

수중통신의 수직채널에서 Alamouti 기반 MIMO-OFDM 분석

조병록*, 맹기윤¹
¹순천대학교 전자공학과

Alamouti MIMO-OFDM-based analysis in the vertical channel of the underwater communication

Byung-Lok Cho^{*}, Gi-Yoon Maeng¹

¹Department of Electronic Engineering, Sunchon University

요약 본 논문에서는 수중 수직통신채널 환경에서 Alamouti를 이용한 MIMO-OFDM 방식을 분석하였다. 수중 수직통신채널은 수중환경에 적합한 전달손실과 다중경로손실 등을 고려해야 해서 수중통신에서 통신 성능과 효율을 향상할 수 있는 방안이 필요하다. 따라서 본 논문은 각 손실을 고려한 실질적인 모의 수중통신 환경을 구현하기 위해, 오차를 유발하는 환경에서 다중경로 손실, 전달손실, 도플러확산을 고려하여 모델링하였고, 모델링된 임펄스응답에 대한 채널 다중경로 프로파일을 Alamouti STBC 방식의 MIMO-OFDM 시스템을 통하여 시뮬레이션 했다. 본 논문에서 제안한 수중 수직통신채널에서 모델링한 Alamouti STBC 방식의 MIMO-OFDM 시스템 2Tx-2Rx 방식이 2Tx-1Rx 방식에 비하여 10^{-3} BER 기점을 기준으로 약 3~5 dB 가량의 이득을 얻었다.

Abstract In this paper, we analyzed Alamouti based the MIMO-OFDM system in an underwater vertical communication channels. These in consideration both the transmission loss the multipath loss which is suitable for underwater environment are necessary method to improve the efficiency and communication performance in underwater communication. This paper is modeled in an environment that caused the error, considered each simulated the multi-path loss, transmission loss, the Doppler spread in order to implement a practical communication environment and simulated through the MIMO-OFDM system of Alamouti STBC method. The MIMO-OFDM system 2Tx-2Rx of Alamouti STBC scheme in underwater vertical communication system is obtained about 3~5 dB gain as compare with its 2Tx-1Rx scheme with reference 10^{-3} BER.

Keywords : Alamouti STBC, MIMO-OFDM, underwater vertical communication channels

1. 서론

수중에서 신호를 전달하는 채널환경은 수심이나 염분, 수온에 의해 음파전달속도가 다르고, 음파가 전달하는 과정에서 전달손실로써 풍속에 의한 해수면의 산란, 해저면의 매질 특성 등에 따라 다중경로 손실이 달라진다. 또한 다중경로 채널의 시변 특성으로 음파의 송신기와 수신기의 해면 풍속, 유속에 의한 위치의 변화에 따라

도플러 확산을 초래한다. 이러한 주파수 선택적 페이딩은 OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing)의 하나의 정보를 다수의 반송파로 분할, 이의 간격을 최소화하기 위해 직교성을 부여하여 전송효율을 높인 다중화 기법을 통해서 보완할 수 있다. 이를 이용하여 선행 논문들은[1,2] OMP 알고리즘, Adaptive 알고리즘 등이 제안되었고, OFDM 시스템을 기반으로 한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

본 논문은 2009년도 정부(미래창조과학부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 해외우수연구기관 유치사업 연구임(2009-00422)

*Corresponding Author : Byung-Lok Cho(Sunchon Univ.) Tel: +82-61-750-3573 email: blcho@sunchon.ac.kr

Received May 26, 2015

Revised (1st July 22, 2015, 2nd July 29, 2015)

Accepted August 6, 2015

Published August 31, 2015

이러한 환경에서는 통신성과 효율에 문제가 되기 때문에 개선할 수 있는 방법들에 대한 연구가 활발히 진행되었다. 하지만, 1) 다양한 수중 오차유발 요인에 있어서 수중통신채널환경이 너무 단순화되어 있는 점, 2) 수중통신환경에서 직파와 반사파의 경로 차의 크기에 대한 수직채널과 수평채널의 구분이 분명하지 않은 점,

3) 수직채널환경에서의 수중통신 모델링에 대한 선행 연구는 없었다는 점, 위와 같은 점에서 수중 수직통신채널환경의 신뢰성을 보장하기 어렵다.

본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하기 위해서 수중 수직채널 환경에서의 전달손실, 해수와 해저면 산란손실, 다중경로손실을 고려한 실질적인 모의 수중통신환경을 모델링하고 Alamouti STBC 기법의 MIMO-OFDM 시스템을 통하여 시뮬레이션 해봄으로써 이러한 채널 환경에 Alamouti 기법을 이용한 MIMO-OFDM 방식 특성을 분석하고자 한다.

본 논문의 2장 본문에서는 다음과 같은 순서로 구성되어 있다. I 장에서 수중통신환경에서의 수직통신환경에 대해 분석하였고, 수중통신의 오차 유발요인, 모의 수중채널 모델링에 대해 분석하였다. II 장에서 Alamouti STBC 기법의 MIMO-OFDM 시스템에 대해서 분석하였다. 마지막으로 III 장에서는 상기 MIMO-OFDM 시스템을 통한 시뮬레이션의 BER(Bit Error Rate)을 비교해 봄으로써 Alamouti STBC 기법을 제시한다.

2. 본론

2.1 수중 채널 환경 분석

수중 환경에서 음파 신호는 수심, 수온, 전송거리, 풍속에 의한 해수면의 변화, 해저면 매질의 상태 등으로 인해 다양하고 복잡한 특성을 가진다. 수중에서의 음파의 전달은 Direct Wave와 더불어 해수면과 해저면(Surface reflection, Bottom reflection)의 반사파들에 의해 원거리까지 전달된다. 특히, 천해(Shallow sea)의 경우 해수면과 해저면의 반사 등으로 인해 다중 경로를 포함한 다양한 특성으로 수중 음향 통신의 성능 저하를 일으키기 쉽기 때문에 심해에 비해 음파가 전달되는 형태가 복잡하다.

2.1.1 수직 채널 환경 분석

해저의 매질 특성과 해면의 상태에 따라 다중경로의 특성이 크게 달라진다. 수직채널환경은 수평채널에 비해 상대적으로 잔향시간이 짧은 특성을 보인다. 수중음향통신시스템의 경우 복반사에 의한 심벌 간 간섭 영향을 해석하기 위해 다중경로와 산란에 의한 수신신호의 변동 특성을 확률모델로 해석하는 연구가 활발히 이루어지고 있는 추세다[4].

본 논문에서 제안한 그림 1의 수직채널에서의 Direct Path와 해수면과 해저면에 반사되어 송신기에서부터 수신기에 이르기까지의 음파의 다중경로를 보인다.

이러한 수중 다중경로 채널에서 음파의 전파경로를 해석하기 위해서 Ray기법, Bellhop 등이 사용된다[6].

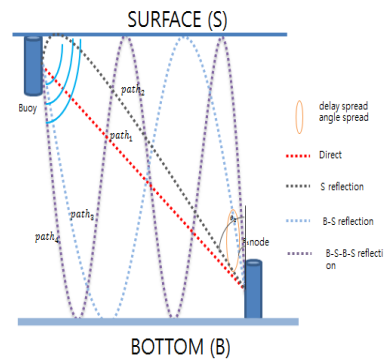


Fig. 1. Multipaths of the underwater vertical channel

2.1.2 수중음향통신 오차 유발 요인 분석

1) 전달 손실

수중 전달 손실(Transmission Loss)은 확산에 의한 손실, 해수면과 해저면에 의한 산란손실로 산출된다. 그림 2와 같이 거리(Distance)에 따른 전달손실을 형성한다. 전달손실은 식 (1)과 같다.[2]

$$TL = 10 \log \frac{I(r)}{I_0} = 20 \log R + \alpha(f) R 10^{-3} \quad (1)$$

I_0 와 $I(r)$ 은 각각 음원으로부터 1m거리 R에서의 Intensity 이다.

$\alpha(f)$ 는 흡수계수이며 주파수 $f(kHz)$ 라 할 때의 관계는 그림 3과 같으며, 식 (2)과 같이 정의할 수 있다.

$$\alpha(f) = 0.11 \frac{f^2}{1 + f^2} + 44 \frac{f^2}{4100 + f^2} + 2.75 \cdot 10^{-4} f^2 + 0.003 \quad (2)$$

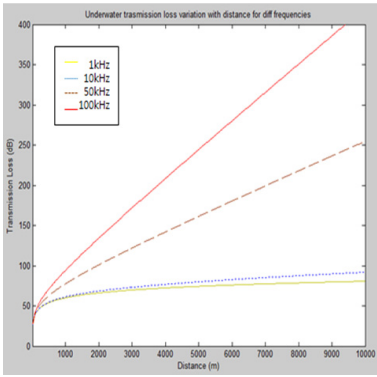


Fig. 2. Transmission Loss in underwater

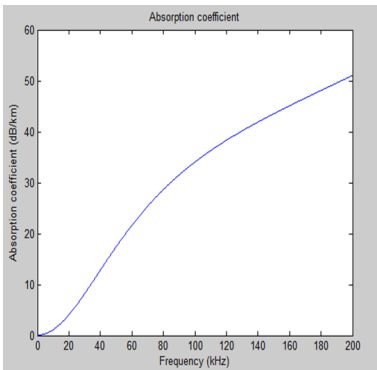


Fig. 3. Absorption coefficient in underwater

2) 해수면 산란 손실

해수면의 산란손실(α_s)은 식 (3)과 같다.

$$\alpha_s = -20 \log [1 - 0.0234 (fH)^{(3/2)}] \quad (3)$$

f는 신호 주파수[kHz], H는 평균 파고[ft]이다.

그림 4에서는 우리나라 평균 파고인 1m~2m에서 1m (약 3.28ft)로 계산하였다.

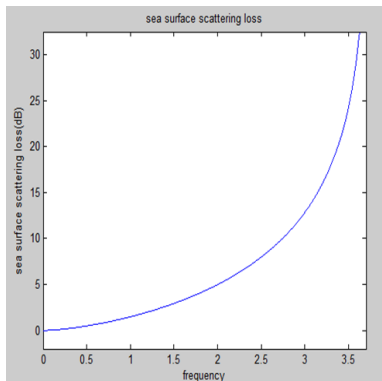


Fig. 4. Scattering loss at surface of the sea

3) 해저면 산란 손실

해저면에서 산란손실(α_b)은 식 (4)과 같이 계산한다.

$$\alpha_b = -20 \log_{10} |R| \quad (4)$$

여기서 R은 식 (5)과 같이 정의 된다.

$$R = \frac{Z_2/Z_1 \sin \theta_i - \sin \theta_t}{Z_2/Z_1 \sin \theta_i + \sin \theta_t} \quad (5)$$

여기서 θ_i 는 입사각, θ_t 는 투과각이다. [3]

2.1.3 통신채널의 시변특성과 관련되는 해면파의 스펙트럼

통신채널의 시변특성과 관련되는 해면파 스펙트럼의 이론과 측정치를 기준으로 제안된 Pierson-Moskowitz 스펙트럼은 식 (6)과 같이 주어진다[4].

$$S(w) = \left(\frac{\alpha g^2}{\omega^5} \right) \exp \left[-\beta \left(\frac{\omega_0}{\omega} \right)^4 \right] \quad (6)$$

여기서 $\alpha = 8.1 \times 10^{-3}$, $\beta = 0.74$, $\omega_0 = \frac{g}{U_{19.5}}$, $\omega = 2\pi f$, f = 주파수. 여기서 $U_{19.5}$ 는 해면으로부터 19.5m 위치의 풍속이다.

식 (6)에 의한 Pierson-Moskowitz 해면파의 스펙트럼은 그림 5와 같이 풍속에 따라 해면의 우세한 파가 해면 반사파에 많은 영향을 주며, 이로 인해 지연확산 및 일관성 특성의 변화로 전송성능에 영향을 미치게 한다.

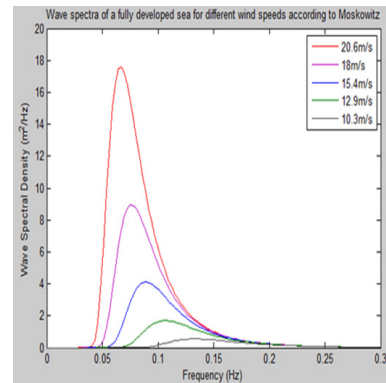


Fig. 5. Pierson-Moskowitz spectrum of the sea surface wave

2.1.4 도플러 확산

도플러 확산은 송, 수신단의 움직임이나 surface reflection point의 움직임에 기인하며 수중음향통신에서

큰 의미가 있다. 이것은 수신부에서 많은 인접 심벌들 사이에 간섭을 일으킴으로써, 수중 음향 통신 성능의 저하를 가져온다. 대역폭과 심벌 구간 사이의 곱이 1보다 작으면 무시할 수 있으나 1보다 크면 무시할 수 없다. 도플러 확산은 간단한 주파수 병진과 연속적인 주파수 확산을 발생시킨다. 전자의 경우 수신부에서 쉽게 보상되나, 후자의 경우 보상하기 어려워진다. 각 주파수에 따른 풍속에 대한 도플러 확산은 식 (7)과 같다. [5]

$$f_D = (0.0175/c)f\omega^{3/2}\cos\theta \quad (7)$$

위의 식에서 c 는 음속으로 염분, 수온, 압력 등의 영향을 받지만 일반적으로 1500m/s 이며, ω 는 해면 풍속, θ 는 지표각(grazing angle)을 나타낸다. 그림 6은 반송파 주파수와 해면 풍속에 따른 도플러 확산으로 고주파 반송파를 사용할수록, 해면 풍속에 의한 도플러 확산이 기하급수적으로 증가함을 나타낸다.

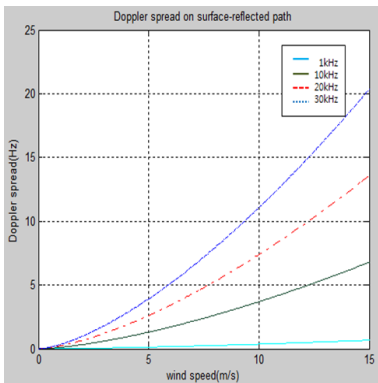


Fig. 6. Doppler spread in underwater

2.1.5 수중 음속 프로파일

Sound Speed Profile 공식은 식 (8)과 같다.

$$1448.96 + 4.591T - 5.304 \times 10^{-2}T^2 + 2.374 \times 10^{-4}T^3 + 1.340(S - 35) + 1.630 \times 10^{-2}D + 1.675 \times 10^{-7}D^2 - 1.025 \times 10^{-2}T(S - 35) - 7.139 \times 10^{-13}TD^3 \quad (8)$$

여기서 T = temperature in degrees Celsius, S = salinity in parts per thousand, D = depth in meters이다. [6]

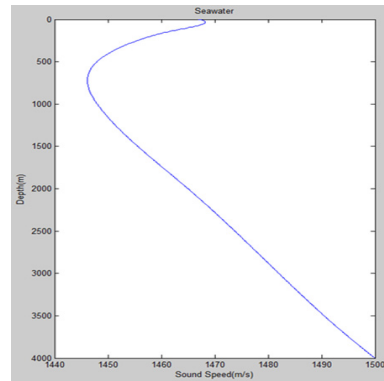


Fig. 7. Sound speed profile in underwater

2.1.6 모의 수중채널 모델링

그림 8은 Bellhop를 사용한 결과로서, 모의 수중채널의 다중경로로 해수면에 있는 송신단으로부터 수심이 50m인 해저면에 있는 수신단에 이르는 무수히 많은 경로를 나타내었다.

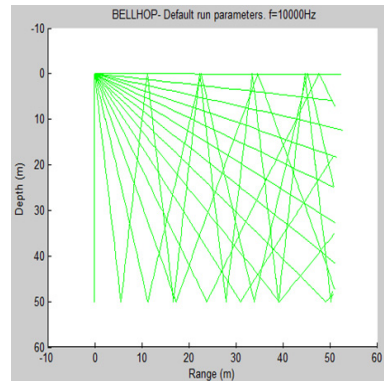
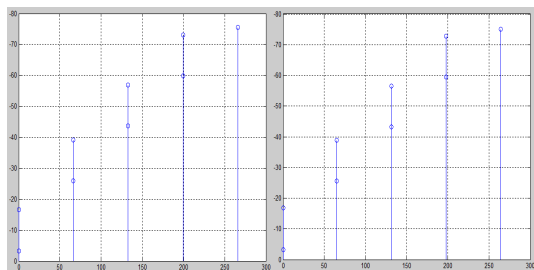


Fig. 8. Multipaths in underwater vertical communication environment

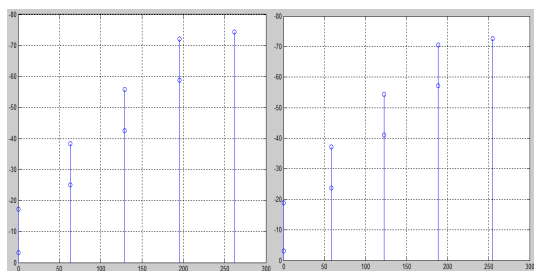
2.1.7 제안된 다중경로 손실 모델링

수중음향 전달채널의 임펄스 응답(Channel Impulse Response : CIR)은 음속구조(Sound Speed Profile : SSP)의 영향을 받으며, 채널 임펄스 응답의 변화는 수중 음향통신 시스템의 성능에 중요한 영향을 미친다[3]. 그림 9는 수중 수직통신 환경에서 그림 1과 같은 환경으로서 송신부가 해수면과 이루는 높이가 0, 수신부가 해저면과 이루는 높이가 0인 경우로 주파수가 10kHz, depth가 50m, distance가 10, 20, 30, 40, 50m로 점차 증가하는 모의 수중통신채널의 임펄스 응답의 크기를 Log

scale로 표현한 그래프이다. 일반적인 물의 밀도와 음속을 각각 $1000g/m^3$, $1500m/s$ 이며, 해저에서의 물의 밀도와 음속으로 각각 $1800g/m^3$, $1300m/s$ 을 전제로 수중 채널 반사 특성을 고려하여 모델링 되었다. 또한 수중음향통신 오차 유발요인으로 다중경로 손실, 전달손실, 도플러 확산을 고려하여 모델링하였다.



[Fig. 9-a] distance = 10m [Fig. 9-b] distance = 20m



[Fig. 9-c] distance = 30m [Fig. 9-d] distance = 50m

Fig. 9. Impulse response amplitude in underwater multipath channels

2.2 Alamouti STBC 알고리즘 분석

Alamouti STBC 2TX, 2RX 구조는 그림 10과 같다.

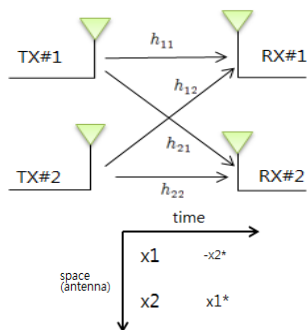


Fig. 10. 2TX - 2RX scheme of Alamouti STBC

그림 10에서 수신 신호는 수식 식(11), (12), (13)과 같다.

$$\begin{bmatrix} y_1^1 \\ y_2^1 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1^1 \\ n_2^1 \end{bmatrix} \tag{11}$$

$$\begin{bmatrix} y_1^2 \\ y_2^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -x_2^* \\ x_1^* \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1^2 \\ n_2^2 \end{bmatrix} \tag{12}$$

$$\begin{bmatrix} y_1^1 \\ y_2^1 \\ y_1^2 \\ y_2^2 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \\ h_{12}^* & -h_{11}^* \\ h_{22}^* & -h_{21}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1^1 \\ n_2^1 \\ n_1^2 \\ n_2^2 \end{bmatrix} \tag{13}$$

또한 채널은 식(18)과 같다.

$$H = \begin{bmatrix} h_{11} & h_{12} \\ h_{21} & h_{22} \\ h_{12}^* & -h_{11}^* \\ h_{22}^* & -h_{21}^* \end{bmatrix} \tag{14}$$

수신 신호의 zero-forcing 등화는 식(15), (16), (17)과 같다.

$$H^+ = (H^H H)^{-1} H^H \tag{15}$$

$$(H^H H) = \tag{16}$$

$$\begin{bmatrix} |h_{11}|^2 + |h_{21}|^2 + |h_{12}|^2 + |h_{22}|^2 & 0 \\ 0 & |h_{11}|^2 + |h_{21}|^2 + |h_{12}|^2 + |h_{22}|^2 \end{bmatrix}$$

$$(H^H H)^{-1} = \tag{17}$$

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{|h_{11}|^2 + |h_{21}|^2 + |h_{12}|^2 + |h_{22}|^2} & 0 \\ 0 & \frac{1}{|h_{11}|^2 + |h_{21}|^2 + |h_{12}|^2 + |h_{22}|^2} \end{bmatrix}$$

복원된 신호는 식 (18)와 같다.

$$\begin{bmatrix} \hat{x}_1 \\ \hat{x}_2 \end{bmatrix} = (H^H H)^{-1} H^H \begin{bmatrix} y_1^1 \\ y_2^1 \\ y_1^2 \\ y_2^2 \end{bmatrix} \tag{18}$$

3. 모의실험 및 분석

3.1 수중 수직채널에서 Alamouti을 이용한 MIMO-OFDM 시스템 모의실험 및 분석

그림 11은 수중 수직채널에서 Alamouti 기법을 이용한 MIMO-OFDM 시스템의 블록도를 나타낸다.

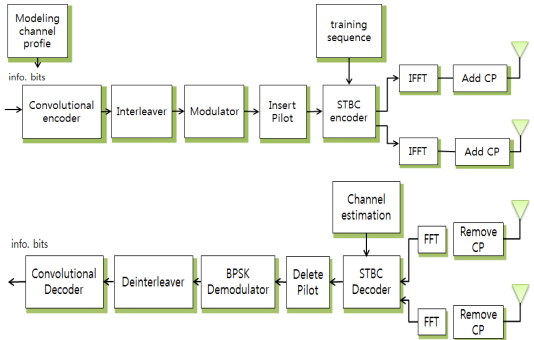
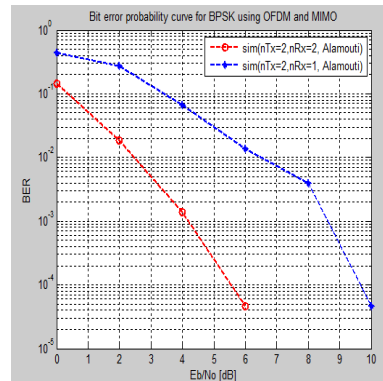


Fig. 11. Alamouti based MIMO-OFDM system in underwater vertical channel

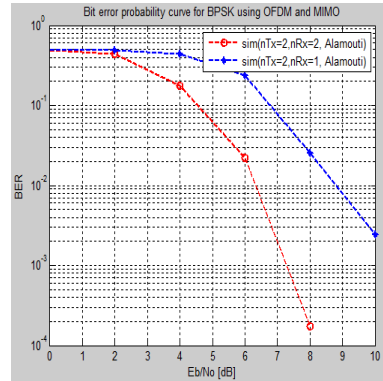
그림 11에 대한 블록도 모의실험 파라미터들은 다음과 같이 설정하였다. 데이터 길이 심벌당비트길이는 52, fft사이즈는 64, 서브캐리어는 52, 변조방식은 BPSK, training sequence는 802.11a의 LTF, 채널추정방식은 zreo-forcing를 이용하였다.

3.2 MIMO-OFDM을 이용한 BPSK의 비트에러율

다음의 그림 12는 다중경로 손실, 전달손실, 도플러확산을 고려하였고, 2.1.2의 오차 유발 요인을 고려한 환경에서 임의의 임펄스응답에 대한 채널 다중경로 프로파일을 [0dB - 10dB - 20dB - 30dB - 40dB]로 하여 비트에러율을 시뮬레이션한 결과이다. 이를 통하여 Alamouti 기법을 이용한 2Tx-2Rx 채널이 2Tx-1Rx 채널 보다 10^{-3} 을 기점으로 약 4~5dB 가량의 이득이 발생하는 것을 알 수 있다. 또한 그림 13은 데이터에만 잡음이 섞이는 위와 달리 training sequence에도 잡음이 섞이는 경우로 수중 수직채널환경 모델링에 대한 보다 실질적인 BER시뮬레이션 결과를 제시했다.

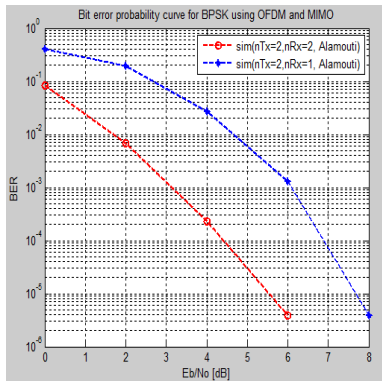


[Fig. 12] BER as case noise added to only data with consideration multipath loss, transmission loss and doppler spread in multipath profile [0dB - 10dB - 20dB - 30dB - 40dB]

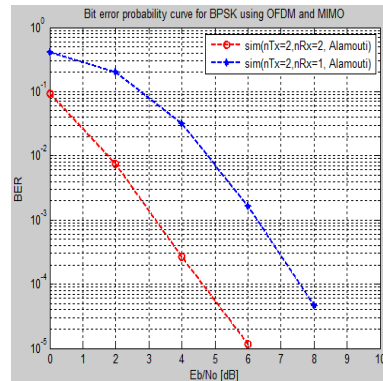


[Fig. 13] BER as case noise added to training sequence with consideration multipath loss, transmission loss and doppler spread in multipath profile [0dB - 10dB - 20dB - 30dB - 40dB]

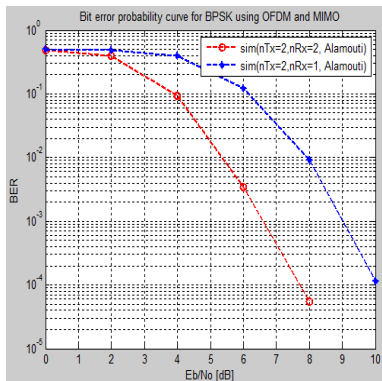
다음의 그림 14, 15는 [Fig. 9-a]의 환경에서와 같이 10kHz의 주파수를 이용하여 수중 수직채널환경을 모델링 하였을 경우이다. 그림 14도 마찬가지로 다중경로 손실, 전달손실, 도플러확산 등을 고려하여 모델링한 채널 다중경로 프로파일을 [-16dB - 39dB - 57dB - 73dB - 75dB]로 하여 시뮬레이션 하였다. 그림 12과 마찬가지로 2Tx-2Rx와 2Tx-1Rx를 비교하였을 때 10^{-3} 을 기점으로 약 3dB 가량의 이득이 발생하는 것을 볼 수 있다.



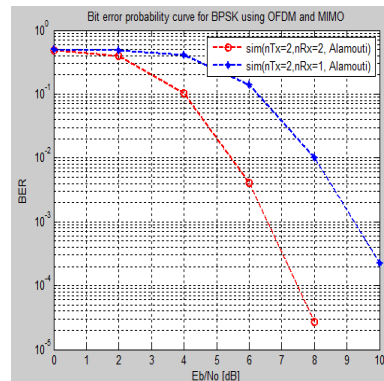
[Fig. 14] in [Fig. 9-a] BER as case noise added to only data with consideration multipath loss, transmission loss and doppler spread n multipath profile [-16dB -39dB -57dB -73dB -75dB] according [Fig. 9-a] and underwater vertical channels



[Fig. 16] BER as case noise added to only data with consideration multipath loss, transmission loss and doppler spread n multipath profile [-19dB -37dB -54dB -70dB -73dB] according [Fig. 9-d] and underwater vertical channels



[Fig. 15] in [Fig. 9-a] BER as case noise added to training sequence with consideration multipath loss, transmission loss and doppler spread in multipath profile [-16dB -39dB -57dB -73dB -75dB] according [Fig. 9-a] and underwater vertical channels



[Fig. 17] BER as case noise added to training sequence with consideration multipath loss, transmission loss and doppler spread in multipath profile [-19dB -37dB -54dB -70dB -73dB] according [Fig. 9-d] and underwater vertical channels

그림 16도 마찬가지로 [Fig. 9-d]의 환경에서 모델링 하였을 경우이다. 모델링한 채널 다중경로 프로파일을 [-19dB -37dB -54dB -70dB -73dB]로 하여 시뮬레이션 하였다. 약 3dB가량의 이득이 발생함을 볼 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 수중 수직통신채널 환경에서 전달손실, 해수면 산란손실, 해저면 산란손실 그리고 다중경로 손실 등을 분석하였고, 이러한 손실을 고려하는 모의 수중통신 모델링을 통하여 보다 실질적인 모델을 바탕으로 Alamouti을 이용한 MIMO-OFDM 방식의 특성을 분석하였다. 또한 본 논문에서 제안하는 Alamouti STBC 방식의 MIMO-OFDM 시스템에서 2Tx-2Rx 방식이

2Tx-1Rx 방식에 비하여 10^{-3} Ber기점을 기준으로 약 3~5 dB 가량의 이득이 발생하였다.

References

- [1] Hyeong-Won Jeon, Su-Je Lee, and Heung-No Lee "Underwater Channel Analysis and Transmission Method Research via Coded OFDM" The Korean Institute of Communications and Information Sciences, 2011.4
DOI: <http://dx.doi.org/10.7840/KICS.2011.36B.5.573>
- [2] Yo-woong Im, and Hee-hoon Kang "Performance analysis of an adaptive OFDM over an underwater acoustic channel", 2010.09
- [3] Dong-Yeong Jeong, Sea-Moon Kim, Sung-Hoon Byun, and Yong-Kon Lim "A Study on the Characteristics of Underwater Sound Transmission by Short-term Variation of Sound Speed Profiles in Shallow-Water Channel with Thermocline" The Journal of the Acoustical Society of Koera, 2014.11
DOI: <http://dx.doi.org/10.7776/ASK.2015.34.1.020>
- [4] Kyeng-Beak Ryu "Analysis of Channel Fluctuation in Underwater Communication and its Effect on Communication Performance" Pukyong National University, 2009.2
- [5] Se-Hyun Oh, Hyeon-su Kim, J. S. Kim, Jung-Hong Cho, Jae-hak Chung, and H. C. Song "Performance Analysis of Underwater Acoustic Communication Systems Using Underwater Channel Simulation Tool" The Journal of the Acoustical Society of Korea, 2012.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7776/ASK.2012.31.6.373>
- [6] Joon-suk Kim, Il-suek Koh, and Youg-shik Lee "Underwater Acoustic Communication Channel Modeling Regarding Magnitude Fluctuation Based on Ocean Surface Scattering Theory and BELLHOP Ray Model and Its Application to Passive Time-reversal Communication" The Journal of the Acoustical Society of Korea, 2013.
DOI: <http://dx.doi.org/10.7776/ASK.2013.32.2.116>

조 병 록(Byung-Lok Cho)

[정회원]



- 1987년 2월 : 성균관대학교 전자공학과(공학사)
- 1990년 2월 : 성균관대학교 대학원 전자공학과(공학석사)
- 1994년 2월 : 성균관대학교 대학원 전자공학과(공학박사)
- 1986년 12월 ~ 1988년 3월 : (주) 삼성전자 종합연구소
- 1994년 3월 ~ 현재 : 순천대학교 전자공학과 교수

<관심분야>

디지털 통신이론, 디지털 통신시스템 ASIC설계, 무선멀티미디어용 고속 모뎀 설계, 무선망 성능분석

맹 기 윤(Gi-Yoon Maeng)

[준회원]



- 2010년 3월 ~ 현재 : 순천대학교 전자공학과 (학사)

<관심분야>

디지털 통신이론, 디지털 통신시스템