

수중 음향 환경에 따른 CDMA와 OFDM 성능 분석

Performance Analysis of CDMA and OFDM on Underwater Acoustic Environments

이 호 준* · 정 재 학**

* 주저자 : 인하대학교 전자공학과 박사과정

** 교신저자 : 인하대학교 전자공학과 교수

Ho Jun Lee* · Jaehak Chung**

* Dept. of Electornics Eng., Univ. of Inha

** Dept. of Electornics Eng., Univ. of Inha

† Corresponding author : Jaehak Chung, jchung@inha.ac.kr

Vol.17 No.5(2018)

October, 2018

pp.135~142

pISSN 1738-0774

eISSN 2384-1729

<https://doi.org/10.12815/kits.2018.17.5.135>

2018.17.5.135

Received 5 October 2018

Revised 23 October 2018

Accepted 24 October 2018

© 2018. The Korea Institute of Intelligent Transport Systems. All rights reserved.

요 약

본 논문은 수중 음향 채널 환경에 따른 CDMA(code division multiple access)와 OFDM(orthogonal frequency division multiplexing) 전송기법의 장단점을 비교 분석한다. 이를 위해서 r.m.s.(root mean square) 지연시간과 도플러 주파수 그리고 다중 경로의 수를 변화시켜가며 다양한 수중 음향 채널에서 전산 모의실험을 수행하였다. r.m.s. 지연시간과 도플러 주파수가 각 전송기법의 설계치 내의 수치이며 동일한 전송률을 갖는 경우 CDMA가 OFDM에 비해 우수한 성능을 갖는 것을 보였다. 그러나 도플러가 설계치보다 큰 경우에는 CDMA의 성능이 저하되어 OFDM이 CDMA보다 우수한 것을 보였다.

핵심어 : 수중 음향 통신, 수중 음향 채널, CDMA, OFDM

ABSTRACT

This paper compares and analyzes advantages and disadvantages of CDMA(code division multiple access) and OFDM(orthogonal frequency division multiplexing) transmission techniques for underwater acoustic channel environments. Computer simulations were carried out in various underwater acoustic channels with varying r.m.s.(root mean square) delay, doppler frequency and the number of multipaths. When r.m.s. delay and doppler frequency are within the tolerance of designed transmission schemes, the computer simulations show that CDMA has better BER performance than that of the OFDM. However, when the doppler frequency exceeds the tolerance, BER performance of the CDMA decreases.

Key words : UWA communication, UWA channel, CDMA, OFDM

I. 서론

해양 환경에서의 수중 음향 통신은 지상과 달리 음파를 사용한다. 수중 음향 채널은 송신단에서 전송한 신호가 해수면과 해저면에 의해 반사되어 수신단으로 들어올 때 음파의 속도가 약 1,500 m/sec로 느리기 때문에 다중경로의 지연시간이 지상에 비해 길다(Han et al., 2010). 따라서 긴 지연시간과 다중경로로 인해 발생하는 ISI(inter-symbol interference)가 지상에 비해 미치는 영향이 크며 채널의 r.m.s.(root mean square) 지연시간이 길어짐에 따라 상관 대역폭이 좁아져 주파수 선택적 페이딩에 의해 신호가 왜곡되게 된다(Catipovic, 1990). 또한 수중 음향 채널은 송수신단이 고정되어 있어 이동성이 없더라도 해수의 흐름이나 온도, 파도 등의 원인으로 인해 도플러 효과가 발생하게 된다. 도플러 효과는 시간 영역에서의 선택적 페이딩을 발생시키며 설계된 슬롯 길이보다 상관시간이 짧을 경우 채널 추정 오차가 발생되어 신호 복원 성능이 저하된다(Kilfoyle et al., 2000).

이러한 문제들을 극복하기 위해 수중에서는 CDMA(code division multiple access)와 OFDM(orthogonal frequency division multiplexing) 전송기법을 주로 사용한다(Lee et al., 2017). CDMA는 상호 직교성을 만족하는 확산 코드를 이용하기 때문에 다중 경로로 인해 발생하는 ISI를 줄일 수 있다. 또한 CDMA의 경우 확산 인자(spreading factor, SF)로 인한 어레이 이득과 Rake 수신기로 인한 시간영역 다이버시티 이득을 얻을 수 있다. 그리고 OFDM은 최대 지연시간보다 긴 CP(cyclic prefix)를 통해 ISI를 줄일 수 있으며 주파수 영역에서 채널 코딩 및 반복전송 기법을 통해 주파수영역 다이버시티 이득을 얻을 수 있고 주파수 선택적 페이딩에 강한 장점이 있다(Fazel., 1993).

그러나 수중 음향 채널의 환경적인 요인에 따라 OFDM에 비해 CDMA의 신호 복원 성능이 우수한 경우와 그 반대의 경우가 존재한다. 따라서 본 논문에서는 다양한 수중 음향 채널 환경에 따라 어떤 통신 기법을 선택해야하는지를 결정하기 위해 r.m.s. 지연시간, 도플러 효과 그리고 다중 경로의 수를 변화시켜가며 CDMA와 OFDM의 성능을 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 2장에서 CDMA와 OFDM 전송기법에 대해 설명한 후 3장에서 다양한 수중 음향 채널에 대해 전산 모의실험을 수행하고 각각의 기법들을 분석한다. 그리고 4장에서 결론을 맺는다.

II. 수중 음향 통신 기법

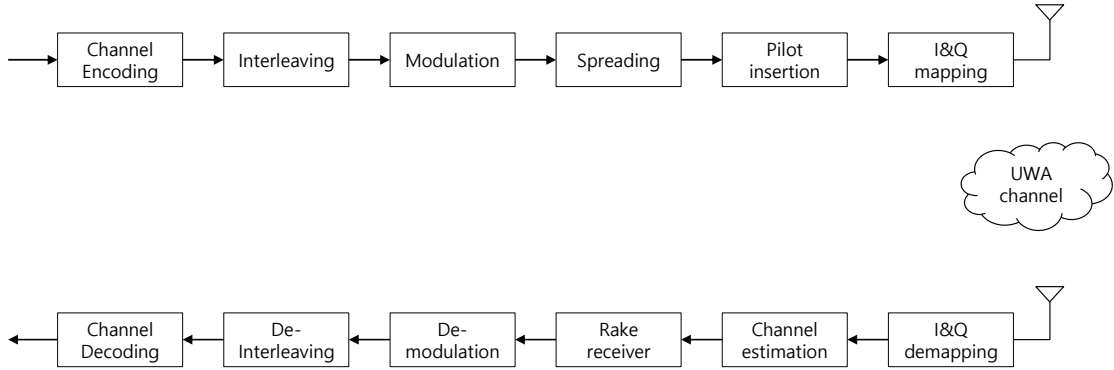
본 장에서는 수중 음향 통신 기법들 중 CDMA와 OFDM 전송기법을 설명하고 각 기법의 장단점을 비교 분석한다.

1. CDMA 전송기법

CDMA 전송 기법의 블록도를 <Fig. 1>에 나타내었다. CDMA 전송 기법은 SF에 따른 확산 부호를 통해 원래의 신호를 대역 확산하여 전송하는 기법으로 매 심볼에 적용되는 확산 부호간에는 직교성이 만족되기 때문에 다중 경로로 인해 발생하는 ISI에 강인한 전송 방식이다. 그리고 하나의 심볼이 확산부호로 인해 확산되어 있으므로 확산부호의 길이인 SF만큼 어레이 이득을 얻을 수 있다. 또한 수신단에서 확산부호간의 직교성을 이용하여 Rake 수신기를 통해 다중 경로를 개별적으로 처리가 가능하여 다중 경로 채널로 인한 신호 왜곡을 줄일 수 있다. 그리고 다중 경로 별로 채널을 보상한 후 역확산하고 각 경로들로부터 나온 결과를 결

함하여 시간 영역에서 다이버시티 이득을 얻을 수 있다.

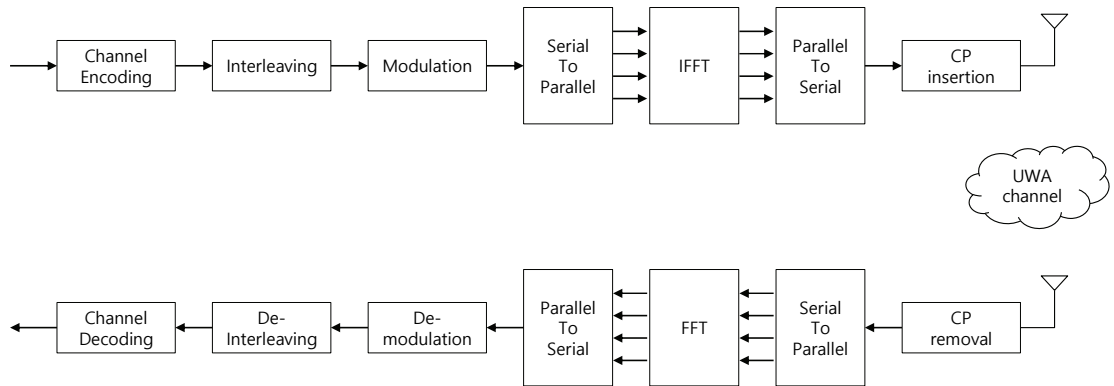
그러나 최대 지연시간이 설계된 파일럿 길이보다 긴 경우에는 모든 다중 경로 채널을 추정하지 못하므로 Rake 수신기가 모든 경로에 대해 시간 영역 다이버시티를 얻지 못하게 된다. 그리고 설계된 파일럿 간격보다 짧은 상관시간을 갖는 채널의 경우 채널 추정 오차가 발생하여 신호 복원 성능이 저하된다.



<Fig. 1> CDMA system block diagram.

2. OFDM 전송기법

OFDM 전송 기법의 블록도를 <Fig. 2>에 나타내었다. OFDM 전송 기법은 전송하고자 하는 데이터를 여러 개의 부반송파에 나누어 전송하는 기법으로 각각의 부반송파에 해당하는 신호가 서로 직교성을 만족하며 각각의 부채널의 대역이 부채널 개수에 반비례하여 좁아진다. 따라서 각 부채널은 평면 페이딩이 되므로 할당된 주파수 대역을 모두 사용하는 CDMA에 비해 주파수 선택적 페이딩에 강인하다. 그리고 각각의 부채널에 동일한 데이터를 반복하여 전송함으로써 주파수 영역에서 다이버시티 이득을 얻을 수 있다. 또한 최대 지연 시간보다 긴 CP를 통해 다중 경로로부터 발생하는 ISI를 줄일 수 있는 장점이 있다. 그리고 OFDM의 신호 변조 특성상 1-tap 영점 강제기(zero-forcing)로 등화기를 간단하게 구현할 수 있으며 FFT(Fast Fourier Transform)와 IFFT(Inverse Fast Fourier Transform)로 변복조가 가능하므로 시스템의 복잡도를 줄일 수 있다.



<Fig. 2> OFDM system block diagram.

OFDM의 신호 복원 성능이 저하되는 경우는 다음과 같다. 최대 지연시간이 CP 길이보다 길어 ISI가 발생한 경우, 상관 주파수 대역이 주파수 영역에서의 파일럿 간격보다 좁아 채널 추정 오차가 발생한 경우 그리고 도플러 효과로 인한 CFO(Carrier Frequency Offset)와 상관 시간이 시간 영역에서의 파일럿 간격보다 짧아 채널 추정 오차가 발생한 경우 등이 있다.

3. CDMA와 OFDM 성능 변화 요인

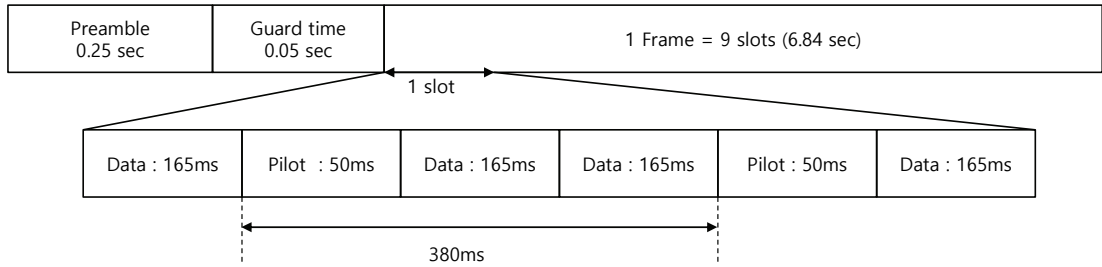
앞 서 설명한 바와 같이 CDMA와 OFDM 전송기법은 수중 음향 채널 환경에 따라 성능이 변화하게 되며 각 기법의 장단점을 <Table 1>에 정리하였다. <Table 1>에서 보듯이 CDMA와 OFDM 두 기법의 성능에 영향을 주는 요인이 다양하여 특정 환경에서의 성능 우위를 결정하는 것이 어렵다. 따라서 본 논문에서는 다양한 수중 음향 채널에 대하여 CDMA와 OFDM의 성능을 전산 모의실험을 통해 분석한다. 이로부터 수중 음향 채널 환경에 따라 어떤 통신 기법을 선택해야하는지를 결정하는 변수를 도출한다.

<Table 1> Pros and Cons of CDMA and OFDM

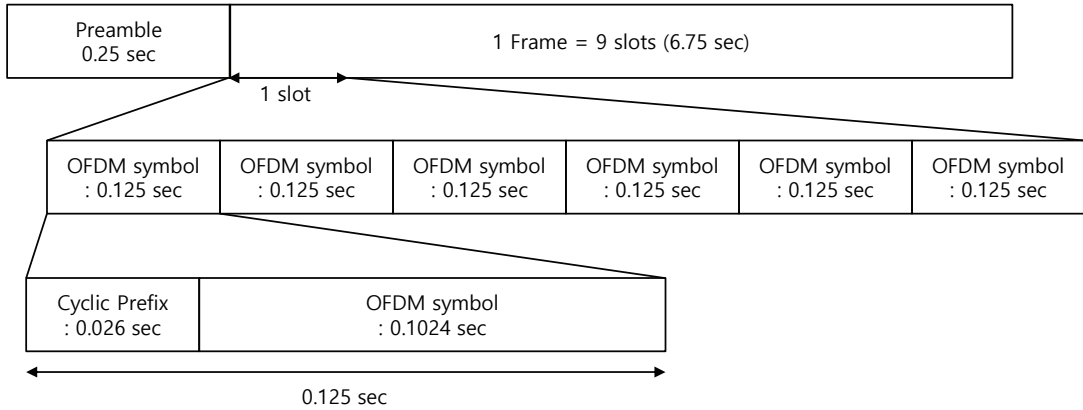
Factor	CDMA		OFDM	
	Pros	Cons	Pros	Cons
Multipath channel	Time diversity gain	Frequency selective fading	Flat fading for each subchannel	Channel estimation error
			Frequency diversity gain	ISI
Doppler frequency	-	Time selective fading	-	CFO
		Channel estimation error		Channel estimation error

III. 전산 모의실험

본 장에서는 다양한 수중 음향 채널 환경에서 CDMA와 OFDM의 성능 분석을 통해 특정 수중 음향 채널 환경에서 어떤 전송 기법을 사용해야하는지를 결정하는 변수를 도출하는 전산 모의실험을 수행한다. CDMA와 OFDM은 서로 동일한 전송률을 갖는 프레임 구조로 설계하였으며 <Fig. 3>과 <Fig. 4>에 각각 나타내었다. 동등한 비교를 위해 CDMA와 OFDM 모두 1-tap 영점 강제기를 사용하였다. CDMA는 시간영역에서 파일럿 간격이 380 msec로 도플러 주파수가 약 1Hz인 경우에 대하여 설계하였으며 MCS(Modulation Coding Scheme)를 <Table 2>에 나타내었다. OFDM은 CP 길이가 26 msec이며 부반송파간의 간격은 약 9.7Hz이며 MCS를 <Table 3>에 나타내었다. 주파수 영역에서의 파일럿 간격은 부반송파 2개와 6개로 각각 약 19.5Hz, 58.6Hz 간격이다. 그리고 시간 영역에서의 파일럿은 1개 또는 3개의 OFDM 심볼마다 존재하며 파일럿의 시간 간격은 0 sec, 0.25 sec이다. 이러한 파일럿 간격을 (주파수 영역, 시간 영역)으로 나타내었으며 각각 (2, 1) 그리고 (6, 3)이라 표기한다. 그리고 다이버시티 이득을 위해 파일럿 간격이 (2, 1)인 경우에는 2번, 파일럿 간격이 (6, 3)인 경우에는 4번 주파수 영역에서 반복 전송한다. CDMA는 IQ 부호를 사용하므로 CDMA의 QPSK는 OFDM의 BPSK와 동일한 성능을 갖기 때문에 OFDM의 변조 방식을 BPSK로 한다.



<Fig. 3> CDMA frame structure



<Fig. 4> OFDM frame structure

<Table 2> CDMA modulation coding scheme

Parameter	Value
Spreading factor	8
Modulation	QPSK
Coding rate	1/3

<Table 3> OFDM modulation coding scheme

Parameter	Value
Modulation	BPSK
Coding rate	1/3
Pilot space (frequency, time)	(2, 1), (6, 3)
Repetition (in frequency)	2, 4

전산 모의실험에 사용된 수중 음향 채널 환경의 변수는 다중 경로의 수, r.m.s 지연시간 그리고 도플러 주파수이며 해당 수치를 <Table 4>에 나타내었다. 앞 장에서 설명한 바와 같이 CDMA는 Rake 수신기를 통해 다중 경로에 따른 시간 영역 다이버시티 이득을 얻는다. 따라서 다중 경로의 수가 2, 3으로 증가시켜가며 그 영향을 분석한다. 그리고 주파수 선택적 페이딩의 영향을 분석하기 위해 r.m.s. 지연시간을 3, 10 msec에 대해 실험을 수행한다. r.m.s. 지연시간이 3 msec일 때 상관 대역폭은 약 67Hz이다. OFDM에서 파일럿 간격이 (2, 1) 그리고 (6, 3)인 경우 파일럿 간의 주파수 간격이 약 19.5Hz와 58.6Hz이므로 상관 대역폭 내에 들어오므로 주파수 선택적 페이딩에 의한 영향이 작을 것이다. 그러나 r.m.s. 지연시간이 10 msec인 경우는 상관 대역폭이 약 20Hz이므로 파일럿 간격이 (6, 3)인 경우에는 상관 대역폭 내에 들어오지 못하게 된다. 또한 r.m.s. 지연시간이 10 msec이고 다중 경로의 수가 3개인 경우에는 최대 지연시간이 30.2 msec로 CP 길이인 26 msec 보다 긴 다중 경로를 갖게 되어 OFDM은 ISI가 발생하게 된다. 따라서 r.m.s. 지연시간이 3, 10 msec인 경우에

대해 실험을 수행함으로써 주파수 선택적 페이딩과 ISI에 대한 영향을 분석한다. 마지막으로 도플러 효과로 인한 시간영역 선택적 페이딩의 영향을 분석하기 위해 도플러 주파수를 증가시키며 성능 열화량을 분석한다. CDMA는 도플러 효과에 민감하기 때문에 설계치인 1Hz를 기준으로 점차 늘려가며 실험을 수행한다. 도플러가 주파수가 1Hz인 경우에는 CDMA의 파일럿 간격이 상관시간 내에 존재하므로 채널 추정 오차가 작아 신호 복원 성능이 우수할 것이다. 도플러가 1.25Hz, 1.5Hz인 경우는 상관시간이 짧아져 채널 추정 오차가 발생해 신호 복원 성능이 저하될 것이다. 이로부터 도플러 주파수 증가에 따른 CDMA의 신호 복원 성능 열화량을 측정하고 분석한다.

<Table 4> Underwater acoustic channel parameters

Parameter	Value
Number of paths	2, 3
Doppler frequency	1Hz, 1.25Hz, 1.5Hz
r.m.s delay	3msec, 10msec
SNR	-8dB ~ 8dB

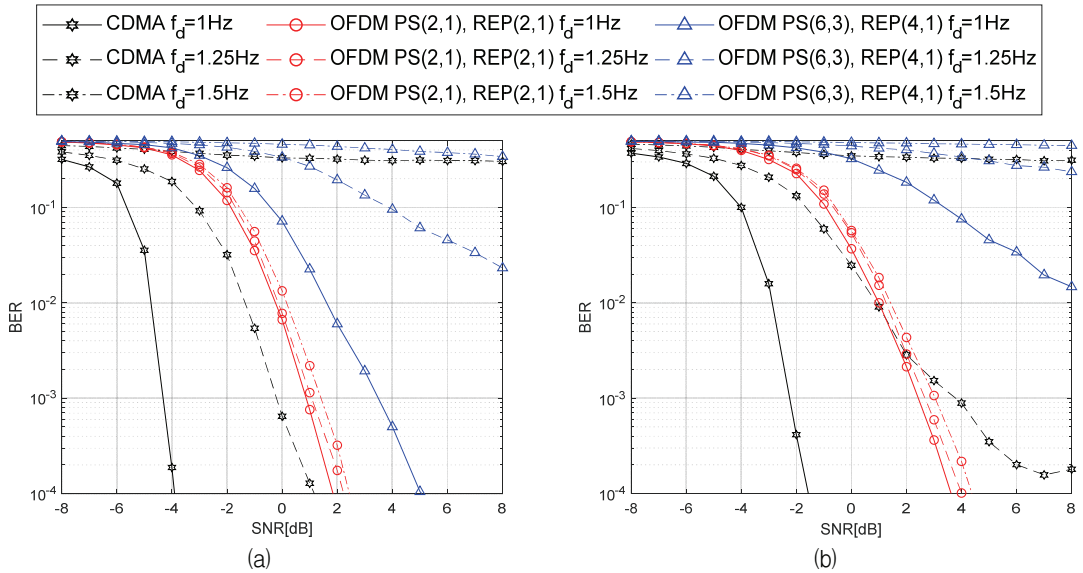
<Fig. 5>는 다중 경로의 수가 2개이고 r.m.s. 지연시간이 각각 3msec 그리고 10msec 일 때 도플러 주파수를 1Hz, 1.25Hz 그리고 1.5Hz로 변화시켜가며 CDMA와 OFDM의 BER 성능을 나타낸 결과이다. 범례는 다음과 같다. 검은색 헥사그램은 CDMA, 빨간색 원형은 파일럿 간격이 (2, 1)이고 주파수 영역에서 2번 반복 전송 기법을 사용한 OFDM이다. 그리고 파란색 삼각형은 파일럿 간격이 (6, 3)이고 주파수 영역에서 4번 반복 전송 기법을 사용한 OFDM이다. 그리고 실선, 파선 그리고 일점쇄선은 각각 도플러 주파수가 1Hz, 1.25Hz 그리고 1.5Hz인 경우를 나타낸다.

<Fig. 5.(a)>는 r.m.s. 지연시간이 3 msec인 경우에 대한 BER 성능이다. 도플러가 1Hz인 경우에는 상관시간이 CDMA의 파일럿 간격보다 길기 때문에 채널 추정 오차가 발생하지 않아 SF만큼의 어레이 이득과 Rake 수신기의 시간 영역 다이버시티 이득을 얻어 OFDM보다 우수한 성능을 갖는 것을 알 수 있다. 그러나 도플러가 증가할수록 채널 추정 오차가 발생하여 신호 복원 성능이 저하되어 OFDM의 성능이 우세함을 알 수 있다. OFDM의 경우에는 파일럿 간격이 좁을수록 채널 추정 오차가 적기 때문에 다이버시티 이득이 4인 경우보다 2인경우의 신호 복원 성능이 우수하다. 또한 파일럿 간격이 큰 (6, 3)의 경우에는 채널 추정 오차가 발생하여 도플러가 커질수록 CFO 및 채널 보상이 적절히 수행되지 않으며 설계치보다 좁은 상관 대역폭으로 인해 주파수 선택적 페이딩을 극복하지 못하기 때문에 성능이 저하되는 것을 알 수 있다.

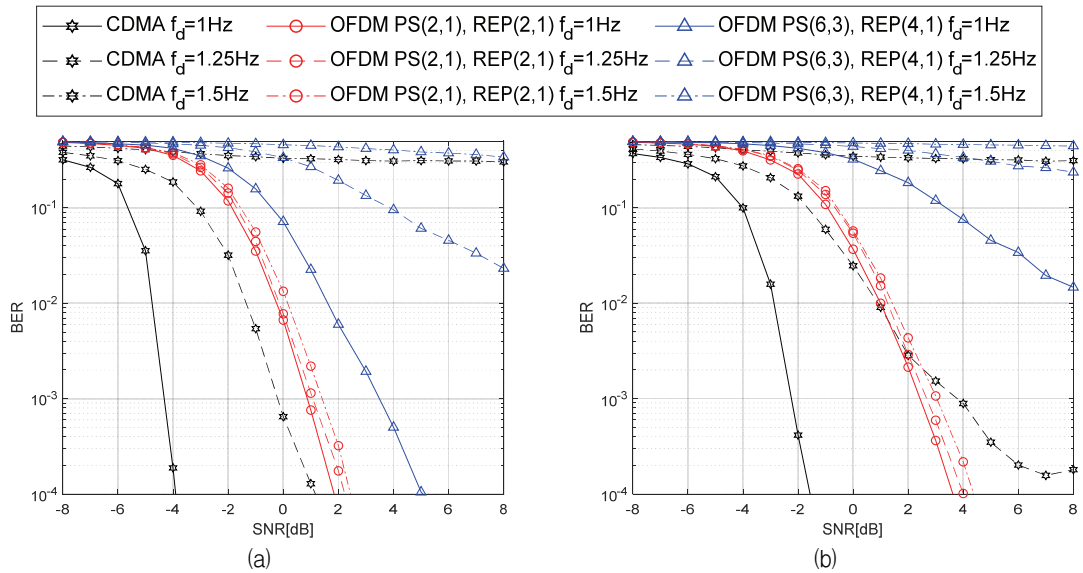
<Fig. 5.(b)>는 r.m.s. 지연시간이 10msec 일 때 CDMA와 OFDM의 BER 성능을 나타낸 것이다. 해당 채널 환경에서의 최대 지연시간은 15.6 msec로 CDMA의 파일럿이 추정할 수 있는 채널 길이의 한계를 넘게 된다. 따라서 두 번째 다중 경로를 파일럿으로부터 추정이 불가능하여 Rake 수신기의 시간 영역 다이버시티 이득을 얻지 못한다. 그러므로 그림 5.(a)에 비해 신호 복원 성능이 저하됨을 알 수 있다. 그럼에도 불구하고 도플러가 CDMA 프레임 설계치 보다 작은 경우에는 OFDM에 비해 성능이 우수함을 알 수 있다. OFDM의 경우도 CDMA와 마찬가지로 지연시간이 길어짐에 따라 채널 추정 오차량이 증가하여 신호 복원 성능이 저하되는 것을 알 수 있다.

<Fig. 6>은 <Fig. 5>와 동일한 상황에 대하여 다중 경로의 수가 3개일 때에 대한 BER 결과이다. 범례는 <Fig. 5>와 동일하다. 앞 선 실험 결과들과 동일하게 r.m.s. 지연시간이 길어질수록 상관 대역폭이 좁아지므로 주파수 영역에서의 채널 추정 오차로 인해 OFDM의 성능이 점차 저하되는 것을 알 수 있다. 그리고 도플러

주파수가 증가할수록 시간 영역에서 채널 추정 오차량이 증가하여 CDMA의 신호 복원 성능이 점차 저하되는 것을 알 수 있다.



<Fig. 5> BER performance for 2-tap multipath channel. (a) r.m.s. delay = 3msec. (b) r.m.s. delay = 10msec.



<Fig. 6> BER performance for 3-tap multipath channel. (a) r.m.s. delay = 3msec. (b) r.m.s. delay = 10msec.

<Fig. 6(a)>는 r.m.s. 지연시간이 3msec인 경우에 대한 BER 결과이다. CDMA와 OFDM 두 기법 모두 신호 복원 성능이 <Fig. 5(a)>에 나타난 것과 유사함을 알 수 있다. <Fig. 5(a)>의 채널 환경과 <Fig. 6(a)>의 채널 환경은 다중 경로가 각각 2개, 3개인 경우이다. CDMA는 확산 부호로부터 ISI를 줄일 수 있고 OFDM은 CP로부터 ISI를 줄일 수 있다. 따라서 다중 경로의 수는 CDMA와 OFDM의 신호 복원 성능에 중요한 변수는 아님을

알 수 있다.

<Fig. 6(b)>는 r.m.s. 지연시간이 10msec인 경우에 대한 BER 결과이다. 이 경우에는 최대 지연시간이 30.2msec로 CP길이보다 길기 때문에 OFDM에서는 ISI가 발생한다. 따라서 <Fig. 6(b)>에 비해 OFDM의 신호 복원 성능이 저하된다. 그러나 CDMA의 경우에는 지연시간이 길어짐에 따른 신호 복원 열화량은 OFDM에 비해 작은 것을 알 수 있다.

다양한 수중 음향 채널 환경에서 CDMA와 OFDM의 전산 모의실험을 수행하였다. 설계치 내의 r.m.s. 지연 시간과 도플러 주파수인 경우에는 CDMA의 SF로 인해 얻는 어레이 이득과 Rake 수신기로부터 얻는 시간 영역 다이버시티 이득이 OFDM의 주파수 영역 혹은 시간 영역의 다이버시티 이득보다 큰 것을 확인하였고 도플러 주파수가 설계치의 25%이내인 경우에는 CDMA의 채널 추정 오차량이 크지 않아 OFDM과 성능이 유사해지는 것을 보였다.

IV. 결 론

본 논문은 수중 음향 채널 환경에 따른 CDMA와 OFDM 전송기법의 장단점을 분석하였다. 분석한 결과를 바탕으로 다양한 수중 음향 채널에 대하여 적절한 통신 기법을 선택하기 위해 r.m.s. 지연시간, 도플러 효과 그리고 다중 경로의 수를 변화시켜가며 CDMA와 OFDM의 BER 성능을 분석하였다. OFDM과 CDMA의 성능을 결정짓는 가장 중요한 변수가 r.m.s. 지연시간과 도플러 주파수임을 보였다. 그리고 r.m.s. 지연시간과 도플러 주파수가 각 전송기법의 설계치 내의 수치일 경우 CDMA가 OFDM보다 성능 우수한 것을 보였다.

ACKNOWLEDGEMENTS

본 논문은 2018년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(분산형 수중관측 제어망 개발).

REFERENCES

- Catipovic J. A.(1990), "Performance Limitations in Underwater Acoustic Telemetry," *IEEE J. Ocean. Eng.*, vol 15, no. 3, pp. 205-216.
- Fazel K.(1993), "Performance of CDMA/OFDM for mobile communication system," in *Proc. IEEE Int. Conf. Universal Pers. Comm.*, vol. 2, pp.975-P979.
- Han J. W. et al.(2010), "Performance Analysis of Acoustic Communication using OFDM Modulation in Underwater," *J. Navigation and Port Research*, vol. 34, no. 10, pp.769-774.
- Kilfoyle D. et al.(2000), "The State of the Art in Underwater Acoustic Telemetry," *IEEE J. of Ocean Eng.*, vol. 25, pp.4-27.
- Lee H. J. et al.(2017), "Performance Analysis of UWA Communication System by Diversity in UWA Channel," *JCCT*, vol. 3, no. 4, pp.191-198.