

논문 2016-53-8-17

수중음향 MIMO 채널에서 VBLAST 검파방식의 성능분석

(BER Performance Analysis of VBLAST Detection over an Underwater Acoustic MIMO Channel)

강 희 훈*

(Heehoon Kang[Ⓢ])

요 약

수중음파통신은 지상과는 다른 환경적 문제에 의해 고속 데이터 전송률을 얻기 위해서는 여러 가지 어려움이 있다. 고속 데이터 전송을 위해서 다중안테나 전송방식에 대해서 많은 연구가 진행되고 있다. V-BLAST 알고리즘은 무선통신에서 다중안테나 전송방식에 적용되고 검파방식이다. 본 논문에서는 수중음파채널에 대해서 여 MIMO 시스템의 VBLAST 검파 방식에 대해서 성능을 분석한다.

Abstract

For obtaining high speed data rate, underwater acoustic communication has several problems by the different environmental problem. To achieve high speed data rate, a method of multiple antennas have been researched. V-BLAST Algorithm is a detection method applied to terrestrial wireless communications. In this paper, BER performance of VBLAST detection for MIMO system is analyzed in the paper.

Keywords : MIMO(Multi Input Multi Output), VBLAST(Vertical-Bell Laboratories Layered Space-Time) , UWAC(UnderWater Acoustic Channel), ML(maximum likelihood), ZF(zero-forcing), MMSE(Minimum mean-square error estimation)

I. 서 론

고속데이터 전송을 위한 무선통신 분야에서 광대역 전송은 매우 다양하게 연구되고 구현되어 왔다.^[1] 다중안테나(MIMO: Multi Input Multi Output) 시스템은 단일안테나 시스템에 비해서 전송용량을 크게 높일 수 있다. 동일한 주파수 자원을 사용하는 경우 MIMO 시스템은 공간 다중화를 통해서 시스템 용량을 개선한다. MIMO 시스템은 다중경로와 다중경로에 의한 페이딩이

나 지연확산 등에 좋은 성능을 나타낸다.^[2] 그러나 MIMO 시스템은 송수신단에서 다수의 안테나를 사용하여 안테나 간 간섭 등이 발생한다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 수신된 신호에 영향을 미치는 간섭을 제거하기 위해서 많은 알고리즘을 연구되고 있다. 최근 수중통신에서 수중음향채널에 대한 연구와 더불어 전송용량을 높이기 위해서 단일반송파를 사용하는 고밀도변조방식과 다중반송파를 사용하는 기술들이 연구되고 있다.^[3] 다중입력-다중출력(Multi Input Multi Output : MIMO) 시스템은 공간 다이버시티 이득을 얻을 수 있으며 공간 다이버시티에 대한 연구는 채널상태 정보의 유무에 따라 다양한 형태로 진행되어 왔다.^[4] 또한 대용량 멀티미디어 데이터를 전송하기 위해서 직교주파수분할다중화(OFDM)와 같은 기술들이 연구되고 있다.^[5]

* 정회원, 여주대학교 (Yeoju Institute of Tech.)

Ⓢ Corresponding Author (E-mail : khh@yit.ac.kr)

II. 수중 MIMO 시스템

3.1 시스템 블록도

그림 1은 본 논문에서 성능을 분석하기 위한 MIMO 시스템의 블록도를 나타낸다.

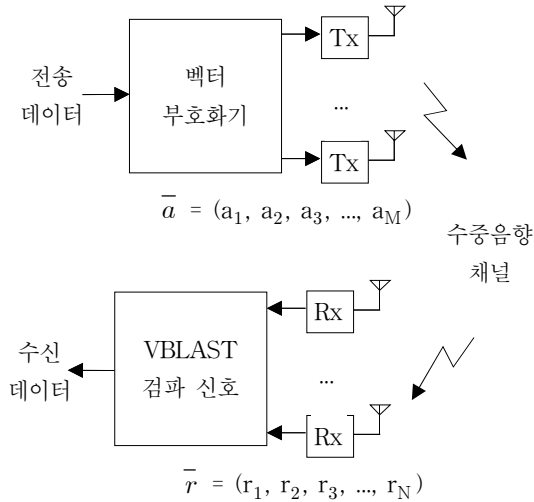


그림 1. 수중음향채널에서 MIMO 시스템
Fig. 1. A MIMO system under an underwater acoustic channel.

그림 1의 시스템 모델에서 수신 데이터는 식(1)과 같다.

$$Y = HX+n, \quad 0 \leq n \leq N-1 \quad (1)$$

여기서 $Y=[y_1, y_2, y_3, \dots, y_N]$ 은 수신된 심볼, $X=[x_1, x_2, x_3, \dots, x_M]$ 은 송신 심볼, $n = [n_1, n_2, n_3, \dots, n_N]$ 은 수중음파채널의 부가잡음이다. H 은 MIMO 채널 모델로 수신단에서 추정된다. 채널추정은 식(2)와 같다.

$$H = H^+ \Delta H \quad (2)$$

여기서 ΔH 는 채널추정오류를 나타낸다. 이는 ML (maximum likelihood) 채널 추정방법에 대해서 차원당 0평균과 분산 $\sigma^2 \Delta h/2$ 의 복수가우시언 랜덤변수이다.

3.2 VBLAST 검파

VBLAST(Vertical-Bell Laboratories Layered Space-Time) 기술은 간섭억제, 간섭제거 그리고 최적 순서화로 구성된다. 간섭억제 과정은 수신신호를 간섭하는 신호에 의해서 확장된 Null 부공간에 사상시켜 수행한다. 이 과정은 선형적으로 독립적인 벡터 집합을 직교벡터 집합으로 변환하는 Gramm-Schmidt 직교화 절차를 사

용하여 수행한다. 그 다음 심볼들이 검파된다. 간섭제거 과정은 수신된 신호에서 검파된 심볼을 추출하는 과정이다. 최적화는 검파된 심볼을 SNR이 가장 높은 신호가 되도록 보장한다. VBLAST 알고리즘으로 간섭억제와 간섭제거 과정인 선형과 비선형 알고리즘을 통합할 수 있다. VBLAST 알고리즘은 심볼 검파 동안 오류가 전달되고 간섭억제 과정을 수행하기 위해서는 수신안테나가 송신안테나보다 많아야 한다. VBLAST 검파 과정은 다음과 같다.

초기화 과정:

- ① $i = 1$ 에서 $r_1 = r$
- ② 간섭억제 벡터 후보 집합을 산출 : $G_1 = (H^+)^T$
- ③ 첫 번째 심볼을 검파하기 위한 부원소 결정 :
 $k_1 = \arg \min \| (G_1)_j \| : \text{배열화}$

반복 과정:

- ① k_j 번째 억제 벡터는 G 의 k_j 번째 열이다 : $w_{k_j} = (G_1)_{k_j}$
- ② k_j 번째 판정을 위한 확률통계를 계산 : $y_{k_j} = (w_{k_j}^T) r_1$
- ③ a 의 k_j 번째 구성요소 추정 : $\hat{a}_{k_j} = Q(y_{k_j})$
- ④ 검출된 요소를 제거한다. $r_{i+1} = r_1 - \hat{a}_{k_j} (H)_{k_j}$
- ⑤ 축소된 시스템에 대한 억제 벡터를 추천 : $G_{i+1} = (H_{k_j}^+)^T$
- ⑥ 다음 심볼 검파를 위한 부원소를 결정 :

$$k_{i+1} = \arg \min_{j \notin (k_1, \dots, k_j)} \| (G_{i+1})_j \| : \text{배열화}$$

여기서 G 는 가중치 벡터, r 은 추정이전 수신된 벡터, H^+ 는 채널행렬의 의사역행렬이고, q 는 판정과정이며 i 는 증가색인이다. ZF와 MMSE에 대한 가중치 벡터는 식(11)과 식(12)와 같다.

$$G_{ZF} = H^+ = (H^H H)^{-1} H^H \quad (11)$$

$$G_{MMSE} = H^+ = (H^H H + \rho I) H^H \quad (12)$$

여기서 I 는 단위 행렬이고 ρ 는 SNR이다.

선형 알고리즘으로 ZF와 MMSE가 구현이 간단하지만 고속전송이 높은 SNR에 가능하다. ML(maximum likelihood) 검파는 식(13)과 같다.

$$G = \min |y - Hx| \quad (13)$$

ML은 오류를 최소화하는데 최적화된 기법이다. ZF

와 MMSE 보다 성능이 우수하지만 구현이 복잡하다. 구현의 복잡도는 $|A|^M$ 이며 M은 송신기 수이며 A는 변조시 신호격자점의 수이다.

III. 수중음파 채널

수중 환경에서 음파 신호는 수심, 수온, 전송거리, 풍속에 의한 해수면의 변화, 해저면 매질의 상태 등으로 인해 다양하고 복잡한 특성을 가진다.^[6~7]

3.1 전송손실

음파의 세기는 기하학적 확산과 흡수 매커니즘에 의해서 수중을 전파하는 동안 감쇠된다.^[6]

$$TL(f) = 20\log R + \alpha(f)R * 10^{-3} \quad (3)$$

식(3)을 1[km]의 거리에서는 대략 식(4)로 간략화된다.

$$TL(f)_{1km} \approx \alpha(f) * 10^{-3} \quad (4)$$

감쇠상수 α 는 식(5)와 같다.^[6~7]

$$\alpha(f) = 0.01 \frac{f^2}{1+f^2} + 44 \frac{f^2}{4100+f^2} + 2.75 * 10^{-4} f^2 + 0.003 \quad (5)$$

3.2 음파의 속도

8000[m] 이하의 해양에서 음파의 속도는 식(6)과 같다.^[6~7]

$$c = 1448.9 + 4.591T - 0.05304T^2 + 0.0002374T^3 + 1.340(S-35) + 0.0163z + 1.674 * 10^{-7} z^2 - 0.01025T(S-35) - 7.139 * 10^{-13} Tz^3 \quad (6)$$

여기서 T는 수온이며 단위는 섭씨로 표현하며 S는 염도로 [mg/l]이고 z는 해양의 깊이이다.

3.3 수중환경잡음

수중환경잡음(AMBIENT NOISE)은 간섭의 영향을 주는 요소들을 말한다. 난류(turbulence), 선박이동(shipping), 파도(waves), 열잡음(thermal noise) 등을 대표적인 간섭요소로 정의하고 있다.^[6~7]

3.3.1 난류잡음

난류잡음은 식(7)과 같다.^[6~7]

$$10\log N_t(f) = 17 - 30\log(f) \quad (7)$$

여기서 f는 송신음파신호이며 단위는 주파수[kHz]이다. 난류잡음 스펙트럼 밀도의 단위는 dB re uPa/Hz이다.

3.3.2 선박이동잡음

선박이동잡음은 식(7)과 같다.^[6~7]

$$10\log N_s(f) = 40 + 20(s - 0.5) + 26\log f - 60\log(f + 0.03) \quad (7)$$

대부분 10[Hz]~100[Hz]에 분포되어 있다.

3.3.3 파도잡음

파도잡음은 식(8)과 같다.^[6~7]

$$10\log N_w(f) = 50 + 7.5\sqrt{w} + 20\log f - 40\log(f + 0.4) \quad (8)$$

여기서 w는 해수면 풍속 [m/s]이며 대부분 10[Hz]~100[kHz]에 분포되어 있다.

3.3.4 열잡음

열잡음은 바람과 파도에 의해서 발생하는 잡음 주파수보다 높은 $f > 100$ [kHz]에 발생한다.^[6~7]

$$10\log N_{th}(f) = -15 + 20\log f \quad (9)$$

3.5 도플러 효과

각 주파수에 따른 풍속에 대한 도플러 확산은 식(10)과 같다.^[6~7]

$$f_D = (0.0175/c) f w^3 / 2 \cos\theta \quad (10)$$

식(10)에서 c는 음속으로 염분, 수온, 압력 등의 영향을 받지만 일반적으로 1500[m/s]이며, w는 해면 풍속, θ 는 지표각(grazing angle)을 나타낸다. 일반적으로 음속 1500[m/s]는 T=15[°C], S=32[‰], p=10[m] 이내의 환경이다.

그림2와 그림3은 송수신기간 거리 50[m]와 1000[m]에 다중경로 음파신호의 전파 형태를 나타낸다. 이 다중경로 신호의 전파는 수중음파의 전파 특성을 파악하기 위한 시뮬레이션 결과이다.

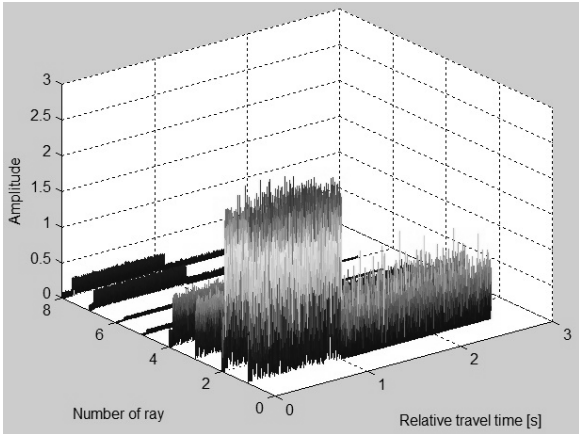


그림 2. 송수신기간 거리 50[m]에서 다중경로신호 전파
Fig. 2. Multipath Signal Propagation for Distance 50[m] between Tx and Rx.

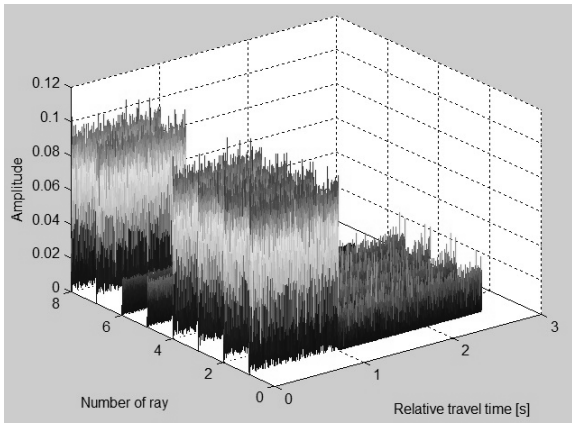


그림 3. 송수신기간 거리 50[m]에서 다중경로신호 전파
Fig. 3. Multipath Signal Propagation for Distance 1000[m] between Tx and Rx.

IV. 가상실험 결과

가상실험을 위한 조건은 표 1에 나타낸다. 가상실험은 매트랩 2014a버전을 이용하여 수행하였다.

파라미터 명	환경
해풍의 속도	2[m/s]
송수신기간 거리	100~2000[m]
음속	1500[m/s]
송수신기의 깊이	50[m]
염도	S=33[‰]
수온	T=15[°C]
pH 값	pH=10[m]
반송파주파수	25[KHz]

표 1. 가상실험을 위한 조건
Table1. Parameters for Simulation.

다중경로 전파특성을 기반으로 100[m]~2000[m]의 다중경로 환경에 대해서 BPSK(Binary Phase Shift Keying) 파일럿 심볼을 이용하여 추정된 수중의 음파채널에 대해서 MIMO 시스템에 대한 ZF, MMSE, ML 검파방식에 대한 가상실험 결과를 나타낸다. 송신기와 수신기 사이의 거리에 따라서 BER 성능을 분석하였다.

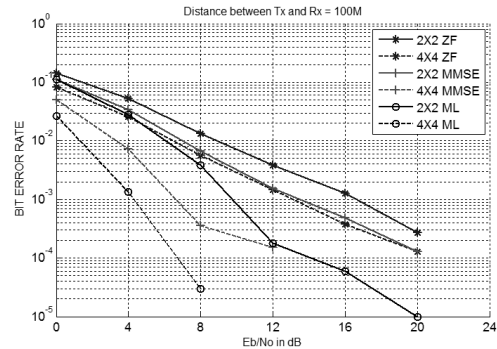


그림 4. 송수신기간 거리 100[m], 2X2와 4X4의 BER 성능
Fig. 4. BER Performance of 2X2 and 4X4 MIMO for Distance 100[m] between Tx and Rx.

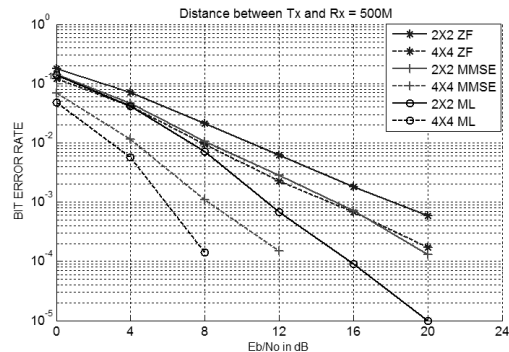


그림 5. 송수신기간 거리 500[m], 2X2와 4X4의 BER 성능
Fig. 5. BER Performance of 2X2 and 4X4 MIMO for Distance 500[m] between Tx and Rx.

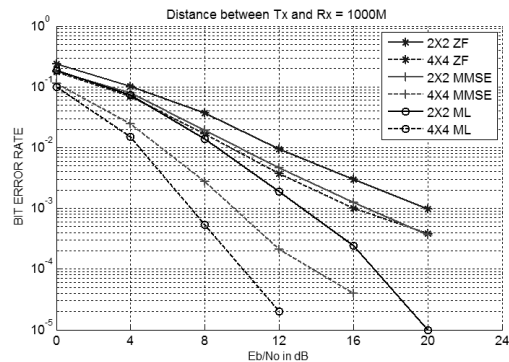


그림 6. 송수신기간 거리 1000[m], 2X2와 4X4의 BER 성능
Fig. 6. BER Performance of 2X2 and 4X4 MIMO for Distance 1000[m] between Tx and Rx.

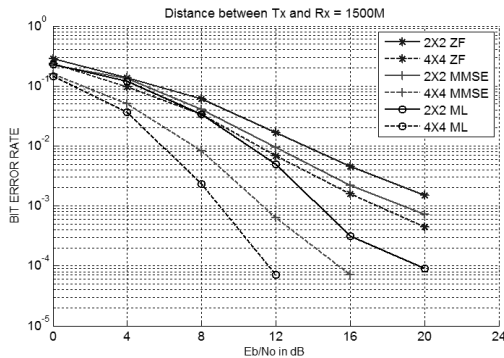


그림 7. 송수신기간 거리 1500[m], 2X2와 4X4의 BER 성능
Fig. 7. BER Performance of 2X2 and 4X4 MIMO for Distance 1500[m] between Tx and Rx

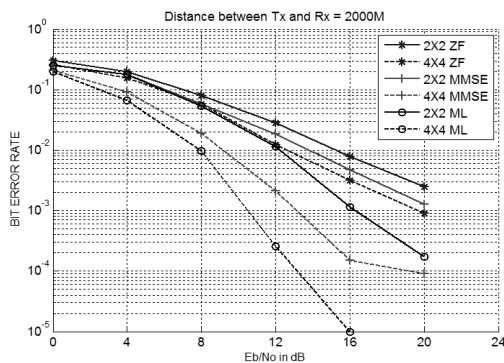


그림 8. 송수신기간 거리 2000[m], 2X2와 4X4의 BER 성능
Fig. 8. BER Performance of 2X2 and 4X4 MIMO for Distance 2000[m] between Tx and Rx.

송수신기간 거리가 증가함에 따라 각 검파방식에 대해서 BER 성능이 악화된다. 세 가지 검파방식 중 ML 방식이 성능이 가장 우수함을 나타내었다. 2000[m]에 대해서 송수신기의 수가 각각 2개인 2X2 MIMO 시스템의 경우, ML 방식은 동일한 BER을 기준으로 비교하면 대략 4[dB] 정도의 전력이득이 우수함을 보였다. 동일한 ML 방식의 경우, 송수신기의 개수가 2X2와 4X4의 경우, 10^{-3} BER 성능을 기준으로 4X4 MIMO 시스템이 대략 6[dB]의 전력이득이 좋음을 보였다. 그 이유는 4X4 MIMO 시스템의 경우, 송신단의 송신 다이버시티와 수신단의 수신 다이버시티 이득이 발생하였기 때문이다.

V. 결 론

이론적인 수중음향채널을 적용하여 BPSK(Binary Phase Shift Keying) 파일럿 심볼을 이용하여 채널을 추정하고 MIMO 시스템에 대한 적용 가능성을 확인하

였다. SNR 값에 따른 심볼의 검파 정확성을 나타내는 BER 성능은 ML 방식이 가장 좋음을 알 수 있었다. 향후 연구는 전송 방식으로는 MIMO-OFDM과 검파방식의 복잡도를 줄일 수 있는 방안이 연구되어야 한다.

REFERENCES

- [1] S.M.Alamouti, "A simple transmit diversity technique for wireless communications", IEEE Journal on selected areas in communication. vol.16 ,no.8, Oct 1998.
- [2] P.W. Wolniansky, G. J. Foschini, G. D. Golden, and R. A. Valenzuela, "V-BLAST: An Architecture for Realizing Very high Data Rates Over the Rich-Scattering Wireless Channel", IEEE International Symposium on Signals, Systems, and Electronics, pp. 295-300, Sep. 1998.
- [3] P.W. Wolniansky, G. J. Foschini, G. D. Golden, and R. A. Valenzuela, "V-BLAST: An Architecture for Realizing Very high Data Rates Over the Rich-Scattering Wireless Channel", IEEE International Symposium on Signals, Systems, and Electronics, pp. 295-300, Sep. 1998.
- [4] Kim Taehoon, Kwon Haechan, Baek Changuk, Jung Jiwon, "A study of MIMO communication method in underwater channel", KICIS Conference, 2014, 2014.6, 922-923.
- [5] Han Jungwo, Kim Seyoung, Kim Kiman, "A Study on OFDM Technique for High-speed Data Transmission in Underwater", International journal of maritime information and communication sciences, Vol.12, 2008.10, 1780-1786.
- [6] H.G. Urban, Handbook of Underwater Acoustic Engineering (STN Atlas Elektronik GmbH, Bremen, 2002).
- [7] H. Medwin and C.S. Clay, Fundamentals of Acoustical Oceanography (Academic Press, San Diego, 1998).

저 자 소 개



강 희 훈(정회원)

1997년 서울과학기술대학교 전기 공학과 학사 졸업.

1999년 광운대학교 전자공학과 석사 졸업.

2003년 광운대학교 전자공학과 박사 졸업.

<주관심분야: 통신, IoT, 통신로봇>