

수중 MIMO 벡터 채널 모델링 및 성능 분석

MIMO Vector Channel Modeling and Performance Analysis in Underwater Channel Environments

이 덕 환*, 고 학 림*, 임 용 곤**

(Deok-Hwan Lee*, Hak-Lim Ko*, Yong-Kon Lim**)

*호서대학교 정보통신공학부 **한국해양연구원

(접수일자: 2007년 8월 8일; 수정일자: 2007년 10월 9일; 채택일자: 2007년 11월 20일)

본 논문에서는 수중 채널 환경에서 초음파 통신의 성능 및 효율을 향상시키기 위하여 MIMO (Multiple Input Multiple Output) 용 수중 벡터 채널 모델링을 연구하였으며, 이를 이용한 MIMO 기법의 성능을 분석하였다. 수중 MIMO 채널 모델링을 위하여 실험 환경에서 측정을 수행하였으며, 측정된 데이터를 분석하여 수중 채널 환경에서의 페이딩, 도플러, 시간지연, 도달각, 수신전력 등의 파라미터 값을 추정하였고, 이를 이용한 MIMO 용 수중 벡터 채널 모델링을 수행하였다. 또한 제안된 채널 모델링을 이용하여 수중 MIMO 시스템의 성능을 분석하였으며, 성능 분석 결과 수중에서 MIMO 기법을 사용하는 경우 같은 SNR에 대해 비트 에러율이 크게 감소함을 알 수 있었다.

핵심용어: MIMO, 수중초음파통신, STBC, 수중채널 모델링, 실험적 실험

투고분야: 수중음향 분야 (5.7)

In this paper we have studied the underwater vector channel modeling for MIMO (Multiple Input Multiple Output) to increase the performance and efficiency for ultrasound communication in underwater channel environments. Also we have analyzed the MIMO techniques using the proposed channel modeling. For underwater MIMO channel modeling, experiments were done in real channel environments and the data were analyzed to estimate parameters such as fading, Doppler, time delay, angle of arrival, and receiving power. These were used for modeling of underwater vector channel modeling for MIMO.

Additionally, we have analyzed the performance of MIMO systems using our proposed channel models. As a result we could see that the BER has decreased severely with the same SNR when using the MIMO system.

Key words: MIMO, Underwater acoustic communication, STBC, Underwater channel modeling, Field test

ASK subject classification: Underwater Acoustics (5.7)

I. 서론

수중에서의 초음파전달 채널환경은 수심이나 염분 등에 의해서 신호의 전달속도가 다르고, 해면이나 해저에 의한 다중경로의 영향을 많이 받는다. 또한 음파를 사용하는 수중 통신 채널은 페이딩과 도플러 효과를 동반한 시간에 따라서 매우 빠르게 변화하는 다중 경로 채널 특성을 가진다 [1]. 수직 채널의 경우에는 비교적 안정적인 채널 특성을 갖지만, 수평 채널의 경우에는 수심 심도에 해당하는 다중 경로 성분이 존재하는 경우도 있다 [2].

이처럼 수중에서의 음파통신은 육상에서의 전파 통신에 비해 많은 제약조건을 가지고 있다.

일반적으로 수중초음파 통신은 이동통신보다 매우 낮은 저주파의 반송 주파수를 사용하여 신호를 전송한다. 따라서 반송주파수에 대한 전송되는 신호의 상대 대역폭이 이동통신 경우에 비해 매우 크다. 또한 음파를 이용한 무선통신은 전송 신호의 대역폭이 제한되어 있기 때문에 통신용량의 증가에 많은 어려움이 있다. 따라서 현재 열악한 채널 환경을 극복하기 위하여 빔형성 및 적응 등화 기법이 연구되고 있으며 [3], 전송율의 증가를 위해 적응 변조 기법과 MIMO (Multiple Input Multiple Output) 기법 [4]이 연구되고 있다.

책임저자: 이 덕 환 (mothello@chol.com)

336-795 충남 아산시 배방면 세출리 산 29-1 호서대학교 1공학관

323호

(전화: 041-540-5691; 팩스: 041-540-5690)

MIMO 기법의 장점은 단일 센서를 이용한 통신 방식에 비해 추가적인 주파수나 송신전력을 증가 시키지 않으면서도 채널 용량을 센서의 수에 비례하여 증가시키는 것이다. 다중 센서를 사용함으로써 얻을 수 있는 장점은 복수 개의 송신 센서를 사용하여 다수의 심볼을 동시에 전송하므로 전송률이 향상되고 송수신 센서 수의 곱에 비례하는 다이버시티 이득을 얻음으로써 데이터 전송 신뢰도를 높일 수 있다는 것이다. 이러한 MIMO 기법의 연구 및 성능 분석을 위한 모의 실험에 필수적으로 요구되는 것이 채널 모델링이다. 즉, 채널 모델링 기법에 따라서 시스템의 모의 실험 결과가 많은 차이를 나타나게 된다. 그렇기 때문에 실제 채널환경과 유사한 채널 모델링이 이루어져야만 시스템의 성능분석 결과가 높은 신뢰성을 가질 수 있다.

따라서 본 논문에서는 수중 MIMO 시스템의 신뢰성 높은 성능 분석을 위하여 실제의 수중 채널 환경에서 측정을 수행하였다. 수중 전송실험은 남해안에서 배를 타고 채널 분석에 필요한 데이터를 수중으로 전송하고, 수중 채널을 통과한 신호를 수신하여 저장하는 방법으로 수행하였으며, 수집한 데이터를 이용하여 수중 채널 환경에서의 페이딩 특성 및 도플러 특성, 시간 지연 및 도달각 특성 등을 분석하였다. 또한, 분석된 채널 파라미터와 반송 주파수, 송수신 센서의 개수 및 간격, 전송대역폭 등을 고려하여 $M \times N$ 수중 MIMO 벡터 채널 모델링을 수행하였다.

그리고 본 논문에서는 MIMO 벡터 채널 모델링을 이용하여 생성된 채널 데이터를 이용하여, 수중 채널환경에서의 MIMO시스템의 성능을 분석하였다.

II. 수중채널 데이터 수집 및 분석

본 논문에서는 실제 수중 환경에서 측정을 통해 MIMO 기법의 성능 검증을 위한 수중 벡터 채널 모델링을 수행하였다. 따라서 실제 바다에서 측정을 통한 데이터 전송 및 수집 실험을 수행하였으며 수신된 데이터의 채널 특성을 분석하였다. 본 측정에 사용된 전송 신호의 파라미터가 표 1에 보여진다.

표 1에서 보이는 바와 같이 측정에서는 수중 채널 환경에서의 페이딩 및 도플러 특성 분석을 위하여 25KHz의 정현파를 전송하였으며, 다중경로 특성 분석을 위하여는 2047 심볼의 PN 부호를 QPSK 변조하여 전송하였다. 또

표 1. 수중 측정에 사용된 전송 신호의 파라미터
Table. 1. Parameter of transmission signal that is used in underwater measuring.

	파라미터	CW 신호	PN Code
송신	중심 주파수	-	25 kHz
	대역폭	-	5KHz
	전송신호	sine wave	QPSK
	심볼 길이	-	2047
수신	샘플링율	-	200Ksps
	수집 시간	20초	10초
	채널 수	1	8 (Linear array)
측정 환경	수심	-	8m
	거리	-	500m - 2,000m

한 전송된 신호는 수신단에서 데이터 수집장치를 통하여 저장하였다.

전송 실험은 수심이 약 8m 정도의 남해 거제 앞바다의 천해에서 수행하였다. 전송을 위한 실험 환경이 그림 1에 보여지고, 측정 장비가 그림 2에 보여진다.

그림 1에서 보이는 바와 같이 본 측정에서 송신부는 선박에 설치하였으며 수신부는 부두에 설치하여 수행하였다. 또한 송신부에서 전송한 신호는 수신부에서 8x1 선형 수직 배열 센서를 이용하여 수신하였으며, 배열 센서간의 간격은 6.5cm (약 1.1 파장) 이었다. 그리고 배열 센서에 수신된 신호는 샘플링율이 200Ksps인 A/D를 이용하여 디지털 데이터로 변환한 후에 저장하였다. 측정을 통해 수신된 데이터 중에 25KHz 정현파와 QPSK 송신신호에 대한 수신 신호와 해당 신호의 주파수 스펙트럼의 한 예가 그림 3에 보여진다.

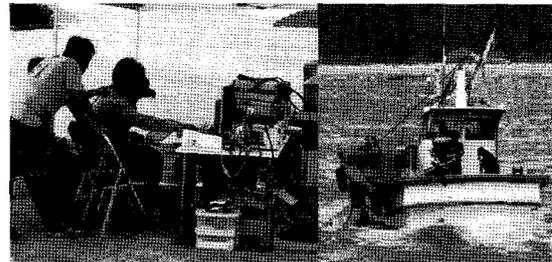


그림 1. 수중 데이터 측정 실험 환경
Fig. 1. Underwater data measurement experiment Environment.

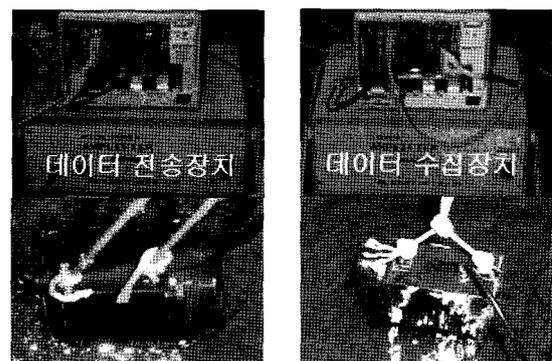


그림 2. 수중 데이터 측정 장치
Fig. 2. Underwater data measurement equipment.

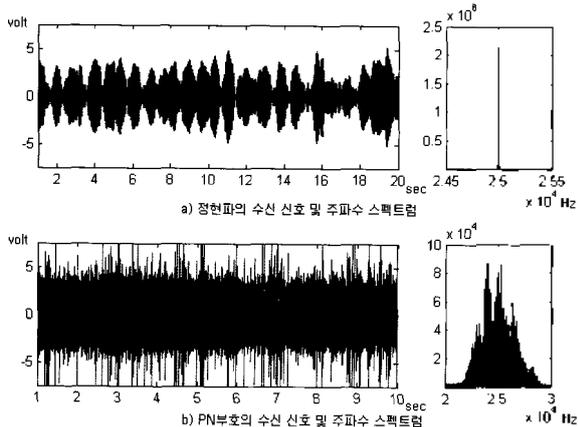


그림 3. 측정 실험에서의 수신 신호 및 수신 신호의 주파수 스펙트럼
Fig. 3. Reception signal and frequency spectrum of reception signal in a measurement experiment.

그림 3 (a)에서 보이는 바와 같이 같은 크기로 전송된 신호가 순시 신호전력이 다른 신호로 수신됨을 알 수 있으며, 여기서 수신된 신호의 포락선은 페이딩으로 나타난다. 본 연구에서는 수신된 신호의 순시 전력을 이용하여 수중 채널 환경에서의 페이딩을 추정하였으며, 수신 신호의 주파수 분석을 이용하여 수신 신호의 도플러 특성을 분석하였다. 그림 4에 수신 신호에서 지역평균신호 성분을 제거시킨 페이딩 성분 [5]에 대한 그래프와 이에 따른 확률 누적분포 함수가 보여진다. 또한 도플러 특성은 그림 5에 보여진다. 그림 4에서 보이는 바와 같이 수중 채널 환경에서 페이딩의 깊이는 송신기와 수신기의 거리에 의해 약간의 차이는 있었으나, 송신기와 수신기의 거리가 약 1.3Km인 경우에는 약 1%의 수신신호의 페이딩 깊이가 -13dB정도보다 커서, 수중 채널 환경에서 수신신호는 페이딩의 영향이 크음을 알 수 있었다. 또한, 그림 5에서

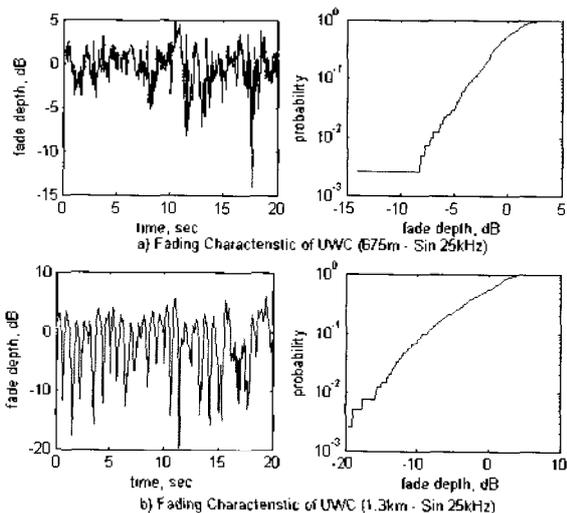


그림 4. 수신 신호의 페이딩 특성과 CDF
Fig. 4. Fading profile and CDF of reception signal.

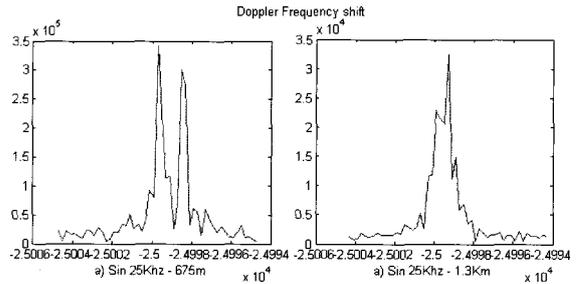


그림 5. 도플러 편이 특성
Fig. 5. Doppler shift profile.

보이는 바와 같이 수중채널 환경에서의 도플러 주파수는 수 Hz 로 나타났다.

또한, 본 연구에서는 PNcode를 QPSK 변조하여 전송하고, 이를 8개의 센서로 구성된 선형 배열 센서로 수신한 데이터를 이용하여 시간지연 및 도달 각도, 수신 전력 등의 다중경로 특성에 대하여 분석하였다. 그리고 다중경로의 시간지연 및 도달각 특성을 분석하기 위하여 수신단의 배열 센서에서 수신한 신호를 일정 각도씩 변화시키면서 빔 형성을 수행한 후에, 해당 방향에 대한 신호를 전송한 PNcode를 갖는 matched filter를 통과시킨 후의 신호 전력을 추정하였다. 분석 결과가 그림 6에 보여진다. 그림 6의 a)와 b)에서 보이는 바와 같이 수신된 신호는 크게 같은 방향에서 시간 지연이 서로 다른 세 개의 다중경로 그룹으로 수신되었다.

그림에서 보이는 바와 같이 일반적으로 수심이 깊은 수중에서 신호는 직접파, 바닥 반사파 및 수면 반사파 등 서로 다른 세 방향으로 수신되는데, 본 측정에서는 송신기와 수신기의 거리가 670m 인데 반해, 수심이 약 8m 이기 때문에 비슷한 0도 방향에서 시간 지연 만이 다른 다중경로로 수신된 것으로 판단된다.

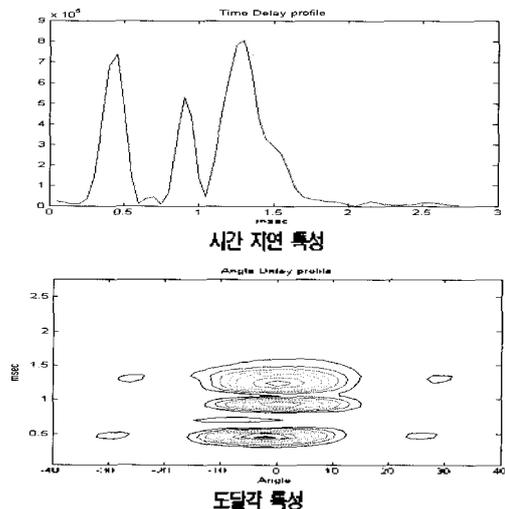


그림 6. 다중경로에 의한 시간지연 및 도달각 특성
Fig. 6. Time delay and DOA profile by multipath.

III. 수중 벡터채널 모델링

우리는 수중 환경에서의 측정과 측정 데이터 분석을 통해 한 채널에 대한 특성을 분석하였으며, 이를 이용하여 $M \times N$ MIMO 채널을 생성하였다. 또한 벡터 채널 모델링으로는 그림 7의 구조를 갖는 METRA [6] 방식을 사용하였다.

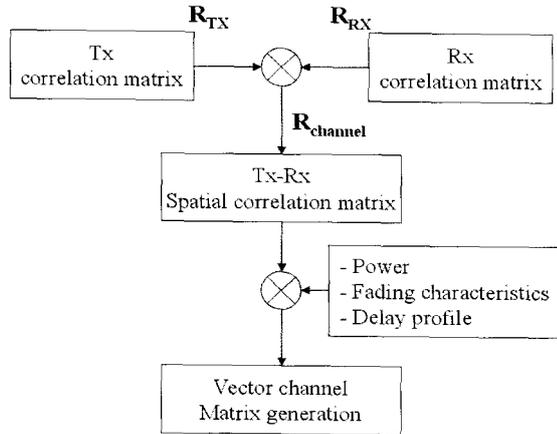


그림 7. 수중 벡터채널 모델링 구조도
Fig. 7. Structure of underwater vector channel modeling.

그림 7의 구조에서는 페이딩 특성, 도플러 특성, 시간 지연, 도달 각도, 수신 신호 세기 등을 고려하여 FIR구조로 형성된 하나의 경로에 대한 채널특성을 데이터를 송수신 배열 센서의 개수 및 간격에 따른 센서간의 상관도를 이용하여 구한 송·수신단의 공분산 행렬과 곱하여 MIMO 벡터 채널을 모델링 하였으며, 센서 간의 상관도는 METRA 모델 [6]을 사용하였다. 본 논문에서는 그림 7의 구조에 필요한 파라미터 값을 모두 측정데이터를 분석하여 추정한 값을 사용하였기 때문에 실제와 유사한 채

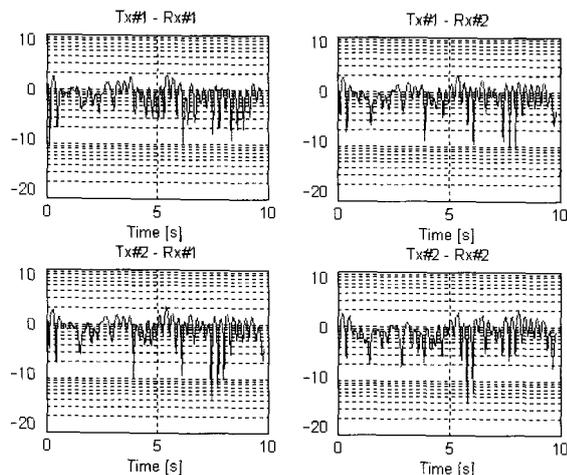


그림 8. Tx(2)xRx(2) 경우의 채널 데이터
Fig. 8. Cannel data of Tx(2)xRx(2) case.

널을 형성 할 수 있는 특징을 가지고 있다 [7]. 물론 중심 주파수, 대역폭, 표본화율 등의 기본 변수도 적용시켰다.

따라서 송신 단에 두 개의 센서를 사용하고, 수신 단에 두 개의 센서를 사용하였을 때, 본 연구에서 분석한 채널 특성 데이터와 그림 7의 구조를 이용하여 생성한 네 개의 수중 MIMO 채널이 그림 8에 보여 진다.

IV. 수중 MIMO 시스템

본 논문에서는 III장에서 설명된 수중 벡터 채널 모델링을 이용하여 수중 환경에서의 MIMO기법의 사용에 의한 성능 검증을 수행하였다.

MIMO 기법은 송신하고자 하는 신호를 시·공간 블록 코딩을 수행한 후에 복수개의 센서를 이용하여 전송하고, 복수개의 센서를 이용하여 송신한 신호를 수신하며, 수신된 신호는 추정된 채널 파라미터를 이용하여 복조된다. 이때 송신된 신호가 서로 독립적인 페이딩 환경으로 수신된다면 통신 시스템의 성능 및 용량은 사용된 센서의 수에 비례하여 증가한다.

그림 9에 수중 MIMO 시스템의 블록도가 보여진다.

그림 9에서 보이는 바와 같이 MIMO 시스템에서는 전송신호에 대한 시·공간 블록 코딩을 수행한 후에 복수개의 송신 센서를 이용하여 신호를 전송한다.

본 논문에서는 STBC (Space-Time Block Coding)기법을 사용한 MIMO 방식에 대하여 연구하였다. STBC 기법

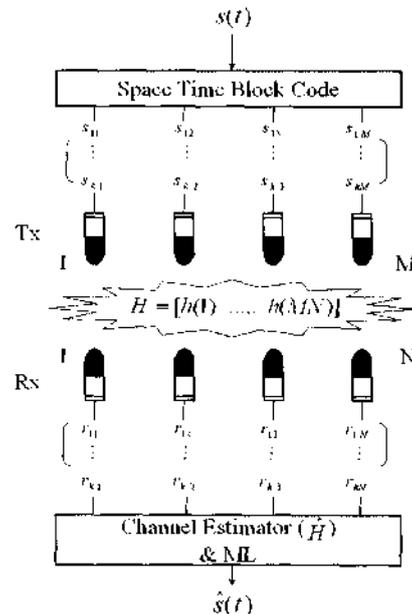


그림 9. M x N 수중 MIMO 시스템의 구조도
Fig. 9. Structure of M x N underwater MIMO system.

은 Alamouti에 의하여 처음 제안되었고 Tarokh에 의하여 2개 이상의 입출력을 갖는 시스템으로 발전한 기법으로, 전송할 심볼 S를 송신 센서의 개수와 블록 전송시간에 따른 부호화 행렬에 맞추어 재배열하는 시공간 블록 부호화를 수행하여 전송하는 방식이다 [8-10]. 즉, 그림 9에서 보이는 바와 같이 M개의 데이터를 시·공간 블록 부호화를 거쳐 k 심볼 동안 M개의 센서를 이용하여 전송한다. 여기서 M/k 은 단위 심볼 시간 (T) 동안 전송되는 데이터 심볼의 수 R로 정의 된다. 즉, $R=3/4$ 은 3개 심볼을 4T 동안에 전송하는 것을 말한다.

또한 부호화된 전송 신호는 수중 채널을 통과하여 수신 센서에 수신되며, 전송한 센서의 수가 M이고 수신한 센서의 수가 N일 때 신호는 MN 개의 서로 다른 채널 환경을 통하여 식 (1)과 (2)에서 보이는 바와 같이 서로 다른 진폭 및 시간지연으로 수신단에 수신 된다.

$$H(\tau) = \sum_{l=1}^L A_l \delta(\tau - \tau_l) \tag{1}$$

$$A_l = \begin{bmatrix} \alpha_{11}^{(l)} & \alpha_{12}^{(l)} & \Lambda & \alpha_{1N}^{(l)} \\ \alpha_{21}^{(l)} & \alpha_{22}^{(l)} & \Lambda & \alpha_{2N}^{(l)} \\ \mathbf{M} & \mathbf{M} & & \mathbf{M} \\ \alpha_{M1}^{(l)} & \alpha_{M2}^{(l)} & \Lambda & \alpha_{MN}^{(l)} \end{bmatrix} \tag{2}$$

여기서 L은 각 채널에서의 다중경로의 수이다.

본 논문에서는 식 (1)과 식 (2)에서 보이는 수중 채널을 그림 7의 수중 벡터 채널 모델링 기법을 이용하여 생성하였으며, 그림 7에서의 채널 파라미터는 측정된 파라미터를 사용하였다.

V. 성능 검증을 위한 모의실험

수중 벡터채널 모델링을 통하여 생성한 데이터를 본 논문에서 설계한 수중 MIMO 기법의 성능 검증을 위한 모의 실험에 이용하였다. 모의 실험은 여러 가지 경우의 입출력 센서 개수에 대하여 수행하였다. 또한, 변조 방식은 QPSK 방식을 사용하였으며, 채널은 정확하게 추정할 수 있다고 가정하였다. 모의 실험의 결과가 그림 10~11에 보여진다.

그림 10에서 보이는 바와 같이 센서의 개수가 증가함에 따라 같은 SNR에서 수신신호의 비트 에러율이 감소함을 알 수 있었으며, 예를 들어 SNR 5dB에 대하여 하나의 센

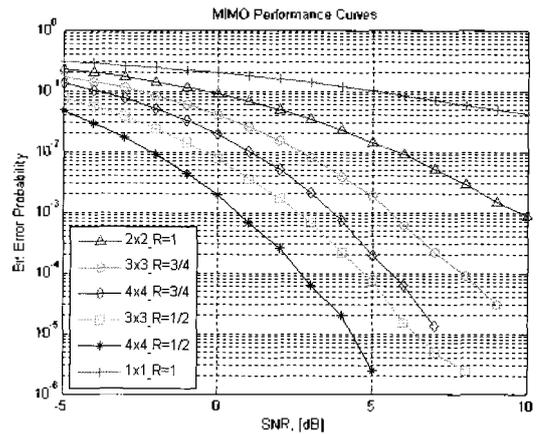


그림 10. 센서의 개수에 따른 비트 에러율
Fig. 10. Bit error rate by number of sensor.

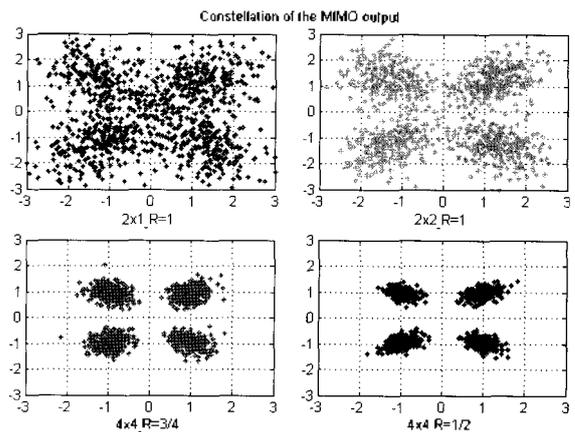


그림 11. 모의 실험 결과에 대한 constellation 그래프
Fig. 11. Constellation graph about simulation result.

서를 이용하여 신호를 전송할 때의 비트 에러율은 약 10^{-1} 에서 4×4 ($R=1/2$) MIMO를 사용하는 경우에는 약 10^{-6} 으로 향상됨을 알 수 있다.

VI. 결론

본 논문에서는 페이딩과 도플러 효과를 동반한 시간에 따라서 매우 빠르게 변화하는 다중 경로 채널 특성을 가지는 수중 채널에서 대역폭의 증가 없이 송수신 센서 개수의 증가만으로 데이터 전송율을 증가시키고 다중 경로 페이딩의 영향을 최소화시키기 위한 수중 MIMO 시스템의 성능 검증을 위한 수중채널 모델링을 수행하였다. 수중채널 모델링을 위하여 본 연구에서는 실제의 바다 환경에서 측정을 통하여 얻은 실측데이터 분석을 통하여 실제 수중채널환경과 유사한 채널을 모델링 수행 하였으며, 제안된 벡터 채널 모델을 이용하여 수중 채널 환경에서 MIMO 시스템의 성능 검증을 위한 모의 실험을 수행하였

다. 또한, 모의 실험 결과 수중에서 MIMO를 사용하는 경우 비트 에러율이 크게 감소되어 시스템의 성능이 향상됨을 알 수 있었다.

향후 연구에서는 본 논문에서 제안한 수중 MIMO 시스템을 구축하고, 실제 수중에서 데이터를 전송하여 그 성능을 분석할 계획이다.

참고 문헌

1. D. Kilfoyle and A. Baggeroer, "The state of the art in underwater acoustic telemetry," IEEE J. of Oceanic Eng., 25, 4-27, Jan. 2000.
2. M. Stojanovic, J. Catipovic, and J. Proakis, "Phase coherent digital communications for underwater acoustic channels," IEEE J. Oceanic Eng., 19, 100-111, Jan. 1994.
3. 박종원, 고택림, 이덕환, 최영철, 김시문, 김승근, 임용곤, "QPSK 방식을 이용한 수중영상 정보전송 시스템의 DSP 구현 및 실험적 실험 연구", 한국음향학회지, 23 (2), 117-124, Jan. 2004
4. 김민혁, 정진희, 최석순, 배중태, 정지원, "전송량 향상을 위한 MIMO 수중 통신용 S/W 모델", 한국마린엔지니어링학회 2006년도 후기학술대회 논문집, 195~196, 2006. 11
5. W. Y. C. Lee, "Estimate of Local Average Power of a Mobile Radio Signal," IEEE Trans. on Vehicle Technol., 34, 22-27, Feb. 1985.
6. METRA, <http://www.ist-metra.org>.
7. J.P Kermoal, L Schumacher, K.I Pedersen, "A Stochastic MIMO Radio Channel Model With Experimental Validation", IEEE Journal on Selected areas in comm., 20 (6), Aug 2002.
8. S. Alamouti, "A simple transmit diversity technique for wireless communications," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 16 (8), 1451-1458, Oct.1998.
9. V. Tarokh, H. Jafarchani, and A. R. Calderbank, "Space-time block codes from orthogonal design," IEEE Trans. Inf. Theory, 45 (5), 1456-1467, Jul. 1999.
10. V. Tarokh, H. Jafarchani, and A. R. Calderbank, "Space-time block coding for Wireless Communications : Performance Results," IEEE Journal on Selected Areas in Communications, 17 (3), 451-460, Mar. 1999.

저자 약력

• 이 덕 환 (Deok-Hwan Lee)



2001년 2월: 호서대학교 전자공학과 (공학사)
 2003년 2월: 호서대학교 정보통신공학과 (공학석사)
 2003년 3월~현재: 호서대학교 정보통신공학과 (박사과정)
 2003년 3월~현재: 한국해양연구원 해양시스템 안전연구소 연수실습생.
 * 주관심분야: 수중음향통신, 배열 신호처리, 디지털 신호처리

• 고택림 (Hak-Lim KO)



1983년 2월: 숭실대학교 전자공학과 (공학사)
 1986년 8월: Fairleigh Dickson Univ. Electrical Eng. (공학석사)
 1995년 8월: North Carolina State Univ. Electrical & Computer Eng. (공학박사)
 1996년 3월~현재: 호서대학교 전기정보통신공학부 부교수.
 * 주관심분야: 수중음향통신, 배열 신호처리, 스마트 안테나 시스템

• 임 용 곤 (Yong-Kon Lim)



1979년 2월: 충남대학교 전기공학과 (공학사)
 1984년 2월: 충남대학교 전력전자공학 (공학석사)
 1994년 2월: 아주대학교 통신 및 신호처리 (공학박사)
 1980년 7월~현재: 한국해양연구원 해양시스템 안전연구소 책임연구원.
 * 주관심분야: 수중음향 신호처리 및 통신 시스템, 수중 로봇, 해양 장비개발