
수중 통신 환경을 위한 MIMO-OFDM 시스템 설계

한동걸* · 회 빙** · 장경희*** · 변성훈**** · 김시문***** · 임용곤*****

Design Philosophy of MIMO OFDM system for Underwater Communication

DongKeol Han* · Bing Hui** · KyungHi Chang*** · Sung-Hun Byun**** · Sea-Moon Kim**** · Yong-Kon Lim*****

이 논문은 국토해양부 국가연구개발사업 연구비 지원에 의하여 수행되었음

요 약

본 논문에서는 수중 통신 환경에서의 Orthogonal Frequency Division Multiplexing (OFDM) 시스템과 지상에서의 일반적인 OFDM 시스템과의 차이점을 분석하고, 실제 측정된 채널 데이터를 사용한 수중 채널 모델을 기반으로 OFDM 파라미터들을 설정하였다. 또한, 선형 보간법을 이용한 least square (LS) 채널 추정기법을 이용하여 채널의 상태 정보를 획득하였다. Alamouti code를 이용한 space-time block code (STBC) 및 space-frequency block code (SFBC)를 적용하여 그 성능을 평가 및 분석 하였으며, 동시에 1x2 maximum ratio combining (MRC)을 적용하여 성능을 비교 분석 한 결과, SFBC의 경우 수중 채널의 심각한 주파수 선택적 특성으로 인하여 유효한 BER 특성을 보이지 못하였으나, STBC의 경우 4-column 파일럿 구조를 적용하였을 때, SISO 시스템과 비교하여 약 7dB 정도의 향상된 성능을 나타내고 있음을 확인하였다.

ABSTRACT

In this paper, we first analyze the differences of underwater acoustic (UWA) orthogonal frequency division multiplexing (OFDM) systems and conventional terrestrial OFDM system, and give a simple introduction of the backgrounds. By considering the real UWA channel environments, the measured channel data is used to generate the UWA channel model and calculate the relative parameters for underwater OFDM systems. Practical least square (LS) based channel estimation with linear interpolation are adopted to obtain the channel state information (CSI) at receiver side. As multi-input multi-output (MIMO) processing techniques, Alamouti code is implemented and evaluated to perform for space time block coding (STBC) and space frequency block coding (SFBC) for UWA OFDM systems with the MIMO configuration of 2x1, at the same time, 1x2 maximum ratio combining (MRC) is performed for the purpose of comparison. The simulation results show that, with perfect channel estimation, SFBC failed to work duo to the serious frequency selectivity of UWA channel environments. When the practical channel estimation is applied, in the case of STBC, the proposed 4-column pilot pattern gives better performance about 7dB than SISO system.

키워드

수중 통신, OFDM, MIMO, 채널 추정

Key word

Underwater communication, OFDM, MIMO, Channel estimation

* 준회원 : 인하대학교
** 정회원 : 인하대학교
*** 정회원 : 인하대학교 (khchang@inha.ac.kr)
**** 정회원 : 한국해양연구원
***** 종신회원 : 한국해양연구원

접수일자 : 2010. 08. 06
심사완료일자 : 2010. 08. 17

I. 서 론

해양 개발에 대한 관심이 점차 증가하면서 수중 무선 통신 분야는 해양 개발의 필요성과 더불어 그 응용분야의 중요성과 광범위함으로 인하여 중요한 산업 및 연구 분야로 성장해왔다. 수중 무선 통신은 해양 정보 수집, 오염 및 환경 감시, 연안 탐사, 기후 관측, 재해 예방 등 다양한 민간 부문에서의 활용뿐만 아니라, 표적의 분산탐지 및 추적, 어뢰 탐지 등 군사적 목적의 활용을 포함하는 다양한 응용분야에 활용될 수 있다 [1].

그러나 수중 채널 환경은 지상의 공기와는 다른 수중이라는 환경 및 매질의 차이로 인하여 계절 및 수심의 변화 등 주변 환경적 변화에 크게 영향을 받으며, 더불어 해수면과 바닥면, 수중 부유물 및 파도 등에 의한 반사와 산란으로 인한 다중경로 페이딩 현상이 심각하다. 또한 전달 손실, 도플러 확산, 잡음 등의 영향도 크게 받기 때문에 이러한 매우 열악한 환경으로 인하여 발생하는 문제들을 고려해야 한다 [2].

수중 채널 환경에서 다중경로로 인한 지연 확산은 심볼 간 간섭의 원인이 되어 송신된 심볼들을 왜곡시켜 수중 통신의 심각한 장애 원인이 된다. 따라서 이러한 다중경로로 인한 지연 확산에 우수한 성능을 나타냄과 더불어 높은 데이터 전송률을 지원하는 OFDM과 같은 다중 반송파 변조방식에 대한 관심이 크게 증가하고 있다. OFDM 방식은 고속의 송신 신호를 다수의 직교하는 저속의 부반송파들로 나누어 전송하는 기술로서, 주파수 효율성이 높아지게 되며, guard interval 사용과 더불어 주파수 선택적 채널을 비선택적 부채널로 변환시켜 지연 확산에 의한 심볼 간 간섭 문제를 해결할 수 있다.

한편, 수중 통신은 대역이 제한되어 있고, 음파가 해저 및 해수면 등으로부터 반사 및 산란이 심하기 때문에 신뢰성이 높고, 전송 속도가 빠른 통신 시스템의 구현이 어렵다. 이러한 열악한 수중 채널 환경에서 높은 신뢰성과 고속의 통신을 실현하기 위한 방법으로, 각 송·수신단에 존재하는 다수의 안테나에 의해 시간 및 공간, 주파수 차원으로 부가정보를 보내는 다이버시티 기법과 수신 combining 기술을 이용할 수 있다. 수중 통신 시스템에 Multi-Input Multi-Output (MIMO) 기술을 적용함으로써 매우 열악하고 제한적인 주파수 대역폭을 가진 수중

채널 환경 하에서, 주파수 효율을 증가시키고 강건한 수중 통신 시스템을 구성할 수 있기 때문에 MIMO 기술의 적용은 필수적이다.

이에 따라 본 논문에서는 일반적인 OFDM 시스템과 수중 통신 환경에 적합한 OFDM 시스템의 차이점에 대해 분석하고, 수중 통신 시스템에 MIMO-OFDM 기술을 적용할 때 나타날 수 있는 문제점들에 대해 논의한다. 또한, 수중 통신 시스템에 전송 다이버시티 기법과 MRC 기법을 적용하였을 경우의 MIMO-OFDM 시스템 성능을 평가 및 분석한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 일반적인 OFDM 방식과 비교하여 수중 통신 시스템에서의 OFDM 방식의 차이점에 대하여 분석하고, 전송 다이버시티 기술과 수신 combining 과 같은 MIMO 기술에 대해 소개한다. III장에서는 MIMO-OFDM 시스템을 설계하기 위한 파일럿 구조제안 및 OFDM 파라미터등을 설정하고, IV장에서 MIMO-OFDM 시스템에 대한 성능 분석 및 평가를 한 후, V장에서 결론을 맺는다.

II. 수중 통신 환경을 위한 MIMO-OFDM 시스템

2-1 수중 SISO-OFDM 시스템

수중 통신은 매우 열악한 채널 환경을 갖고 있기 때문에, 일반적인 협대역 OFDM 시스템을 수중 통신 시스템에 그대로 적용하기 어렵다. 따라서 수중 통신 환경에서는 부반송파 간 간격이 넓은 광대역 OFDM 시스템을 적용하는 것이 효과적이며, 이러한 광대역 OFDM 시스템을 사용함으로써 주파수 offset 에러에 효과적으로 대처할 수 있게 된다.

일반적인 OFDM 시스템은 부반송파 간 직교성을 유지하기 위해 guard interval로 cyclic prefix를 사용하고 있다. 그러나 수중 채널의 경우 긴 지연 확산으로 인하여 prefix의 길이가 길어져 전송 효율이 크게 감소하게 되므로, 수중 OFDM 시스템의 경우 주파수 및 에너지 효율을 높이기 위하여 cyclic prefix 대신 zero prefix를 사용한다 [3].

또한, 수중 음향 채널에서의 심각한 도플러 확산으로 인하여 OFDM 시스템과 같은 다중 반송파 기법을 사용

표 1. 수중 SISO-OFDM 시스템들의 파라미터 및 성능 비교
Table 1. Comparison of underwater SISO-OFDM system parameters and performance

Reference	Carrier Frequency (kHz)	Bandwidth (kHz)	Modulation	FFT Size	Channel Coding	Date Rate (kbps)	Uncoded BER 10-2 (dB)	Coded BER 10-2 (dB)	참조사항
Freitag [5]	25	10	MFSK	256	CC	5	-	14	채널 추정을 위한 Echo canceling algorithm 제안
Yeo [6]	25	10	QPSK	-	-	4	20	-	RSIC 사용 : 다중 사용자 간섭 고려
Xu [7]	20	20	QPSK	8192	CC	14.4	18	12	동기화 기법 : LFM 채널 추정 기법 : LS
Lan [8]	10	4	QPSK	1024	IRA	3.9	20.5	2.5	60 kHz의 샘플링 주파수 사용
Huang [9]	-	10	QPSK	1024	LDPC	7.9	-	2	다중경로 Rayleigh fading channel

할 경우, 일정하지 않은 도플러 천이 특성으로 인하여 가장 낮은 주파수의 부반송파와 가장 높은 주파수의 부반송파가 현저하게 다른 도플러 천이를 겪게 되는 문제가 발생하게 된다[4].

따라서 수중 통신 시스템에 OFDM 기법을 적용하기 위해서는 이러한 현상을 극복하기 위한 우수한 채널 추정 및 보상 방법의 적용이 필수적이다 [5]. [6]에서는 천해의 수중 통신 환경에서 다중 사용자 간섭 및 심볼 간 간섭을 제거할 수 있는 효율적인 방법으로 recursive-successive interference cancellation (RSIC) 기법의 사용을 제안하였으며, [7]에서는 LS 채널 추정 기법을 사용하고 있는 수중 OFDM 시스템에서 다양한 변조 기법에 대해 convolution code와 turbo code의 성능을 비교하였

다. 한편, [8]에서는 또 다른 채널 코딩 방법으로 irregular repeat accumulate (IRA)의 적용을 제안하였고, uncoded 경우와 비교하여 약 18 dB 정도 성능이 향상됨을 보였으며, [9]에서는 수중 OFDM 시스템에서 BER 성능의 향상과 더불어 peak to average power ratio (PAPR)도 감소시키는 방법으로 non-binary low density parity check (LDPC) code의 사용을 제안하였다. 위 참고문헌들에 대한 주요 파라미터 및 성능을 표 1에 정리 하였다.

2-2 수중 MIMO-OFDM 시스템

매우 열악하고 제한적인 주파수 대역폭을 가진 수중 채널 환경에서, 주파수 효율을 증가시키고 강건한 수중

표 2. 수중 MIMO-OFDM 시스템들의 파라미터 및 성능 비교
Table 2. Comparison of underwater MIMO-OFDM system parameters and performance

Reference	Carrier Frequency (kHz)	Bandwidth (kHz)	Modulation	FFT Size	Channel Coding	Date Rate (kbps)	Coded BER 10-2 (dB)	참조사항
Roy [10]	28.5	23	BPSK	-	Turbo code	16	12	SPRE 등화 기법 제안 및 STTC/LSTC 사용
Grythe [11]	38	3	QPSK	128	CC	4	7	Wiener filter 및 STC 사용
Stojanovic [12]	11.2	2.4	QPSK	128	-	7.2	-	LS 기반 적응적 채널 추정 기법 및 MRC 사용

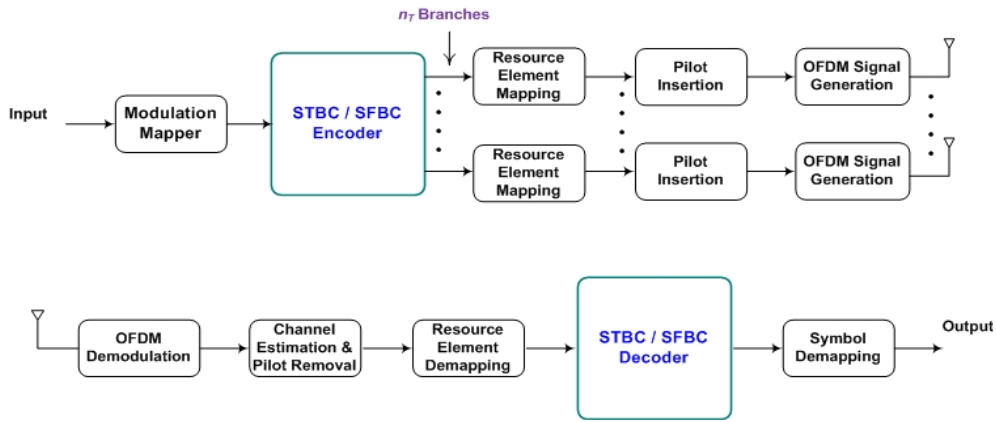


그림 1. 전송 다이버시티 기법을 적용한 수중 OFDM 시스템의 블록 다이어그램
 Figure 1. Block diagram of underwater OFDM system employing transmit diversity scheme

통신 시스템을 구성하기 위하여 MIMO 기술의 적용은 필수적이다. 이를 위해 space-frequency coding (SFC), space-time coding (STC) 와 같은 전송 다이버시티 기술들과 수신 combining 기술, 공간 다중화 기술 등 수중 통신을 위한 여러 MIMO 기술들이 연구되고 있으며, 더불어 열악한 채널 환경을 보상하기 위한 다양한 채널 보상 기술들에 대한 연구와 그에 대한 성능 평가가 활발히 이루어지고 있다. [10]에서는 2단계의 등화 과정을 수행하는 적응적인 sparse partial response equalization (SPRE) 를 제안함과 더불어 space-time trellis coding (STTC) 및 layered space-time coding (LSTC)와 같은 전송 다이버시티 기술을 적용하였고, [11]에서는 채널 추정 방법으로 상대적으로 낮은 복잡도를 가지면서 좋은 성능을 나타내는 Wiener interpolator sense를 사용하며, STC를 사

용하는 MIMO 시스템의 경우, SISO 시스템의 경우에 비하여 채널 추정 오차가 감소함을 보였다. 한편, [12]에서는 수중 MIMO-OFDM 시스템을 위한 LS 채널 추정 기법을 바탕으로 하는 적응적인 채널 추정 방법을 제안하고 있다. 표 2에 위 연구 결과들의 파라미터 및 성능을 정리하였다.

그림 1은 space-time/frequency block coding 기법을 적용한 수중 OFDM 시스템의 블록 다이어그램이고, 그림 2는 MRC 기법을 적용한 수중 OFDM 시스템의 블록 다이어그램이다. 본 논문에서는 수중 통신 시스템에 Alamouti code를 이용한 STC 및 SFC와 같은 전송 다이버시티 기술을 적용하였을 경우와 수신 combining 기술로 MRC 기법을 적용하였을 경우의 성능을 비교 분석한다.

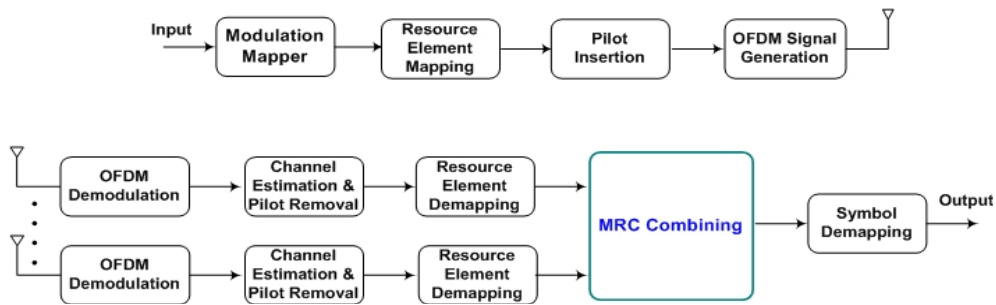


그림 2. MRC combining 기법을 적용한 수중 OFDM 시스템의 블록 다이어그램
 Figure 2. Block diagram of underwater OFDM system employing MRC combining scheme

Ⅲ. 수중 통신 환경을 위한 MIMO-OFDM 시스템 설계

3-1 수중 채널 모델

수중 채널 환경은 지상 무선 채널 환경과 비교하여 매우 열악하기 때문에, 일반적인 지상 무선통신 시스템의 채널 모델은 수중 통신 채널 모델로서 사용하기에 적합하지 않다. 따라서, 본 논문에서의 수중채널 모델은 천해역에서 측정된 데이터를 이용하였으며, 수중 채널 모델의 각 경로는 Rayleigh 페이딩을 적용하였다. 그림 3은 수심 20m에서, 25kHz의 반송 주파수를 사용한 경우의 기저대역 채널 응답으로써, 6개의 정점들이 주요 채널 응답으로 나타나고 있음을 확인할 수 있으며, 이러한 채널의 지연 특성을 표 3에 정리하였다.

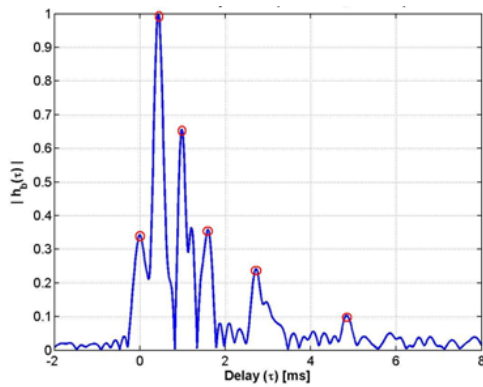


그림 3. 측정된 기저대역 수중 채널 응답
Figure 3. Measured baseband underwater acoustic channel response

표 3. 채널 지연 특성
Table 3. Channel Delay Profile

Tap	Relative Delay (μs)	Average Power (dB)
1	0	-9.3
2	400	0.0
3	1000	-3.6
4	1600	-8.9
5	2700	-12.3
6	4800	-19.7

3-2 OFDM 파라미터

그림 3과 표 3의 수치들을 기반으로 필요한 OFDM 파라미터들을 계산하였으며, 계산 과정은 다음과 같다 [13].

표 3의 결과를 보면, 측정된 채널의 임펄스 응답이 [0, 0.4, 1, 1.6, 2.7, 4.8] ms의 지연을 갖는 시점에 나타나고 있음을 알 수 있다. 따라서 최대 지연 τ_{max} 는 4.8ms이며, RMS 지연 τ_{rms} 는 식 (1)에 따라 다음과 같이 계산된다.

$$\tau_{rms} = \sqrt{\frac{x_1^2 + x_2^2 + \dots + x_n^2}{n}} = 238.28\mu s \approx 2.38ms \quad (1)$$

τ_{max} 및 τ_{rms} 를 이용하여 guard interval T_G 는 식 (2)와 같이 계산할 수 있다.

$$\begin{aligned} T_G &> \tau_{max} = 4.8ms \\ T_G &= 2 \cdot \tau_{rms} \sim 4 \cdot \tau_{rms} \\ &= 2 \cdot (2.38ms) \sim 4 \cdot (2.38ms) \\ &= 5.76ms \sim 9.52ms \\ T_G &= 6ms \end{aligned} \quad (2)$$

일반적으로 guard interval은 τ_{max} 이상, τ_{rms} 의 2배에서 4배 정도로 설정하는데, 수중 통신 시스템의 경우 일반적으로 고차 변조 기법을 사용하지 않으며, guard interval로 인한 전력 손실을 최소화하기 위하여, 본 논문에서는 6ms로 설정하였다.

최소 유효 심볼 구간 $T_{d,min}$ 의 길이는 식 (3)에 따라 계산하며, 보호구간에 의해 발생하는 SNR 손실 L이 1dB 이하가 되도록 설정하였다.

$$T_{d,min} \geq \frac{T_G}{\left(10^{\frac{L}{10}} - 1\right)} = 3.862T_G = 23.17ms \quad (3)$$

FFT 사이즈 NFFT의 경우, 식 (3)에 따라 구한 $T_{d,min}$ 를 이용하여 식 (4)와 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} N_{FFT} &\geq T_{d,min} \times BW \\ &= 23.17ms \times 10kHz \approx 231 \\ N_{FFT} &= 256 \end{aligned} \quad (4)$$

표 4. OFDM 시스템 파라미터
Table. 4 OFDM System Parameters

Parameter	Value	
Water Depth	20 m	
Carrier Frequency	25 kHz	
Bandwidth	10 kHz	
RMS Delay	2.38 ms	
Guard Interval	6 ms	
Symbol Duration	32 ms	
FFT Size	256	
No. of Data Subcarrier	224	
Subcarrier Bandwidth	39	
Modulation Type	QPSK (Uncoded)	16QAM (Uncoded)
Data Rate	14 kbps	28 kbps

231이상의 2의 제곱수들 중 복잡도를 최소화하기 위하여 FFT의 수를 256으로 설정하였다.

한편, 유효 심볼 구간 T_d 및 전체 심볼 길이 T_s 는 아래와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} T_d &= N_s / BW = 256 / 10kHz = 26ms \\ T_s &= T_d + T_G = 32ms \end{aligned} \quad (5)$$

이에 따라 부반송파 간격은 식 (6)과 같이 계산된다.

$$f_{sc} = \frac{1}{(T_s - T_G)} = \frac{1}{(32 - 6)} \approx 39Hz \quad (6)$$

위와 같이 계산된 파라미터들을 바탕으로 데이터율을 계산하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} QPSK &: 2_{\text{bit/symbol}} \times N_{\text{data-sc}} / T_s \\ &= 2 \times 224 \times 1 / 32ms = 14kbps \\ 16QAM &: 4_{\text{bit/symbol}} \times N_{\text{data-sc}} / T_s \\ &= 2 \times 224 \times 1 / 32ms = 14kbps \end{aligned} \quad (7)$$

위와 같이 계산된 OFDM 시스템 파라미터들을 표 4에 정리하였다.

표 5. Ultra-wide band 시스템의 정의
Table 5. Definition of Ultra-wide band system

Frequency Band	Bandwidth / Center Frequency
Narrowband	≤ 0.01
Wideband	$0.01 \leq BW/CF \leq 0.25$
Ultra-wide band	≥ 0.25 또는 Bandwidth $\geq 500MHz$

한편, 일반적으로 통신 시스템은 중심 주파수 대비 얼마나 많은 대역폭을 사용하는가에 따라 협대역 시스템, 광대역 시스템, 초광대역 시스템으로 분류할 수 있으며, 이에 대한 정의를 표 5에 나타내었다. 본 논문의 경우 중심 주파수 25kHz, 대역폭 10kHz를 사용함으로써 중심 주파수 대비 시스템 대역폭이 0.4로 초광대역 시스템으로 정의할 수 있다.

3-3 채널 추정 기법

LS 채널 추정 기법은 파일럿의 추정된 채널 상태정보를 바탕으로, 선형 보간법을 이용하여 나머지 다른 위치의 채널 상태 정보를 추정하는 기법으로, 간단하며 연산 복잡도가 낮은 장점이 있다. 선형 보간법에는 copy, average, interpolation, extrapolation 방법 등이 있다 [14].

수신된 파일럿 신호를 $Y_p(k)$, 원래의 파일럿 신호를 $X_p(k)$ 라 하면, 파일럿 위치에서의 채널값 $\hat{H}_p(k)$ 는 다음과 같이 추정할 수 있다.

$$\hat{H}_p(k) = \frac{Y_p(k)}{X_p(k)} \quad (8)$$

식 (8)에서 추정된 파일럿 위치에서의 채널값을 바탕으로 선형 보간법을 이용하여 전체 채널값을 다음과 같이 추정한다.

$$\begin{aligned} \hat{H}(k) &= \hat{H}[mL+l] \\ &= \hat{H}_p(m) + \frac{l}{L} (\hat{H}_p(m+1) - \hat{H}_p(m)), \quad l=0,1,\dots,L-1 \end{aligned} \quad (9)$$

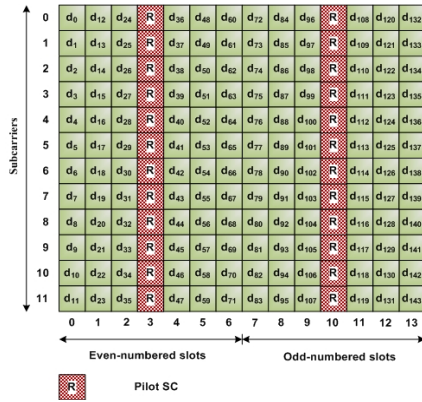


그림 4. 3GPP LTE 상향링크 파일럿 구조
Fig. 4. Pilot pattern for 3GPP LTE uplink

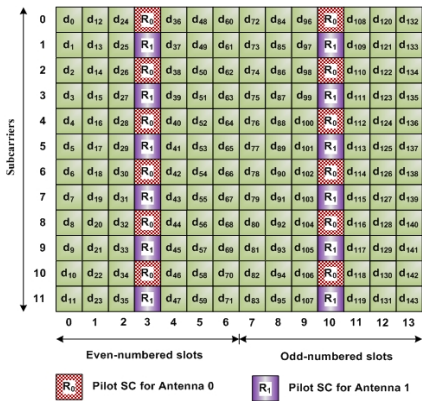


그림 5. 제안된 2-column 파일럿 구조
Fig. 5. Proposed 2-column pilot pattern

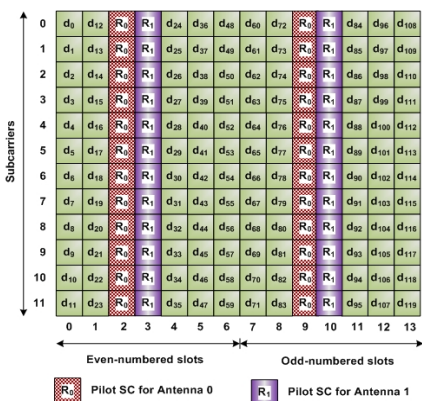


그림 6. 제안된 4-column 파일럿 구조
Fig. 6. Proposed 4-column pilot pattern

여기서, $\hat{H}(k)$ 는 k 번째 인덱스에서의 채널 추정값을 나타내고, $\hat{H}_p(m)$ 은 m 번째 파일럿 위치에서의 채널 추정값을 나타내며, L 은 파일럿 간의 간격을 나타낸다.

3-4 파일럿 Pattern

수중 채널은 매우 복잡한 환경을 가지고 있으며, 도플러 확산 및 지연 확산등의 영향으로 채널 변화가 빠르기 때문에 우수한 채널 보상 기술이 필수적이다. 파일럿과 같은 참조 신호들은 채널 추정 및 등화를 위해 사용되는데, 본 논문에서는 단일 안테나 시스템의 경우, 그림 4와 같은 3GPP LTE 상향 링크 시스템에서 사용하고 있는 파일럿 구조를 초기 성능 분석을 위하여 사용하며, 다중 안테나 시스템의 경우를 위해서는 새로운 파일럿 구조를 제안한다.

2개의 전송 안테나를 갖고 있는 시스템을 위한 제안된 파일럿 구조를 그림 5와 6에 나타내었다. 그림 6의 파일럿 구조의 경우, 그림 4와 그림 5의 파일럿 구조와 비교하여 2배의 파일럿 개수를 사용함으로써, 전송 효율과 link-level 성능 간 트레이드 오프 관계를 갖는다. 각 파일럿 구조에 대한 시스템 성능 평가 및 분석은 다음 장에서 논의한다.

VI. 시뮬레이션 결과 및 성능 평가

이번 장에서는 일반적인 Rayleigh 페이딩 환경에서의 SISO-OFDM 시스템 성능과 수중 채널 모델에서의 SISO-OFDM 시스템의 성능을 비교하고, 수중 통신 환경을 위하여 제안된 MIMO-OFDM 시스템의 성능을 평가 및 분석한다.

그림 7은 지상의 1-path Rayleigh 페이딩 환경에서의 SISO-OFDM 시스템과 수중 채널 환경에서의 SISO-OFDM 성능을 비교한 결과로써, 완벽한 채널 추정을 가정하였고, zero-forcing (ZF) 등화기법을 사용하였다. 일반적인 지상에서의 OFDM 시스템의 경우 높은 E_b/N_0 범위에서 단일 경로 Rayleigh 페이딩의 이론적인 성능과 비교하여 1dB내의 성능 차이가 발생하는데, 이는 guard interval 사용으로 인해 전력 손실이 다소 발생하기 때문이다. 수중 채널 환경에서의 SISO-OFDM의 경우 열악한 채널 환경으로 인하여 BER 성능이 전체적으로 약 5dB 정도 열화 되는 것을 확인할 수 있다.

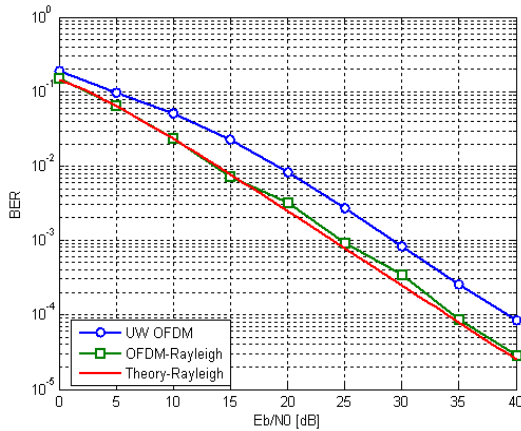


그림 7. SISO-OFDM 시스템 성능 비교
Fig 7. Performance of SISO-OFDM systems

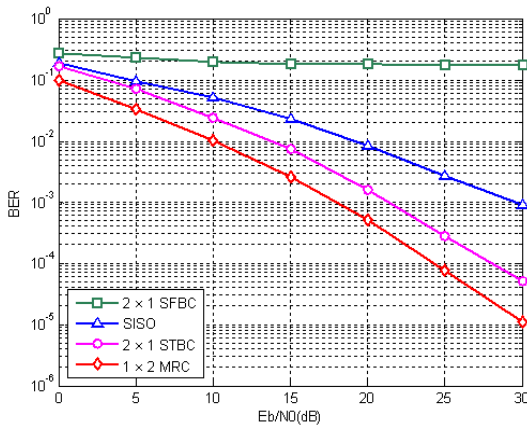


그림 8. 완벽한 채널 추정 환경에서의 MIMO-OFDM 시스템 성능
Fig 8. System performance for different transmit diversity and receive combining schemes with perfect channel estimation

그림 8은 완벽한 채널 추정을 가정하고 있는 상황에서 SISO-OFDM 시스템의 경우와 2×1 SFBC/STBC 및 1×2 MRC 기술을 적용한 MIMO-OFDM 시스템의 BER 성능을 비교한 결과이다. MRC 기법을 적용하였을 때 가장 좋은 성능을 나타내고 있으며, STBC 기법과 비교하여 약 3dB 정도 성능이 우수한 것을 볼 수 있다. 또한, MRC와 STBC 기법을 적용하였을 경우

SISO-OFDM의 경우 보다 좋은 성능을 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

그러나, SFBC 기법의 경우 유효한 BER 특성을 관찰할 수 없는데, 이는 Alamouti code가 효율적으로 동작하기 위해서는 인코딩된 연속적인 두 심볼의 채널 상황이 유사해야 하지만, 수중 채널 환경의 경우 심각한 주파수 선택적 페이딩으로 인한 급격한 채널 상태 변화로 인하여 SFBC의 경우 유효한 BER 특성을 보이지 못하는 것으로 분석된다.

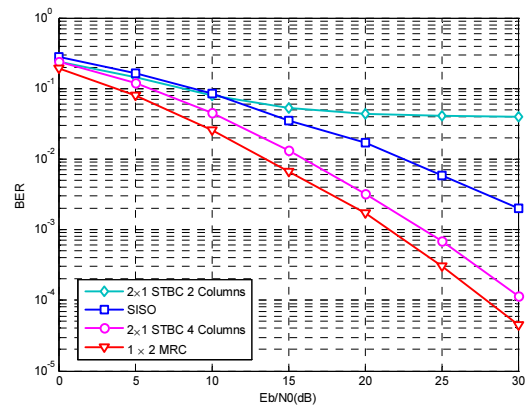


그림 9. LS 채널 추정 환경에서의 MIMO-OFDM 시스템 성능

Fig 9. System performance for different transmit diversity and receive combining schemes with practical channel estimation

그림 9는 LS 채널 추정 기법을 이용하여 추정된 채널 값들을 바탕으로, 두 가지 제안된 파일럿 구조를 갖는 2×1 STBC와 1×2 MRC를 적용한 MIMO-OFDM 시스템의 BER 성능을 나타내고 있는 결과이다. SISO 및 MRC의 경우 그림 4에 나타난 3GPP LTE 상향링크에서 사용되는 파일럿 구조를 적용하였고, STBC 2-column의 경우 III장 그림 5의 파일럿 구조, STBC 4-column의 경우 그림 6의 파일럿 구조를 적용하였다.

그림 8의 완벽한 채널 추정을 가정하였을 경우와 비교하면, SISO와 MRC의 경우 BER 10⁻³에서 두 경우 모두 약 4dB 정도 성능이 열화 되는 것을 볼 수 있다. STBC 2-column의 경우 15dB 이후부터 error floor가 발생하고 있는데, 심각한 주파수 선택적 페이딩으로 인해 정확한 채널 추정이 이루어지지 못해 발생하는 것으로

분석된다. 한편, 상대적으로 파일럿 개수가 많은 STBC 4-column의 경우 MRC의 경우와 비교하여, 약 2dB 정도 열화된 성능을 나타내고 있으며, SISO 시스템의 경우와 비교하여, 약 7dB 정도 우수한 성능을 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 일반적인 OFDM 기법과 수중 통신 시스템에서의 OFDM 기법의 차이점에 대해 분석하였고, MIMO 기술을 적용함에 있어 나타날 수 있는 문제점들에 대해 논하였다. 또한, 수중 통신 시스템에 SFBC 및 STBC와 같은 전송 다이버시티 기법과 MRC 기법을 적용한 후, 측정 채널 데이터를 사용하여 모델링한 수중 채널 모델을 이용하여 MIMO-OFDM 시스템의 성능을 평가 및 분석하였다.

한편, 채널 추정 시의 경우 간단하며, 연산복잡도가 낮은 LS 채널 추정 기법을 이용하여 채널의 상태정보를 획득하였다. 시뮬레이션 결과 SFBC의 경우, 완벽한 채널 추정 환경에서도 수중 채널의 심각한 주파수 선택적 특성으로 인하여 유효한 BER 특성을 보이는데 실패하였고, LS 채널 추정기법을 이용한 환경에서 STBC의 경우 제안한 4-column 파일럿 구조 적용 시, SISO 시스템의 경우와 비교하여, 약 7dB 정도 우수한 성능을 나타내고 있음을 확인할 수 있다.

감사의 글

본 연구는 국토해양부의 지원으로 수행 중인 “수중 무선통신 시스템 개발” 사업 연구 성과의 일부를 밝히며 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] M. Chitre, S. Shahabudeen, and M. Stojanovic, “Underwater acoustic communications and networking: recent advances and future challenges,” in *Marine Technology Society Journal*, vol.42, num.1, pp.103-116, Spring 2008.
- [2] M.C. Domingo, “Overview of channel models for underwater wireless communication networks,” *Physical Commun.*, vol.1, pp.163-182, 2008.
- [3] B. Li, S. Zhou, M. Stojanovic, and L. Freitag, “Pilot-tone based ZP-OFDM demodulation for an underwater acoustic channel,” in *Proc. IEEE Oceans*, Sept. 2006, pp.1-5.
- [4] R. Coates, *Underwater Acoustic Systems*, NewYork: Wiley, 1989.
- [5] L. E. Freitag and J. A. Catipovic, “A signal processing system for underwater acoustic ROV communication”, in *Proc. International Symposium on Unmanned Untethered Submersible Technology*, 1989, pp.34-41.
- [6] H. K. Yeo, B. S. Sharif, A. E. Adams & O. R. Hinton, “Multiuser detection for time-variant multipath environment”, in *Proc. of the 2000 International Symposium on Underwater Technology*, 2000, pp.399-404.
- [7] Xiaoka Xu, Gang Qiao, Jun Su, Pengtao Hu and Enfang Sang, “Study on turbo code for multicarrier underwater acoustic communication,” in *Proc. Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, 2008. pp.1-4.
- [8] Zhang Lan, Xu Xiaomei, Sun Haixin and Chen Yougan, “Performance analysis of IRA codes for underwater acoustic OFDM communication system,” in *Proc. Wireless Communications, Networking and Mobile Computing*, 2009. pp. 1-4.
- [9] Jie Huang, Shengli Zhou and Peter Willett, “Nonbinary LDPC coding for multicarrier underwater acoustic communication,” *IEEE J. Sel. Areas Commun.*, vol. 26, no. 9, pp. 1684-1696, Dec. 2008.

- [10] S. Roy, T.M. Duman and V.K. McDonald, "Error rate improvement in underwater MIMO communication using sparse partial response equalization," *IEEE J. Ocean. Eng.*, vol. 34, pp.181-201, Apr. 2009.
- [11] K. Grythe and J.E. Hakegard, "Non-perfect channel estimation in OFDM-MIMO based underwater communication," in *Proc. OCEANS 2009-EUROPE, 2009*, pp.1-9.
- [12] M. Stojanovic, "Adaptive channel estimation for underwater acoustic MIMO OFDM systems," in *Proc. of IEEE DSP Workshop, Marco Island, FL, Jan. 2009*, pp.132-137.
- [13] 김정주, 고상준, 장경희, "WRAN 응용을 위한 하향 링크 무선전송 방식 : OFDMA 상황인식 시스템에서의 적응 부채널 할당 및 고정 빔 형성 기법," *한국통신학회 논문지*, vol.31, No.3A, pp. 291-303, 2006. 03.
- [14] 선태형, 강승원, 김규현, 장경희, "IEEE 802.16e OFDMA/TDD 이동국 모델의 링크 성능과 복잡도 최적화를 위한 부동 및 고정 소수점 설계," *대한전자공학회 논문지*, 43권, TC편, 11호, pp. 95-117, 2006. 11.

저자소개



한동걸 (DongKeol Han)

2009년 인하대학교 전자공학과 (공학사)
2009년~현재 인하대학교 정보통신대학원 석사과정

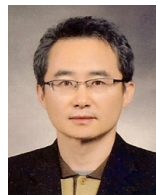
※ 관심분야 : Interference Management, MIMO, 4G 이동통신



회 빙 (Bing Hui)

2005년 중국 동북대학교 정보통신공학과 (공학사)
2009년 인하대학교 정보통신대학원 (공학석사)

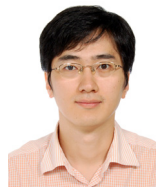
2009년~현재 인하대학교 정보통신 대학원 박사과정
※ 관심분야 : OFDM / MIMO Systems, MIMO Detection algorithm, WiMAX, 3GPP LTE



장경희 (KyungHi Chang)

1985년 연세대학교 전자공학과 (공학사)
1987년 연세대학교 전자공학과 (공학석사)

1992년 Texas A & M Univ., EE Dept. (Ph.D.)
1989년~1990년 삼성종합기술원 주임연구원
1992년~2003년 한국전자통신연구원, 이동통신연구소 무선전송방식연구팀장 (책임연구원)
2003년~현재 인하대학교 정보통신대학원 교수
※ 관심분야 : 4세대 이동통신 및 3GPP LTE 무선전송 방식, WMAN 및 DMB 시스템 무선전송기술, Cognitive Radio, Cross-layer Design, Cooperative Relaying System, RFID / USN Systems, Mobile Ad-hoc Network, 해상/수중 통신 등



변성훈 (Sung-Hun Byun)

1998년 서울대학교 조선해양공학 (공학학사)
2000년 서울대학교 조선해양공학 (공학석사)

2006년~현재 서울대학교 조선해양공학과 박사과정
2010년~현재 한국해양연구원 해양시스템연구부 선임연구원
※ 관심분야 : 신호처리, 수중 통신 및 항법, 수중음향 전파 모델



김시문 (Sea-Moon Kim)

1992년 KAIST 기계공학과
(공학사)
1994년 KAIST 기계공학과
(공학석사)

2001년 KAIST 기계공학과 (공학박사)
2001년~현재 한국해양연구원 선임연구원
2004년~현재 UST 해양정보통신공학과 겸임교수
※ 관심분야: 수중통신, 채널모델링



임용곤 (Yong-Kon Lim)

1979년 충남대학교 전기공학과
(공학사)
1984년 충남대학교 전력전자
공학과 (공학석사)

1994년 아주대학교 전자공학과 (공학박사)
1980년 ~ 현재 한국해양연구원
해양시스템기술연구본부 책임연구원/소장
2004년 ~ 현재 과학기술연합대학원대학교
해양정보통신공학과 정교수/겸임교수
※ 관심분야: 수중통신 및 네트워크, 해양통신, 선박
IT-융합 시스템, 해운 물류 등