

수중 AWGN 채널에서의 파라메트릭 배열 통신 성능

Performance of Parametric Array Communication System in Underwater AWGN Channel

이재일, 이종현[†], 배진호, 팽동국, 김원호*

(Jaecil Lee, Chong Hyun Lee[†], Jinho Bae, Dong-Guk Paeng, and Won-Ho Kim*)

제주대학교 해양과학대학 해양정보시스템공학과

*국방과학연구소 제6기술연구본부

(접수일자: 2012년 5월 31일; 수정일자: 2012년 9월 25일; 채택일자: 2013년 3월 20일)

초 록: 본 논문에서는 간략화된 차 주파수의 신호대잡음비를 이용하여 수중 AWGN 환경하에서 파라메트릭 배열 통신 시스템의 성능을 비트오류확률과 MIMO 채널용량 관점에서 분석한 결과를 제시한다. 분석을 위해 사용된 차 주파수의 신호대잡음비는 전달손실, 잡음준위 그리고 비선형성이 고려된 차 주파수의 음원준위로 계산된다. 1차 주파수 210 kHz와 190 kHz, 차 주파수 20 kHz, 트랜스듀서 직경 0.1 m, 잡음준위 50 dB, 요구되는 비트오류 확률을 10^{-4} 으로 가정할 때, 담수 환경과 해수 환경에서의 1차 주파수 통신 거리 대비 파라메트릭 배열의 통신거리 이득을 각각 59.11 km와 5 km를 얻었다. 또한, 10 bps/Hz의 채널용량 조건을 위해 SISO 및 (2×2) MIMO 파라메트릭 배열을 사용할 경우, 담수에서는 38.84 km와 46.38 km 거리가득을 해수에서는 3.88 km 4.381 km의 거리가득을 얻었다.

핵심용어: 파라메트릭 배열 통신, 수중 통신, 음향 신호처리, 비트오류확률, MIMO 채널용량

ABSTRACT: In this paper, we present performance analysis results of parametric array communication system in terms of theoretical BER and channel capacity of MIMO in underwater AWGN channel by using simplified SNR of difference frequency. The SNR of the difference frequency is calculated by using transmission loss, noise level, and source level of difference frequency in which nonlinear effect is considered. By assuming primary frequencies as 210 kHz and 190 kHz, difference frequency as 20 kHz, transducer diameter as 0.1 m, and noise level as 50 dB and the requested BER as 10^{-4} , we obtain parametric array communication range gains over the communication system using primary frequency of 59.11 km in fresh water and 5 km in sea water, respectively. Also we obtain range gains of 38.84 km and 46.38 km in fresh water, and 3.88 km and 4.38 km in sea water when we use SISO and 2×2 MIMO parametric array communications for the channel capacity of 10 bps/Hz.

Keywords: Parametric array communication, Underwater communication, Acoustic signal processing, BER, MIMO channel capacity

PACS numbers: 43.25. Lj, 43.60. Dh

1. 서 론

한반도 주변의 해양 환경은 동해 외해를 제외하고 주로 수심 150 m 이하의 천해 환경으로 천해 통신 환경에서 해수면과 해저면에 반사되어 크기와 위상이 왜곡된 음향 신호는 통신 성능을 저하시킨다. 따라

서 다중경로에 강인한 송신 특성을 갖는 수중 통신 시스템이 필요하며 이러한 문제를 해결하기 위해 파라메트릭 배열을 이용한 전송방법이 연구되고 있다.^[1] 파라메트릭 배열 현상에 의해 간접적으로 생성된 차 주파수는 직접 구동하는 경우보다 적은 방사면적으로 부엽이 없는 고지향성 빔을 형성할 수 있다. 이는 동일한 주파수 신호를 직접 구동하여 얻어지는 고지향성 빔 생성 방법에 비해 트랜스듀서의 크기, 질량 그리고 비용 측면에서 이득을 얻을 수 있다.^[2]

[†]Corresponding author: Chong Hyun Lee (chonglee@jejunu.ac.kr)
Department of Oceanic Information and System Engineering,
College of Ocean Science, Jeju National University, 66 Jejudachakno,
Jeju-si, Jeju Special Self-Governing Province, Republic of Korea
(Tel: 82-64-754-3481, Fax: 82-64-754-3483)

파라메트릭 배열 연구는 Westervelt에 의해 이론적인 개념 도입 이후 차 주파수의 비선형 모델 해석, 음파 전달 특성 분석과 신호처리 분야에서 다양한 연구들이 진행되어왔다.^[1-8] Coates 연구진은 파라메트릭 배열 신호를 DPSK변조하여 수중 통신 실험을 수행하였다.^[1] 국내에서는 최근 파라메트릭 배열을 이용한 수중 통신 연구가 진행되고 있으며, 또한 효율적인 파라메트릭 배열 신호를 생성하기 위한 다공진 초음파 트랜스듀서 제작에 대한 연구가 활발히 진행되고 있다.

본 논문에서는 비선형성이 고려된 차 주파수의 SNR을 이용하여 파라메트릭 배열기반 수중 통신 시스템의 이론적인 통신 성능분석 결과를 소개한다. 통신 성능분석을 위한 차 주파수의 SNR은 비선형성이 고려된 음원준위와 전달손실 그리고 잡음준위의 관계식으로 계산된다. 또한, 차 주파수의 음압레벨을 계산하여 Westervelt의 비선형 모델식과 비교하였다. 통신 성능 분석은 해수 환경과 담수 환경에서 통신 변조 방식에 따른 이론적인 비트오류확률을 계산하였다. 또한 파라메트릭 배열 신호는 이론적으로 부엽이 없는 고지향성 신호를 발생시키지만 복잡한 해양환경에 따라 시간지연 확산이 발생된다는 가정 아래 이론적인 연구의 목적으로 MIMO 채널용량을 모의실험 하였다.

II. 이 론

파라메트릭 배열 현상은 1차 주파수 f_1 과 f_2 를 동일한 방향으로 강하게 방사시킬 때 매질의 비선형 현상에 의해 1차 주파수 이외에 차 주파수와 합 주파수 등 여러 배음현상이 발생되고 이중 차 주파수 성분을 의미한다. 여러 배음현상 중 고 주파수 성분은 주파수의 자승에 비례하는 감쇠효과로 급격히 소멸하고 상대적으로 낮은 차 주파수 성분만이 1차 주파수의 고지향 특성을 갖고 가장 원거리까지 전파된다.

Mellen과 Moffett은 일반적인 SONAR 방정식에 비선형성을 고려하여 1차 주파수의 음압레벨과 차 주파수의 음압레벨사이 관계식을 계산하였다.^[5] Prederson은 1차 주파수의 방사전력을 충격파가 발생되지 않는 포화 한계로 가정한 후 비선형 계수, 회절거리 g

리고 차 주파수에 의한 흡음률을 고려하여 차 주파수의 음원준위를 계산하였다.^[9] 본 논문에서 파라메트릭 배열 시스템의 통신 성능을 분석하기 위한 차 주파수의 SNR을 비선형성이 고려된 차 주파수의 음원준위와 전달 손실 그리고 잡음준위를 이용하여 계산한다. 이는 복잡한 비선형 모델식 또는 수치해석 기법보다 계산 비용을 줄일 수 있으며 시스템 설계 비용을 감소시킨다. 차 주파수의 음원준위를 계산하기 위한 1차 주파수의 음원준위 SL_p 는 식(1)과 같다.^[9]

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

여기서, W_0 는 음향 방사전력 그리고 S 는 트랜스듀서 방사면적 그리고 λ_p 는 평균 1차 주파수 $f_p = (f_1 + f_2)/2$ 의 파장을 나타낸다. 전형적으로 1차 주파수의 음원준위는 170 dB에서 240 dB의 값을 갖는다.^[10] 1차 주파수의 음원준위를 이용하여 차 주파수의 음원준위 SL_d 를 식(2)와 같이 계산한다.^[9]

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

여기서, f_d 는 차 주파수를 나타내고 287 dB는 수중환경에 따른 변환 상수^[6]로 $20\log_{10}(\rho_0 c_0^3/2.83\pi\beta) + 66$ 와 같이 계산되며 ρ_0 는 밀도, c_0 는 음속, β 는 비선형 계수를 나타낸다. 또한, Δ 는 파라메트릭 배열 현상 효과로 차 주파수의 가상음원 크기를 결정하며 식(3)과 같이 지수적분 형태로 계산된다.

$$\Delta = E_1\left(\frac{R_R f_p}{R_A f_d}\right) \exp\left(\frac{R_R f_p}{R_A f_d}\right) \quad (3)$$

where, $E_1(y) = \int_y^\infty \frac{e^{-x}}{x} dx.$

여기서, R_R 는 회절거리로 S/λ_p 와 같이 계산되고 R_A 는 감쇠거리로 전 흡음계수 α_T 의 역수로 계산되며 전 흡음계수는 $\alpha_1 + \alpha_2 - \alpha_d$ 와 같이 1차 주파수 f_1 과 f_2 의 흡음계수 α_1 와 α_2 그리고 차 주파수의 흡음계수 α_d 의 관계식으로 계산된다. 본 논문에서 사용된 흡음계수는 Fisher와 Simmons의 모델을 사용하였다.^[11] 1차 주파수의 비선형 현상에 의해 간접적으로

발생되는 차 주파수의 가상음원은 감쇠거리와 회절 거리에 영향을 받으며 감쇠거리 이전까지 선 배열 형태로 누적되어 증가하고 회절거리 이후부터 확산 현상에 의해 감쇠한다.^[8] 예를 들어 차 주파수의 가상음원은 감쇠거리가 회절거리보다 작은 경우에는 감쇠거리까지 누적되어 증가하고, 감쇠거리가 회절거리보다 큰 경우에는 회절거리까지 누적되어 증가한다.

식(2)의 비선형성이 고려된 차 주파수의 음원준위를 이용하여 최종적으로 차 주파수의 SNR는 식(4)와 같이 계산된다.

$$SNR = SL_d - TL_d - NL. \quad (4)$$

여기서, TL_d 는 차 주파수의 전달 손실로 $\alpha_T R_{km} + 20\log_{10} R_{km} + 60$ 와 같이 계산되며 R_{km} 는 관측거리를 나타내고 NL 는 잡음준위^[12]를 나타낸다. 본 논문의 식(3)에서 계산된 SNR과 비선형 모델의 계산결과를 비교하기 위해 원거리 음장의 근사식을 갖고 있는 Westervelt 모델과 비교하였다. Westervelt는 1차 주파수 신호에 대해 회절 현상은 무시하고 원통 라인 형태의 음원을 가정하여 파라메트릭 배열에 대한 이론식을 얻었다.^[2,3] 1차 주파수의 음원을 원거리 가정 ($R \gg R_A, R_R$)을 통해 정리하면 일반적인 차 주파수의 음압은 식(5)와 같이 근사해를 얻는다.^[2]

$$p_d(R, \theta) = \text{Re} \left[\frac{\beta P_1 P_2 w_d^2 S \exp(-(\alpha_d + jk_d)R)}{8\pi\rho_0 c_0^4 R} \frac{\alpha_T + jk_d(1 - \cos\theta)}{\alpha_T + jk_d(1 - \cos\theta)} \right]. \quad (5)$$

여기서, w_d 는 차 주파수, k_d 는 차 주파수의 파수, R 는 측정거리, θ 는 측정각도, β 는 비선형 계수^[13]로 해수는 3.8과 답수는 3.6의 값을 갖는다. 또한 차 주파수의 HPBW(Half Power Beam Width) θ_{HP} 는 $2\sqrt{2\alpha_T/k_d}$ 로 계산된다.^[9]

파라메트릭 배열 현상을 이용한 대표적인 디지털 통신 변조방식으로는 ASK, FSK, PSK 그리고 DPSK가 있다. 각 변조 방식에 따른 비트오류확률은 차 주파수의 SNR를 이용하여 계산된다. ASK와 FSK의 동기식 복조 방식의 비트오류확률은 식(6)과 같다.^[14]

$$P_{b-ASK,FSK} = Q(\sqrt{SNR}). \quad (6)$$

PSK의 비트오류 확률은 식(7)과 같다.^[15]

$$P_{b-PSK} = Q(\sqrt{2SNR}). \quad (7)$$

DPSK의 비트오류 확률은 식(8)과 같이 표현된다.^[14,15]

$$P_{b-DPSK} \cong 0.5 \exp(-SNR). \quad (8)$$

본 논문에서는 고지향성 파라메트릭 배열 신호가 복잡한 해양환경의 변화로 시간지연 확산이 발생할 때 이론적인 연구의 목적으로 MIMO 채널 용량을 계산하였다. Shannon의 방정식은 통신 시스템에서 최대 데이터 전송률이 제한된다는 것을 의미하며 식(9)와 같이 통신 시스템이 얻을 수 있는 성능의 이론적 상한선을 제시한다.

$$C = B \log_2(1 + SNR) \text{ [bps/Hz]}. \quad (9)$$

송신 트랜스듀서의 수를 N_T 그리고 수신 트랜스듀서의 수를 N_R 이라할 때, 송신부에서 수중 채널 정보를 사용하지 않을 때의 MIMO 채널 용량은 식(10)과 같다.^[16]

$$C = \max_{\mathbf{R}} \log_2 \left| \mathbf{I}_{N_R} + \frac{SNR}{N_T} \mathbf{H} \mathbf{R}_{\mathbf{xx}} \mathbf{H}^H \right| \text{ [bps/Hz]}. \quad (10)$$

여기서, \mathbf{H} 는 $N_R \times N_T$ 크기의 채널이득 행렬, \mathbf{I}_{N_R} 는 $N_R \times N_R$ 크기의 단위행렬 그리고 $\mathbf{R}_{\mathbf{xx}}$ 는 $N_T \times N_T$ 크기의 송신신호의 자기상관 행렬을 나타낸다. 송신기에서 전송되는 신호가 동일한 전력을 갖도록 하면 송신신호의 자기상관 행렬 $\mathbf{R}_{\mathbf{xx}}$ 는 \mathbf{I}_{N_T} 가 되어 식(10)의 채널 용량은 식(11)과 같이 된다.

$$C = \log_2 \left| \mathbf{I}_{N_R} + \frac{SNR}{N_T} \mathbf{H} \mathbf{H}^H \right| \text{ [bps/Hz]}. \quad (11)$$

III. 모의실험 결과

수중 통신구동 거리를 5km로 가정할 때 시스템 설계 변수에 따른 차 주파수의 음압레벨($SPL: SL_d - TL_d$)을 모의실험 하여 Westervelt 비선형 모델과 비교하였다. 모의실험 환경 변수를 1차 주파수 $f_1=210$ kHz, $f_2=190$ kHz, 차 주파수 $f_d=20$ kHz, 트랜스듀서 직경 10 cm 그리고 트랜스듀서의 음향학적 방사전력 $W_1=2.992$ Watt, $W_2=3.3069$ Watt로 가정하여 담수 환경과 해수 환경에서 차 주파수의 음압레벨을 모의실험 하였다. 담수 환경에서 수온 5°C와 수심 0 m를 가정할 때 차 주파수 흡음계수와 전 흡음계수는 각각 $\alpha_d=1.8618 \times 10^{-5}$ Np/m와 $\alpha_T=0.0037$ Np/m로 계산되고 해수 환경에서 수온 5°C, 염도 35 ppt, 수소이온지수 (pH) 8 그리고 수심 0 m를 가정할 때 차 주파수 흡음계수와 전 흡음계수는 각각 $\alpha_d=4.4658 \times 10^{-4}$ Np/m와 $\alpha_T=0.01$ Np/m로 계산되어 담수 환경보다 높은 흡음

계수로 동일한 시스템 환경조건에서 해수 환경이 담수 환경보다 높은 전달 손실을 보인다. Fig. 1은 담수 환경과 해수 환경에서 차 주파수의 음압레벨 모의실험 결과와 Westervelt 모델을 비교한 결과이다. 모의실험 결과 Fig. 1(a) 담수 환경에서 차 주파수의 음압레벨이 1차 주파수의 음압레벨 보다 높게 관측되는 지점은 2 km이고 잡음준위를 50 dB로 가정할 때 1차 주파수는 약 4.6 km 그리고 차 주파수는 약 93 km에서 잡음준위 보다 낮아진다. Fig. 1(b) 해수 환경에서는 차 주파수의 음압레벨이 1차 주파수의 음압레벨 보다 높게 관측되는 지점은 1.08 km이고 잡음준위 보다 낮게 관측되는 지점은 1차 주파수 약 1.9 km와 차 주파수 약 8.5 km로 파라메트릭 배열 현상에 의해 발생된 차 주파수 성분이 더 원거리까지 전파되는 현상을 확인할 수 있다. 또한 모의 실험결과는 비선형 모델과 비교할 때 매우 유사한 결과를 보인다.

모의실험 환경조건에서 파라메트릭 배열의 HPBW는 담수 환경($\alpha_T=0.0034$ Np/m, $k_d=83.7758$ rad/m)에서 1.0791° 그리고 해수 환경($\alpha_T=0.01$ Np/m, $k_d=85.4855$ rad/m)에서 1.755°로 파라메트릭 배열 현상에 의해 고지향성 신호가 생성되며 담수 환경의 빔 폭이 해수 환경 보다 좁게 계산된다. 파라메트릭 배열의 통신 성능을 분석하기 위해 천해에서의 잡음준위를 50 dB로 가정한 후 식(4)와 같이 차 주파수의 SNR을 계산하여 디지털 통신 변조 방식에 따른 비트 오류확률을 모의실험 하였다. 또한, 최대 데이터 전송률의 한계를 확인 하기 위해 통신채널은 서로 상호 독립적이라는 가정아래서 이상적인 MIMO 채널용량을 모의실험 하였다. 모의실험의 통신채널은 담수 환경과 해수 환경으로 가정하였다.

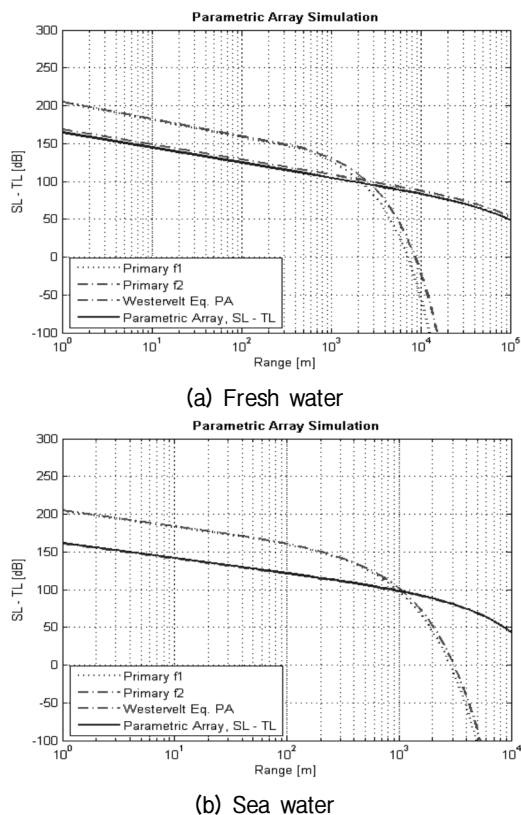


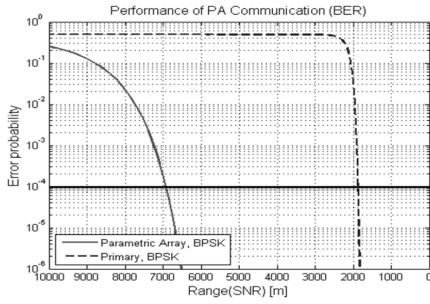
Fig. 1. Comparison of SPL of difference frequency and the Westervelt model.

3.1. 담수환경 결과

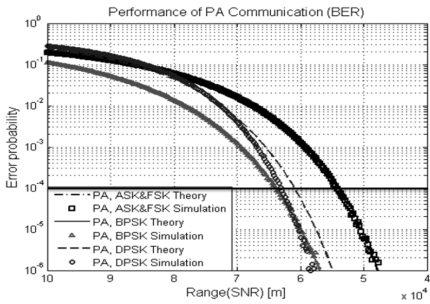
담수 환경에서 차 주파수의 음압레벨 모의실험 환경 변수와 동일한 실험환경을 가정하여 통신 성능 분석을 위한 모의실험을 수행하였다. 이때, 음속은 $c_0=1500$ m/s, 비선형 계수는 $\beta=3.6$ 을 가정한다. Fig. 2는 통신 변조방법에 따른 이론적인 비트오류확률의 모의실험 결과이다.

안정적인 통신 성능이 비트오류 확률 10^{-4} 이하로 볼 때, 1차 주파수의 통신 거리는 4.74 km이고 차 주

파수는 63.85 km로 약 59.11 km의 거리 이득을 획득할 수 있다. 또한 각 통신변조 방식에 따른 차주파수의 통신 거리는 각각 ASK&FSK는 54.2 km, BPSK는

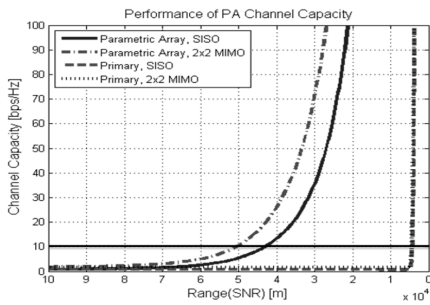


(a) Comparison of primary and difference frequencies

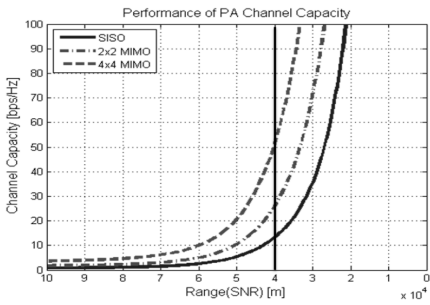


(b) BER of difference frequency

Fig. 2. BER curve in fresh water.



(a) Comparison of primary and difference frequencies



(b) Capacity of difference frequency

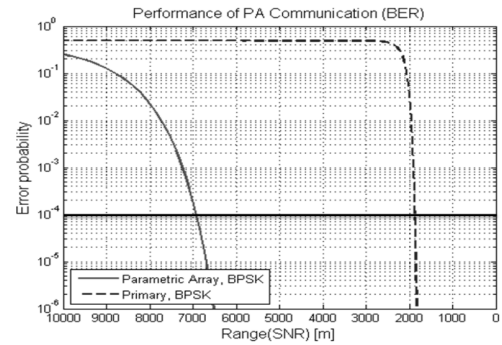
Fig. 3. Channel capacity in fresh water.

63.85 km 그리고 DPSK는 63.13 km 이다.

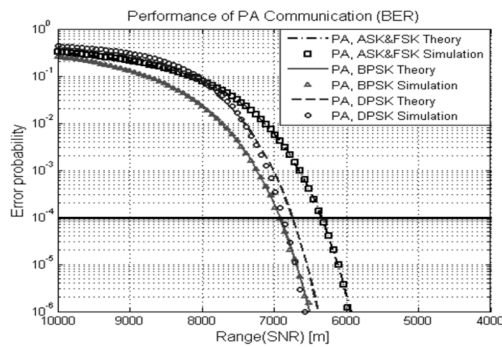
Fig. 3는 이론적인 MIMO 채널용량의 모의실험 결과이다. 요구되는 채널 용량을 10bps/Hz로 가정할 때 1차 주파수의 구동거리는 4.4 km이고 차주파수의 경우 SISO 통신은 43.24 km, 2x2 MIMO 통신은 50.78 km를 전송할 수 있다. 또한 40 km에서의 최대 채널용량은 SISO 통신은 13.5 bit/Hz, 2x2 MIMO 통신은 26.5 bit/Hz 그리고 4x4 MIMO 통신은 52 bit/Hz로 MIMO 채널용량이 각각 2배, 4배 증가되는 결과를 확인할 수 있다.

3.2. 해수환경 결과

해수 환경에서 담수 환경과 동일한 실험 환경 변수를 가정한 후 통신 성능분석을 위한 모의실험을 수행하였다. 이때, 음속은 $c_0=1470$ m/s, 비선형 계수는 $\beta=3.8$ 을 가정한다. Fig. 4는 통신 변조방식에 따른 이론적인 비트오류확률의 모의실험 결과이다. 안정적인 통신 성능이 비트오류 확률 10^{-4} 이하로 볼 때, 1차 주파수의 통신 거리는 1.86 km이고 차주파수는 6.92 km로 약 5 km의 거리 이득을 획득할 수 있다. 또

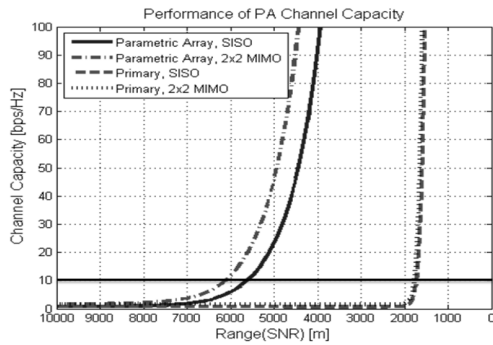


(a) Comparison of primary and difference frequencies

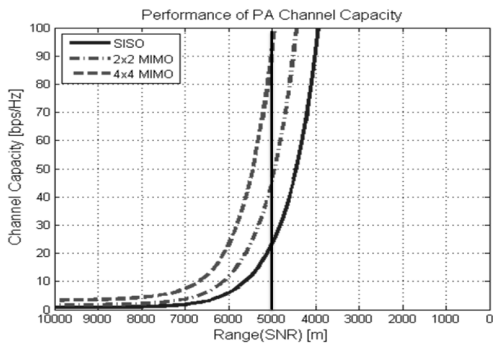


(b) BER of difference frequency

Fig. 4. BER curve in sea water.



(a) Comparison of primary and difference frequencies



(b) Capacity of difference frequency

Fig. 5. Channel capacity in sea water.

한 각 변조 방식에 따른 차 주파수의 통신 거리는 각각 ASK&FSK는 6.34 km, BPSK는 6.92 km 그리고 DPSK는 6.89 km 이다.

Fig. 5는 이론적인 MIMO 채널용량의 모의실험 결과이다. 요구되는 채널 용량을 10 bps/Hz로 가정할 때 1차 주파수의 구동거리는 1.75 km이고 차 주파수의 경우 SISO 통신은 5.63 km, 2x2 MIMO 통신은 6.13 km 를 전송 할 수 있다. 또한 5 km에서의 최대 채널용량은 SISO 통신은 23 bit/Hz, 2x2 MIMO 통신은 46 bit/Hz 그리고 4x4 MIMO 통신은 92 bit/Hz로 MIMO 채널용량이 증가되는 결과를 확인 할 수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 파라메트릭 배열기반 디지털 통신 성능분석을 위해 차 주파수의 SNR을 비선형성이 고려된 차 주파수의 음원준위와 전달손실 그리고 천해 환경의 잡음준위 50 dB를 가정하여 계산하였다. 제시된 차 주파수의 SNR 계산은 비선형 모델 또는 수

치해석 기법보다 적은 계산 비용으로 이론적인 성능을 계산 할 수 있으며 시스템 설계 비용을 감소시킬 수 있다. 계산된 차 주파수의 음압레벨은 Westervelt의 원거리 근사식 모델식과 비교 하여 유사함을 확인하였다. 통신 성능분석을 위해 차 주파수의 SNR을 이용하여 담수 환경과 해수 환경에서 이론적인 비트 오류확률과 MIMO 채널 용량을 모의실험 하였다. 모의실험의 환경 변수를 1차 주파수 $f_1=210$ kHz, $f_2=190$ kHz, 차 주파수 $f_d=20$ kHz 그리고 트랜스듀서 직경 0.1 m로 가정할 때 파라메트릭 배열 통신에 의한 거리 이득은 담수 환경에서 59.11 km와 해수 환경에서 5 km를 획득하였다. 또한 요구되는 채널용량 10 bps/Hz를 가정할 때 담수 환경에서 1차 주파수의 구동거리는 4.4 km이고 차 주파수의 경우 SISO 통신에서 43.24 km 그리고 2x2 MIMO 통신에서 50.78 km의 구동 거리를 확보할 수 있고 해수 환경에서 1차 주파수의 구동거리는 1.75 km이고 차 주파수의 SISO 통신은 5.63 km 그리고 2x2 MIMO 통신은 6.13 km를 전송할 수 있음을 확인하였다. 모의실험 결과 차 주파수를 이용한 수중 통신 방법이 1차 주파수를 이용한 통신 성능보다 원거리 까지 안정적인 거리 이득을 확보할 수 있음을 보였다. 본 논문의 연구 결과는 향후 파라메트릭 배열 기반 수중 통신 성능 분석 및 수중 통신 시스템 설계에서 이론적인 참고 지표로 활용될 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 대해 깊이 감사드립니다 (계약번호: UD130007DD).

참 고 문 헌

1. R. F. W. Coates, M. Zheng and L. Wang "Technical Communications," IEEE J. Oceanic Eng. **21**, 225-232 (1996).
2. B. K. Novikov, O. V. Rudenko and V. I. Timoshenko, *Nonlinear Underwater Acoustics* (The American Institute of Physics, New York, 1987).
3. P. J. Westervelt "Parametric Acoustic Array," J. Acoust. Soc. Am. **35**, 535-537 (1963).

4. H. O. Berktaay and D. J. Leahy "Farfield performance of parametric transmitters," J. Acoust. Soc. Am. **55**, 539-546 (1974).
5. M. B. Moffett and R. H. Mellen "Model for parametric acoustic sources," J. Acoust. Soc. Am. **61**, 325-337 (1977).
6. M. B. Moffett "Measurement of fundamental and second harmonic pressures in the field of a circular piston source," J. Acoust. Soc. Am. **65**, 318-323 (1979).
7. W. S. Gan, J. Yang, K. S. Tan and M. H. Er "A Digital Beamsteerer for Difference Frequency in a Parametric Array," IEEE Transactions on A. S. and L. Processing **14**, 1018-1025 (2006).
8. L. Kopp, D. Cano, E. Dubois, L. Wang, B. Smith and R. F. W. Coates, "Potential Performance of Parametric Communications," IEEE J. Oceanic Eng. **25**, 282-295 (2000).
9. T. B. Pederson, "A Parametric SONAR Performance Calculator," J. Phys. Colloque. **40**, 137-139 (1979).
10. X. Lurton, *An Introduction to Underwater Acoustics Principles and Applications* (2nd edition, Springer, 2010).
11. F. H. Fisher and V. P. Simmons, "Sound absorption in sea water," J. Acoust. Soc. Am. **62**, 558-564 (1977).
12. Peter H. Dahl, James H. Miller, Douglas H. Cato, Rex K. Andrew, "Underwater Ambient Noise," Acoustics Today **3**, 23-33 (2007).
13. R. T. Beyer, "Parameter of Nonlinearity in Fluids," J. Acoust. Soc. Am. **32**, 719-721 (1960).
14. M. J. Kim, *Analog and Digital Communication Theory* (Life & Power Press, 2007).
15. J. G. Proakis, M. Salehi, G. Bauch, *Contemporary Communication Systems* (Thomson Brooks/cole, 2004).
16. Y. S. Cho, J. K. Kim, W. Y. Yang, *MIMO-OFDM Wireless Communications with MATLAB* (Hongreung Science Publishing, 2008).

저자 약력

▶ **이재일(Jaeil Lee)**



2009년 8월: 제주대학교 해양산업공학전공 (이학사)
 2011년 8월: 제주대학교 해양정보시스템 공학과(공학석사)
 2011년 9월~현재: 제주대학교 해양시스템공학과 박사과정
 <관심분야> 통계학적 신호처리, 센서 신호처리, Parametric Array, 수중통신

▶ **이종현(Chong Hyun Lee)-(교신저자)**



1985년: 한양대학교 전자공학과(공학사)
 1987년: Michigan Technological University (공학석사)
 2002년: KAIST 전기 및 전자공학과(공학박사)
 1990년~1995년 한국전자통신연구원 선임연구원
 2000년~2002년: (주) KM Telecom 연구소장
 2003년~2006년: 서경대학교 전자공학과 전임강사
 2006년~현재: 제주대학교 해양시스템공학과 부교수
 <관심분야> 통계학적 신호처리, 적응 배열 시스템, 수중 및 이동 통신, UWB 무선전송기술

▶ **배진호(Jinho Bae)**



1993년: 아주대학교 전자공학과(공학사)
 1996년: KAIST 정보통신공학과(공학석사)
 2001년: KAIST 전자전산학과(공학박사)
 1993년~2002년: 대양전기공업(주) 기술연구소 실장
 2002년~2002년: KAIST BK21 초빙 교수
 2006년~2007년: Texas A&M 방문 교수
 2002년~현재: 제주대학교 해양시스템공학과 부교수
 <관심분야> 광신호처리 및 통신, 레이다 및 소나 신호처리, 항해 시스템

▶ **팽동국(Dong-Guk Paeng)**



1991년 2월: 한양대학교 지구해양과학과 (이학사)
 1993년 2월: 한양대학교 지구해양과학과 (이학석사)
 1997년 8월: Massachusetts Institute of Technology 해양공학과(공학석사)
 2002년 8월~현재: Pennsylvania State University 음향학과(공학박사)
 2003년~현재: 제주대학교 해양시스템공학과 부교수
 <관심분야> 수중음향, 음파산란, 신호처리, 수중통신

▶ **김원호(Won-Ho Kim)**



1984년 2월: 단국대학교 전기공학과(공학사)
 1993년 2월: 부경대학교 전자통신공학과 (공학석사)
 2003년 8월: 부경대학교 음향진동공학과 (공학박사)
 1984년 3월 ~ 현재: 국방과학연구소 음향센서연구팀 선임연구원
 <관심분야> 파라메트릭 배열, 음향센서 설계 및 측정 기법