

논문 2012-49-12-1

고지향 소나 시스템 통신 성능분석

(Analysis of Highly Directional Sonar Communication System)

이 재 일*, 이 중 현**, 이 승 욱***, 신 정 채***, 정 진 우***

(Jaeil Lee, Chong Hyun Lee, Seung Wook Lee, Jungchae Shin, and Jin Woo Jung)

요 약

본 논문에서는 파라메트릭 배열 기반 소나 통신 성능을 분석하였다. 분석을 위하여 음향학적 설계요소를 고려한 최적의 차 주파수 발생조건을 구하고 비선형성이 고려된 소나 방정식을 이용하여 차 주파수의 SNR을 추정하였다. 추정된 차 주파수의 SNR을 이용하여 디지털 변조 방식에 따른 이론적인 비트오류확률과 MIMO 채널 용량을 모의실험 하였다. 1차 주파수의 평균 주파수를 560kHz, 차 주파수를 45kHz 그리고 방사 파워 28.05Watt를 가정할 때, 비트오류확률 10^{-4} 이하의 통신 거리는 1차 주파수를 사용할 경우 0.9km이고 차 주파수는 4.25km로 3.35km의 거리 이득을 얻음을 확인하였다. 또한 요구되는 채널 용량 10bps/Hz를 가정할 때 1차 주파수의 구동거리는 0.83km인 반면 주파수의 경우 SISO 통신은 3.8km 그리고 2x2 MIMO 통신은 3.98km 까지 전송 할 수 있음을 확인 하였다.

Abstract

In this paper, we present novel analysis results of sonar communication using parametric array. We consider transducer diameter, primary frequency, difference frequency and acoustic power as analysis parameters of communication performance. We calculate theoretical BER(Bit Error Rate) and channel capacity of MIMO(Multi Input and Multi Output) communication system. By considering practical parameters, we obtain optimum difference frequency generation condition. The obtained primary frequency is 560 kHz, difference frequency 45kHz and acoustic power is 28.05Watt. For BER of 10^{-4} , the range gain of parametric array communication is 3.35km compared to primary frequency communication. For channel capacity of 10bps/Hz, the SISO and 2x2 MIMO communication range of parametric array communication are 3.8km and 3.98km respectively, while primary frequency communication range is 0.83km.

Keywords : 고지향성 소나, 파라메트릭 배열, 수중통신, 비트오류확률, 채널용량

I. 서 론

수중에서의 지형 조사 및 통신에서는 감쇠가 적은 음

파가 널리 사용되어 왔다. 수중에서의 전달 손실(TL: Transmission Loss)은 주파수의 제곱에 비례하여 저주파일수록 장거리 까지 구동이 가능하다. 그러나 저주파 신호를 효율적으로 방사하기 위해서는 주파수에 반비례하는 큰 방사면적이 요구된다. 또한 저주파 신호일수록 주파수 대역폭이 좁고 빔폭이 넓은 단점이 있다. 이러한 한계를 극복하기 위해서 비선형 현상중 하나인 파라메트릭 배열 현상을 이용한 통신 시스템이 제안되었다^[1]. 파라메트릭 배열 기술은 Westervelt에 의해 개념적인 도입^[2]이 후 Berktag; Moffett 그리고 Mellen 등에 의해 이론적인 연구가 진행 되어 왔으며^[3~4], Bennett의 공기중 파라메트릭 배열 음향실험^[6] 이후 고 지향성 특

* 정회원, ** 정회원, 제주대학교 해양시스템공학과
(Dept. of Ocean System Engineering, Jeju Nat'l University)

*** 정회원, (주) 한화
(Hanwha co., Gumi)

※ 본 연구는 2011년 (주)한화의 지원으로 수행한 위탁 과제 "파라메트릭 배열기반 고지향 디지털 통신 시스템 개발"의 결과이며, 이에 대해 깊이 감사를 드립니다.

접수일자: 2012년5월30일, 수정완료일: 2012년11월17일

성을 갖는 지향성 스피커 등에 응용 연구되어 왔다. 또한 Coates는 50kHz의 파라메트릭 배열 신호를 DPSK(Difference Phase Shift Keying) 변조하여 수중통신 연구를 수행 하였다^[1]. 국내에서는 공기중에서 파라메트릭 배열 신호를 On-Off Keying 변조한 통신 시스템 연구결과가 발표되었다^[5].

본 논문에서는 비선형성이 고려된 소나 방정식을 이용한 수중통신 성능분석 결과를 소개한다. 수중통신 성능 분석은 음향학적 설계요소를 고려한 최적의 차 주파수 발생 조건을 모의실험 한 후 차 주파수의 SNR (Signal to Noise Ratio)을 이용하여 ASK(Amplitude Shift Keying)와 FSK(Frequency Shift Keying), PSK (Phase Shift Keying) 그리고 DPSK(Differential PSK) 변조 방식에 따른 이론적인 비트오류확률과 MIMO (Multi Input and Multi Output) 채널용량을 모의실험 하였다.

II. 배경 이론

1. 파라메트릭 배열 신호의 SNR

Prederson은 1차 주파수 음압레벨을 충격파(Shock wave)가 발생되지 않는 포화(Saturation) 한계로 가정 한 후 비선형 계수(Nonlinearity coefficient), 회절거리 (Rayleigh distance) 그리고 차 주파수에 의한 흡음계수(Absorption coefficient)를 고려한 차 주파수의 소스 레벨(SL: Source Level)을 계산하였다^[7]. Kopp는 파라메트릭 배열 통신 시스템 설계를 위한 입력 파워의 한계, 차 주파수 생성에 영향을 미치는 음향학적 설계 변수와 차 주파수의 소스레벨을 계산한 후 SONAR 방정식을 이용하여 SNR을 계산하였다^[8]. 특정 거리에서의 차 주파수의 SNR는 비선형성이 고려된 소스 레벨과 전달 손실, 노이즈 레벨(NL: Noise Level), 지향지수 (DI: Directive Index) 그리고 대역폭(Bandwidth)의 관계식으로 계산된다. 1차 주파수의 소스 레벨은 식(1)과 같다^[7].

$$SL_p = 10\log_{10} W_0 + 171 + 10\log_{10} (4\pi S/\lambda_p^2) \quad (1)$$

여기서, W_0 는 음향학적 방사파워, S 는 트랜스듀서 방사면적 그리고 λ_p 는 평균 1차 주파수($f_1 + f_2$)/2의 파장을 나타낸다. 계산된 1차 주파수의 소스 레벨은 트랜스듀서로부터 1m거리에서 $1\mu Pa$ 을 기준 음압으로 계

산된 dB값이다. 1차 주파수에 의한 차 주파수의 소스 레벨은 식(2)와 같다^[7].

$$SL_d = 2SL_p + 20\log_{10} (f_d) + 20\log_{10} \Delta - 287 \quad (2)$$

여기서, f_d 는 차 주파수 그리고 Δ 는 감쇠거리와 회절거리에 의한 파라메트릭 배열 현상의 효과로 식(3)과 같이 표현된다.

$$\Delta = E_1 (\alpha_T R_p \frac{f_p}{f_d}) \exp(\alpha_T R_p \frac{f_p}{f_d}) \quad (3)$$

여기서, $R_p = S/\lambda_p$ 는 평균 1차 주파수의 회절거리 그리고 $\alpha_T = \alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_d$ 는 비선형 현상에 의한 전 흡음계수(Total Absorption coefficient)이다.

차 주파수의 SNR은 식(4)와 같다.

$$SNR_{pA} = SL_d - TL_d - NL_d + DI_d - 10\log_{10} (\mu f_d) \quad (4)$$

여기서,

$$\begin{aligned} TL_d &= \alpha_T R + 20\log_{10} R + 60, & R [km] \\ NL_d &= 60 - 17\log_{10} f_d, & f [kHz] \\ DI_d &= 10\log_{10} (4\pi S/\lambda_d^2), & S = \pi(d/2)^2 [m^2] \end{aligned}$$

파라메트릭 배열의 μ 값은 0.6 ($Q=1.5$) 그리고 잡음 레벨은 Sea-state 2 상태를 가정한다^[9].

2. 디지털 통신 성능평가

파라메트릭 배열 현상을 이용한 대표적인 디지털 통신 변조방식으로는 ASK, FSK, PSK 그리고 DPSK방식이 있다. ASK변조 방식은 정보 데이터에 의하여 1차 주파수의 진폭을 결정하는 변조 방식으로 이진 파라메트릭 배열 ASK 신호는 식(5)와 같이 표현된다.

$$s(t) = \begin{cases} s_1(t) = A [\cos(w_1 t) + \cos(w_2 t)] & \text{for bit 1} \\ s_2(t) = A [\cos(w_1 t)] & \text{for bit 0} \end{cases} \quad (5)$$

여기서, w_1, w_2 는 1차 주파수로 차주파수 성분인 파라메트릭 배열 음향신호 $w_d = w_1 - w_2$ 는 전송 비트에 따라 생성과 소멸을 반복하며 전송된다.

ASK의 통신의 성능평가를 위해 수신신호의 포락선 정보만을 이용한 비동기식 복조 방식의 비트오류확률은 식(6)과 같이 계산된다^[10].

$$P_{b-ASK} = 0.5 \exp(-0.5 SNR_{PA}) \quad (6)$$

FSK 변조 방식은 정보 데이터에 의해 1차 주파수의 주파수 스펙트럼이 천이되도록 하는 전송 방식으로 이진 파라메트릭 배열 FSK 신호는 식 (7)과 같이 표현된다.

$$s(t) = \begin{cases} s_1(t) = A [\cos(w_c t) + \cos(w_1 t)] & \text{for bit 1} \\ s_2(t) = A [\cos(w_c t) + \cos(w_2 t)] & \text{for bit 0} \end{cases} \quad (7)$$

여기서, w_c 는 반송파 주파수 w_1, w_2 는 1차 주파수를 나타내고 파라메트릭 배열 신호의 주파수는 $w_{d1} = w_c - w_1, w_{d2} = w_c - w_2$ 가 된다. FSK의 비트 오류확률은 ASK와 같다.

PSK 변조 방식은 정보 데이터 비트 값에 따라 1차 주파수의 위상이 천이되도록 하는 전송 방식으로 이진 파라메트릭 배열 PSK 신호는 식(8)과 같이 표현된다.

$$s(t) = \begin{cases} s_1(t) = A [\cos(w_1 t + \theta_1) + \cos(w_2 t + \theta_1)] & \text{for bit 1} \\ s_2(t) = A [\cos(w_1 t + \theta_2) + \cos(w_2 t + \theta_2)] & \text{for bit 0} \end{cases} \quad (8)$$

여기서, θ_1, θ_2 는 데이터 비트 값에 따른 위상 천이 값이 되며 이진 데이터에서는 $\pi, -\pi$ 가 된다. PSK의 비트오류 확률은 식(9)와 같다^[10].

$$P_{b-PSK} = Q(\sqrt{2 SNR_{PA}}) \quad (9)$$

신호의 위상 변동을 이용한 DPSK 변조 방식은 현재 비트의 위상은 이전 비트의 위상과 비교하여 동작하게 된다. PSK 변조에서는 신호의 절대 위상에 정보가 실려 있는 것에 비해 DPSK 변조에서는 신호의 위상차에 정보가 실려 있다. 즉, 수신된 신호의 위상 천이를 검출하여 데이터를 복조한다. 상대적인 위상 비교와 빠른 동기화의 장점을 갖기 때문에 다중경로 환경에 적합한 변조 방식이다. DPSK의 비트오류 확률은 식(10)과 같이 표현된다^[10~11].

$$P_{b-DPSK} \cong 0.5 \exp(-SNR_{PA}) \quad (10)$$

BPSK 수신기의 성능은 ASK와 FSK 수신기 성능에 비해 3 dB의 이득과 DPSK과는 1 dB이하의 성능 차이를 보인다.

3. MIMO 채널용량

디지털 통신에서 채널의 대역폭이 B Hz로 주어진 경우 오류 없이 전송할 수 있는 최대 데이터양을 채널 용량이라 한다. SISO 채널 용량은 SNR의 함수로 나타내며 Shannon 방정식으로 주어진다. Shannon의 방정식은 통신 시스템에서 최대 데이터 전송률이 제한된다는 것을 의미하며 식(11)과 같이 통신 시스템이 얻을 수 있는 성능의 이론적 상한선을 제시한다.

$$C_{SISO} = B \log_2(1 + SNR_{PA}) [bps/Hz] \quad (11)$$

송신 트랜스듀서의 수를 N_T , 수신 트랜스듀서의 수를 N_R 이라할 때, MIMO 송수신기에 의해 구현되는 수중 채널이 미소시간 동안 일정하게 고정되었을 때 송수신 신호는 식(12)와 같다.

$$\mathbf{y} = \sqrt{\frac{E_x}{N_T}} \mathbf{H} \mathbf{x} + \mathbf{z} \quad (12)$$

여기서, \mathbf{z} 는 잡음 벡터($N_R \times 1$), \mathbf{y} 는 수신 신호 벡터($N_R \times 1$), \mathbf{H} 는 채널이득 행렬($N_R \times N_T$), \mathbf{x} 는 송신 신호 벡터($N_T \times 1$) 그리고 E_x 는 수신 신호 전력을 나타낸다. 송신 신호의 자기상관 행렬은 식(13)과 같다.

$$\mathbf{R}_{\mathbf{x}\mathbf{x}} = E[\mathbf{x}\mathbf{x}^H] \quad (13)$$

각 송신기에서 송신된 신호의 전력을 1이라고 가정할 때 $Tr(\mathbf{R}_{\mathbf{x}\mathbf{x}}) = N_T$ 가 성립한다. 송신부에서 수중 채널 정보를 사용하지 않을 때의 MIMO 채널 용량은 식(14)와 같다^[12].

$$C_{MIMO} = \max_{\mathbf{r}, \mathbf{r}_{\mathbf{x}} = \mathbf{r}_r} \log_2 \left| \mathbf{I}_{N_R} + \frac{SNR_{PA}}{N_T} \mathbf{H} \mathbf{R}_{\mathbf{x}\mathbf{x}} \mathbf{H}^H \right| [bps/Hz] \quad (14)$$

송신기에서 전송되는 신호가 동일한 전력을 갖도록 하면 송신신호의 자기상관 행렬 $\mathbf{R}_{\mathbf{x}\mathbf{x}}$ 는 \mathbf{I}_{N_T} 가 되고 채널 용량은 식(15)와 같이 표현된다.

$$C_{MIMO} = \log_2 \left| \mathbf{I}_{N_R} + \frac{SNR_{PA}}{N_T} \mathbf{H} \mathbf{H}^H \right| [bps/Hz] \quad (15)$$

III. 모의실험 결과

1. 시스템 설계변수

파라메트릭 배열을 이용한 통신 시스템 설계를 위해

서는 통신 시스템 환경에 따른 최적의 차 주파수를 선정해야 한다. 파라메트릭 배열 현상은 1차 주파수, 트랜스듀서의 방사면적($S=\pi(d/2)^2$) 그리고 트랜스듀서 출력 파워에 따라서 최적의 차 주파수 특성이 결정된다^[8]. 파라메트릭 배열 통신 시스템의 구동 거리가 결정되었을 때 음향학적 설계 요소는 1차 주파수, 차 주파수, 트랜스듀서 방사 면적 그리고 방사 파워이다. 트랜스듀서 방사면적은 음향학적으로 클수록 높은 음압과 방향성을 확보할 수 있다. 따라서 트랜스듀서 방사면적은 물리적인 제약 안에서 최대 크기로 결정한다. 구동거리와 방사면적의 크기가 결정되었을 경우 1차 주파수에 따른 최적의 차 주파수가 존재 한다. 또한 차 주파수의 음압 레벨을 최대로 생성하기 위한 방사 파워를 고려해야 한다. 방사 파워는 캐비테이션(Cavitation) 한계, 트랜스듀서의 열적(Thermal) 한계 그리고 포화 한계에 의해서 제약을 받는다.

캐비테이션의 한계는 식(16)과 같다^[8].

$$I = 2f^2 \times 10^{-4} [W/cm^2] \quad (16)$$

트랜스듀서의 열적 한계는 트랜스듀서 설계 형태에 따라 차이가 있다. 일반적으로 100kHz 이상 급의 트랜스듀서에서 주로 사용하는 plate 형태로 볼 때 트랜스듀서의 최대 에너지 밀도 $1W/cm^3$ 를 가정하면 트랜스듀서의 열적 한계는 식(17)과 같다^[8].

$$I = 2/f [W/cm^2] \quad (17)$$

마지막으로 고려해야할 방사 파워 한계는 포화 한계이다. 1차 주파수의 음압이 일정이상 가해질 때 비선형 현상에 의해 충격파가 발생되게 된다. 이 때 공간상의 급격한 압력 구배에 의해 감쇠효과가 격렬하게 일어나 차 주파수의 음압이 줄어들게 된다. 따라서 포화 현상이 발생하지 않는 범위에서 구동하는 것이 중요하다. 포화현상의 한계는 식(18)과 같다^[8].

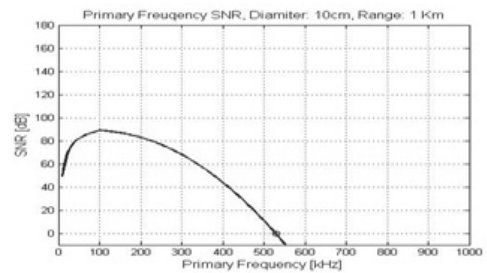
$$I = 9L^2 10^{15.5} / (\pi^3 d^4 f^4) [W/cm^2] \quad (18)$$

여기서, L은 평균 1차 주파수와 트랜스듀서 직경의 함수로써, $\exp(-(\pi/2\beta L)) = 4.5(\alpha_p R_p / \beta L)$ 의 해로 계산된다. 여기서, d는 트랜스듀서 직경, α_p 는 평균 1차 주파수의 흡음계수, R_p 는 회절거리 그리고 β 는 비선형 계수를 나타낸다.

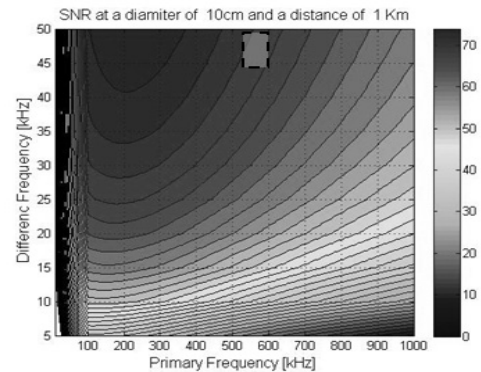
파라메트릭 배열 수중통신 시스템의 통신 거리 1km

표 1. 최적의 차주파수 생성 조건 모의실험 설계변수
Table 1. Simulation parameter for optimum design.

Parameter	Value
Transducer Diameter D	3cm ~ 20cm
Average Primary Frequency f_p	10kHz ~ 1MHz
Difference Frequency f_d	5kHz ~ 50kHz
Sound Velocity c	1469.7m/s



(a)



(b)

그림 1. (a) 1차 주파수의 SNR,
(b) 1차 주파수에 따른 차 주파수의 SNR

Fig. 1. (a) SNR of primary frequency
(b) SNR of Difference frequency

와 트랜스듀서 직경 20cm로 제한할 때 음향학적 설계 요소를 고려한 최적의 차 주파수 발생 조건을 차 주파수의 SNR을 이용하여 모의실험 하였다. 트랜스듀서의 출력은 캐비테이션 한계와 열적한계를 고려한 최대 출력을 가정한다. 흡음계수는 Fisher와 Simmons의 모델을 이용하여 계산하였다^[13]. 모의실험 환경변수는 표1과 같다.

트랜스듀서 직경 5cm에서 10cm구간에서 차 주파수의 SNR을 최대로 하는 평균 1차 주파수의 구간은 150kHz에서 350kHz대역이다. 본 논문에서는 1차 주파

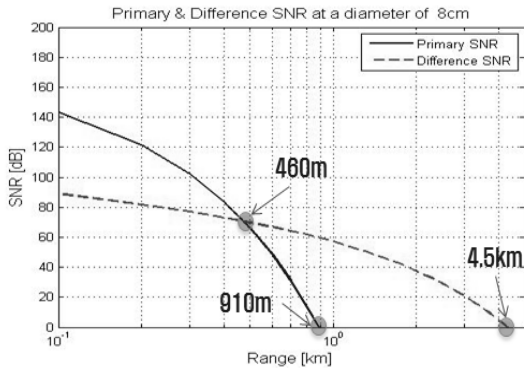


그림 2. 거리에 따른 SNR 감쇠 곡선(직경: 10cm)
Fig. 2. SNR attenuation vs. range (diameter: 10cm).

수의 SNR이 0dB이하로 감쇠되는 구간에서 차 주파수의 최대 SNR을 관측할 수 있는 영역을 선정할 때 평균 1차 주파수 550kHz에서 580kHz영역 그리고 차 주파수 45kHz에서 50kHz영역에서 50dB이상을 기대 할 수 있다. 그림(1)은 트랜스듀서 직경 10cm에서 1차 주파수의 SNR변화 곡선(a)과 1차 주파수에 따른 차 주파수의 SNR변화 곡선(b)을 나타낸다.

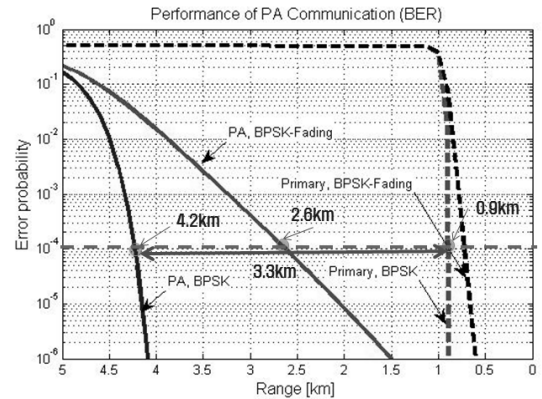
음향학적 설계요소 모의실험 결과 통신 시스템 설계 변수를 트랜스듀서 직경 10cm, 평균 1차 주파수 560kHz, 차 주파수 45kHz, 방사 파워 28.05Watt, 음속 1469.7m/s 그리고 대역폭 27kHz로 가정할 때 거리에 따른 SNR 감쇠 특성 곡선은 그림 (2)와 같다.

모의실험 결과 460m이후 구간에서 차 주파수의 SNR이 1차 주파수의 SNR보다 높게 관측되고 SNR이 0dB 이하로 감쇠되는 거리는 1차 주파수 910m 그리고 차 주파수는 4.5km이다.

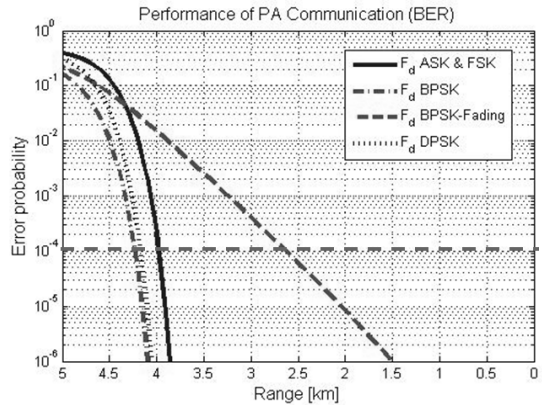
2. 통신 성능 분석

수중통신 시스템의 통신 거리를 1 km로 가정할 때 파라메트릭 배열 통신시스템의 성능 분석을 위해 각 통신 변조 방식에 따른 이론적인 비트오류확률과 MIMO 채널용량을 모의실험 하였다. 모의실험 환경 변수는 음향학적 설계 요소를 고려하여 평균 1차 주파수 560kHz, 차 주파수 45kHz, 트랜스듀서 직경 10cm 그리고 트랜스듀서의 음향학적 방사 파워 28.05Watt를 가정하여 거리 변화에 따른 차 주파수의 SNR을 계산하였다. 그림 (3)은 차 주파수의 SNR에 따른 이론적인 비트오류확률 모의실험 결과이다.

비트오류확률 10^{-4} 이하를 안정적인 통신 성능으로



(a)



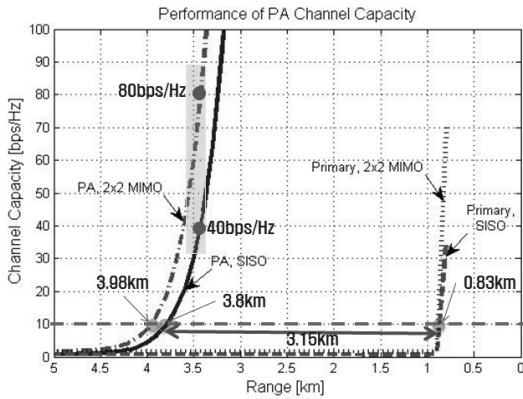
(b)

그림 3. (a) 1차 주파수와 차주파수의 비트오류확률, (b) 차 주파수의 비트오류확률

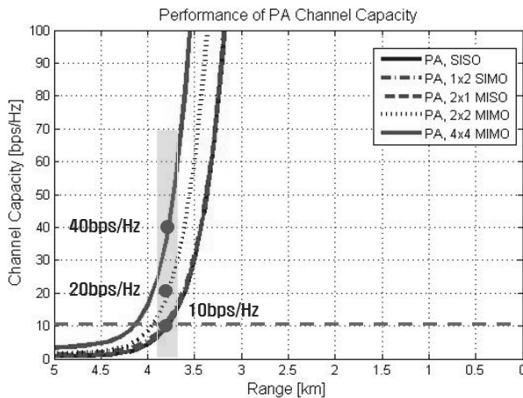
Fig. 3. (a) BER of the primary and difference frequency (b) BER of difference frequency.

볼 때, 1차 주파수의 통신 거리는 0.9km, 차 주파수의 통신 거리는 4.25km로 파라메트릭 배열 통신기법에 의해 약 3.35km의 거리 이득을 획득 할 수 있다. 전달손실에 영향을 주는 흡음계수가 주파수의 제곱에 반비례하므로 차 주파수의 음압레벨이 1차 주파수의 음압레벨보다 서서히 감쇄되어 얻는 거리 이득결과이다. 또한 각 변조 방식에 따른 차 주파수의 통신 거리는 각각 ASK&FSK 3.98km, BPSK 4.25km 그리고 DPSK 4.18km로 요구되는 통신 구동거리 1km를 만족한다.

차 주파수의 SNR을 이용하여 SISO통신과 MIMO 통신 기법에 따른 채널용량을 모의실험 하였다. 이때 각 송·수신기간 가상 채널은 서로 상호 독립적이고 채널 정보를 사용하지 않는다고 가정한다. 그림(4)는 채널 용량 모의실험 결과이다.



(a)



(b)

그림 4. (a) 1차 주파수와 차주파수의 채널용량, (b) 차 주파수의 채널용량
 Fig. 4. (a) Channel capacity of the primary and difference frequency (b) Channel capacity of difference frequency

그림(4-a)에서 요구되는 채널 용량을 10bps/Hz로 가정할 때 1차 주파수의 구동거리는 0.83km이고 차 주파수의 경우 SISO 통신은 3.8km, 2×2 MIMO 통신은 3.98km로 각각 2.97km와 3.15km의 거리 이득을 획득할 수 있다. 그림(4-b)는 MIMO 전송 기법에 따른 채널 용량 시뮬레이션 결과로 3.8km지점의 최대 채널용량은 SISO 10bit/Hz, 2×2 MIMO 20bit/Hz 그리고 4×4 MIMO 40bit/Hz로 MIMO 채널용량이 각각 2배, 4배 증가되는 결과를 확인 할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 파라메트릭 배열 신호를 이용한 수중 통신 성능 분석을 위해 비선형성을 고려한 소나 방정식

을 이용하여 SNR을 추정한 후 이상적인 비트오류확률과 MIMO 채널 용량을 모의실험 하였다. 또한 통신 성능 분석을 위한 모의실험 환경 변수를 통신거리 1km와 트랜스듀서 방사 직경 20cm이하로 제한한 후 음향학적 설계 요소를 고려하여 최적의 차 주파수 생성 조건을 모의실험 하였다. 차 주파수 생성 조건 모의실험 결과 트랜스듀서 직경 5cm~10cm 구간에서 1차 주파수 550kHz~580kHz 그리고 차 주파수 45kHz~50kHz 영역에서 50dB 이상의 SNR 이득을 확인 하였다. 통신 성능 분석을 위한 모의실험 환경 변수를 1차 주파수 560kHz, 차 주파수 45kHz 그리고 방사 파워 28.05Watt로 가정한 후 차 주파수의 SNR을 계산하였다. 안정적인 통신 성능이 비트오류 확률 10^{-4} 이하로 볼 때, 1차 주파수의 통신 거리는 0.9km이고 차 주파수는 4.25km로 약 3.35km의 거리 이득을 확인 하였다. 또한 요구되는 채널 용량을 10bps/Hz로 가정할 때 1차 주파수의 구동거리는 0.83km이고 차 주파수의 경우 SISO 통신은 3.8km, 2×2 MIMO 통신은 3.98km까지 전송 할 수 있음을 확인 하였다.

참 고 문 헌

- [1] R. F. W. Coates, M. Zheng and L. Wang, "Technical Communications," *IEEE J. Ocean. Eng.* vol. 21, pp. 225-232, 1996.
- [2] P. J. Westervelt, "Parametric Acoustic Array," *J. Acoust. Soc. Am.* vol. 35, pp. 535-537, 1963.
- [3] H. O. Berkday and D. J. Leahy, "Farfield performance of parametric transmitters," *J. Acoust. Soc. Am.* vol. 55, pp. 539-546, 1974.
- [4] M. B. Moffett and R. H. Mellen, "Model for parametric acoustic sources," *J. Acoust. Soc. Am.* vol. 61, pp. 325-337, 1977.
- [5] 한정희, 이종현, 팽동국, 배진호, 김원호, "최대우도 검파에 기반한 파라메트릭 어레이 소나 시스템," *J 전자공학회 논문지 제48권 TC편 제1호* pp. 25-31, 2011.
- [6] M. B. Bennett and D. T. Blackstock, "Parametric array in air," *J. Acoust. Soc. Am.* vol. 57, pp. 562-568, 1975.
- [7] T. B. Pederson, "A Parametric SONAR Performance Calculator," *J. Phys. Colloque C8, Suppl., Tome 40*, pp. C8-137-C8-139, 1979.
- [8] L. Kopp, D. Cano, E. Dubois, L. Wang, B. Smith and R. F. W. Coates, "Potential Performance of

Parametric Communications,” *IEEE, J. Ocean. Eng.* vol. 25, No. 3, pp. 282-295, 2000.

[9] J. Urlick, *Principles of Underwater Sound*, 3rd edition, McGraw-Hill, 1983.

[10] 김명진, *아날로그 및 디지털 통신이론*, 생능출판사, 2007.

[11] J. G. Proakis, M. Salehi, G. Bauch, *Contemporary Communication Systems using Matlab and simulink*, Thomson Brooks/cole, 2004

[12] 조용수, 김재권, 양원영, *MIMO-OFDM 무선통신과 Matlab*, 홍릉과학출판사, 2008.

[13] F. H. Fisher and V. P. Simmons, “Sound absorption in sea water,” *J. Acoust. Soc. Am.* vol. 62, pp. 558-564, 1977.

— 저 자 소 개 —



이 재 일(학생회원)
2009년 제주대학교 해양산업
공학전공 학사 졸업.
2011년 제주대학교 해양정보
시스템공학과 석사 졸업.
2011년~현재 제주대학교 해양시
스템공학과 박사과정.
<주관심분야 : 통계학적 신호처리, 센서 신호처
리, Parametric Array, 수중통신>



이 종 현(정회원)-교신저자
1985년 한양대학교 전자공학과
학사 졸업.
1987년 Michigan Technological
University 석사 졸업.
2002년 KAIST 전기 및
전자공학과 박사 졸업.
1990년~1995년 한국전자통신연구원 선임연구원
2000년~2002년 (주) KM Telecom 연구소장
2003년~2006년 서경대학교 전자공학과 전임강사
2006년~현재 제주대학교 해양시스템공학과
부교수
<주관심분야 : 통계학적 신호처리, 적응 배열 시
스템, 수중 및 이동 통신, UWB 무선전송기술>



이 승 욱(정회원)
1986년 경북대학교 전자공학과
학사 졸업.
1989년~현재 (주)한화
구미사업장 개발2부

<주관심분야 : 수중 신호처리>



신 정 채(정회원)
1995년 경북대학교 전자전기
공학부 학사 졸업.
2004년 경북대학교 대학원
정보통신학과 석사 졸업.
2010년 경북대학교 대학원
정보통신학과 박사 졸업.
2010년~현재 (주)한화 구미사업장 개발2부
<주관심분야 : 수중 신호처리>



정 진 욱(정회원)
2007년 숭실대학교 정보통신
공학부 학사 졸업.
2009년 숭실대학교 IT대학원
석사 졸업.
2009년~현재 (주)한화
구미사업장 개발2부

<주관심분야 : 수중 신호처리>