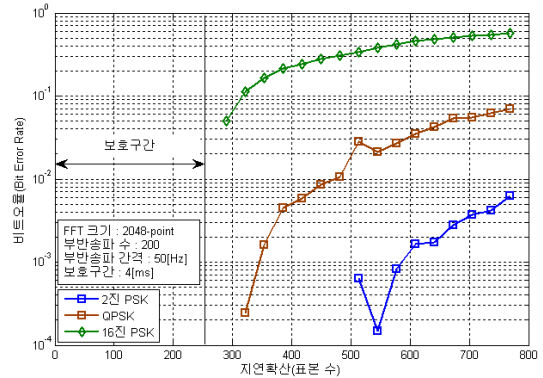


그림 4. 수중음향 채널에서 제안한 OFDM의 지연확산에 대한 내성  
Fig. 4. Delay Spread tolerance of the proposed OFDM in an underwater acoustic channel.

다. OFDM에서 심볼 시작 타이밍 오류가 성능에 미치는 영향

심볼 시작 타이밍 오류에 대한 환경은 OFDM 수신기가 초기에 스위치를 온할 때 송신된 신호와 동기가 완벽하게 일치하지 않을 경우에 발생하는 문제이다. 좋은 성능을 가지는 OFDM 시스템을 위해서 동기방법이 요구된다. 수중음향 채널상에서 OFDM 신호를 프레임으로 분할하여 전송하는 방법을 채택하였다. 각 프레임은 10에서 1000개 사이의 심볼을 전송하고 각 프레임의 시작에, 널(Null) 심볼이 삽입된다. 이러한 과정은 프레임의 시작을 포락선 검파할 수 있도록 한 것이다. 그러므로 포락선 검파의 사용은 단지 한 쌍의 표본내에서 검파되는 시작을 허용하고 시스템내 잡음에 종속된다. 이로써는 타이밍의 정확도가 충분한지 알 수 없다. 그

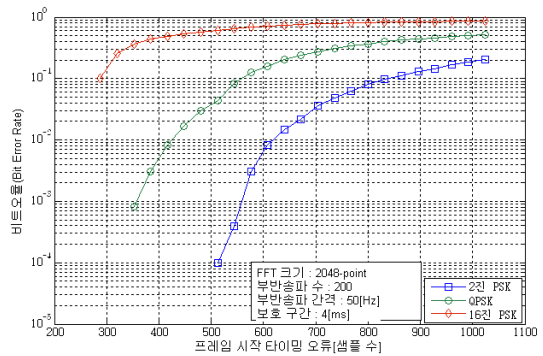


그림 5. 수신된 OFDM 신호에 대한 프레임 시작 동기 오류의 영향  
Fig. 5. Effect of frame synchronization error on the received OFDM signal.

림 5는 BER상에서 심볼 타이밍 시작 오류의 영향을 나타낸다. 이는 BER에 대한 영향이 나타나기 전까지의 시작 시간이 256 표본까지 오류를 가질 수 있다는 것을 보여준다. 이 표본 길이는 보호 구간의 주기 확장과 같으며 신호의 직교성을 유지하기 위한 보호구간에 의한 것이다. 실제 시스템에서 타이밍 오류는 초기나 나중에 만들어 진다. 이와 같이 어떤 수신기는  $-128 \sim +128$ 의 오류를 허용하기 위해서 예측 시작시간을 중간에 설정하기도 한다. 부가적으로 만약 신호가 다중경로 지연 확산에 영향을 받는다면 보호 구간이 시작 타이밍 오류에 대한 영향을 최소화 할 수 있다.

## V. 결 론

본 논문에서는 기존의 무선통신 채널에 비해 매우 복잡한 구조로 감쇠와 다중경로 신호등이 발생하는 수중 음향채널에 대해서 다중경로 지연확산과 프레임 시작 동기 오류가 발생하는 OFDM에 대한 성능을 분석하였다. 시뮬레이션 결과는 수중 음향채널에서 신호의 지연 확산 및 동기 오류로 발생하는 OFDM 시스템의 성능 저하는 보호구간을 삽입함으로써 해결됨을 나타내었다. 또한 실제 OFDM 시스템의 구현시 향후 수중음향 채널에서 OFDM의 구현에 대한 방법도 논의하였다.

## 참 고 문 헌

- [1] P. J. Gendron, "Orthogonal frequency division multiplexing with on-offkeying: Noncoherent performance bounds, receiver design and experimental results," U.S. Navy Journal of Underwater Acoustics, vol. 56, no. 2, pp. 267-300, Apr. 2006.
- [2] M. Stojanovic, "Low complexity OFDM detector for underwater channels," in Proc. of MTS/IEEE OCEANS conference, Boston, MA, Sept. 18-21, 2006.
- [3] W. G. Jeon and Y. S. Cho, "An equalization technique for OFDM and MC-CDMA in a multipath fading channels," in Proc. of IEEE Conf. on Acoustics, Speech and Signal Processing, pp. 2529-2532, Munich, Germany, May 1997.
- [4] B. Li, S. Zhou, M. Stojanovic, L. Freitag, and P. Willett, "Multicarrier communication over

- underwater acoustic channels with nonuniform Doppler shifts," IEEE Journal of Oceanic Engineering, vol. 33, no. 2, Apr. 2008.
- [5] S. S. Riaz Ahamed, "PERFORMANCE ANALYSIS OF OFDM", Journal of Theoretical and Applied Information Technology, p23~30, 2008.
- [6] M. Chitre, S. H. Ong, and J. Potter, "Performance of coded OFDM in very shallow water channels and snapping shrimp noise," in Proceedings of MTS/IEEE OCEANS, vol. 2, 2005, pp. 996-1001.
- [7] Yuri Labrador, Masoumeh Karimi, Deng Pan, and Jerry Miller, "Modulation and Error Correction in the Underwater Acoustic Communication Channel", IJCSNS International Journal of Computer Science and Network Security, VOL.9 No.7, July 2009.
- [8] Ram Pattarkine, "High Rate OFDM Acoustic Link for Underwater Communication", PVG's College of engineering and Technology, 44, Vidyanagari, Parvati Darshan Pune India 411009.
- [9] [http://www.underwaternoise.org.uk/measuring\\_noise/transmission\\_loss.shtml](http://www.underwaternoise.org.uk/measuring_noise/transmission_loss.shtml).
- [10] 박지현(Ji Hyun Park), 김종욱(Jong Wook Kim), 윤종락(Jong Rak Yoon), "수중 다중경로 채널에서 수면변동에 의한 지연확산이 텍스트 전송성능에 미치는 영향", 電子工學會論文誌 第48卷 TC編 第1號, pp.1-107, 2011.1.

— 저 자 소 개 —



**강 희 훈**(정회원)  
 1997년 2월 서울과학기술대학교  
 전기공학과 졸업.  
 1999년 8월 광운대학교 대학원  
 전자공학과 졸업.  
 2003년 8월 광운대학교 대학원  
 전자공학과 졸업.

<주관심분야 : 유무선 통신시스템, USN 통신,  
 SDR, 해저통신>



**한 완 옥**(정회원)  
 1985년 광운대학교 전자공학과  
 학사 졸업.  
 1987년 광운대학교 전자공학과  
 석사 졸업.  
 1995년 광운대학교 전자공학과  
 박사 졸업.

<주관심분야 : 자동차 통신, 로봇 및 전장 제어,>



**이 영 중**(정회원)  
 1975년 2월 광운대학교  
 응용전자공학과 졸업.  
 1984년 2월 광운대학교 대학원  
 전자재료공학과 졸업.  
 1990년 8월 광운대학교 대학원  
 전자재료공학과 졸업.

<주관심분야 : 반도체, 센서 소자, 통신 및 소자>