

파라메트릭 어레이를 이용한 공기 중 디지털 통신 연구

A Study on Digital Communication in Air Using Parametric Array

제엽*, 이재일**, 이종현**, 문원규*
(Yub Je*, Jae-il Lee**, Chong-Hyun Lee**, Won-kyu Moon*)

*포항공과대학교 기계공학과

**제주대학교 해양정보시스템공학과

(접수일자: 2009년 9월 1일; 수정일자: 2009년 10월 13일; 채택일자: 2009년 11월 4일)

본 논문에서는 파라메트릭 어레이를 이용한 공기 중 디지털 통신의 특성을 측정해 보았다. 2차 오더의 비선형 현상인 파라메트릭 어레이를 구현하기 위하여, 고효율, 고효율의 음파 발생이 가능한 요철 트랜스듀서가 사용되었다. 1차 음파(primary wave)의 주파수는 트랜스듀서 공진 주파수에 맞추어 83 kHz, 122 kHz로 결정하였고, 이를 통해 발생하는 39 kHz의 차음(difference frequency wave)을 통신 신호로 이용하였다. 통신 변조방법으로 On-Off Keying 방식을 이용하였다. 실험은 파라메트릭 어레이를 이용한 디지털 통신의 특성을 측정하기 위하여 파형 분석을 하였고, 거리, 각도에 따른 SNR을 측정해 보았다. 실험 결과 파라메트릭 어레이를 이용한 디지털 통신은 3m 이내의 근거리 영역에서 적합함을 알 수 있었고, 빔폭(-3 dB)은 14°로 측정되어 고지향성 통신이 가능함을 확인하였다. 위의 실험 결과를 통해 파라메트릭 어레이를 이용한 공기 중 음향 통신에 대한 가능성을 확인하였고, 고지향성 통신 특성은 다중경로 문제나 보안 문제에 장점이 있을 것으로 판단된다.

핵심용어: 파라메트릭 어레이, 음향 통신, 고지향성 통신, OOK

투고분야: 음향 통신기술 분야 (6)

This paper demonstrates the digital communication in air using the parametric array. The stepped-plate transducer which is suitable for high-power and high efficient radiation is used to generate the difference frequency wave with the parametric array. The primary frequencies are selected to 83 kHz and 122 kHz and the resulting difference frequency wave at the frequency of 39 kHz is used for the communication. The modulation method is selected to On-Off Keying method. The waveform and signal-to-noise ratio (SNR) is measured and analyzed to see the characteristics of the digital communication using the parametric array. The proper distance for the communication using parametric array is about 3 m. The measured beam width of the 3dB SNR reduction was 14°. The possibility of the communication in air using the parametric array is confirmed and the high directional characteristic of the communication using the parametric array is expected to have the advantages for the multipath and the security problems.

Keywords: Parametric Array, Acoustic Communication, Directional Communication, OOK

ASK subject classification: Acoustic Communication (6)

I. 서론

음파를 이용한 통신은 지금까지 주로 수중에서 많은 연구가 이루어져 왔다. 수중에서는 음파가 전자기파에 비해 감쇠가 적어 더 먼 거리를 진행 할 수 있으므로 음파를 이용한 통신이 많은 장점을 가지고 있다. 반면에 공기

중에서 음파는 전자기파에 비해 높은 감쇄효과, 느린 전파속도로 인해 음파를 이용한 통신, 특히 장거리 통신에서는 거의 사용되지 않았다. 하지만 공기 중 IR (Infrared) 이나 RF (Radio Frequency) 전자기파 통신은 전자기 간섭이나 보안상 문제로 인해 몇몇 특수한 상황에서 문제가 되어왔다. [1]의 이러한 문제를 극복하기 위해 최근 근거리 통신에 한하여 새로운 방식의 무선 통신 연구가 이루어지고 있다. 이러한 연구들은 주로 전자기파 간섭이 중요한 문제인 병원, 로봇간의 통신, PC 마우스 등에 대한

응용을 목적으로 연구가 이루어지고 있다. [1-7]

음향 통신을 구현하기 위해서는 낮은 지향성에 의한 다중경로 (multipath) 문제나 보안성 문제를 해결하는 것이 중요하다. [2] 이러한 문제를 해결 하기 위해서 고지향성 음파 발생 기술인 파라메트릭 어레이 (parametric array) 가 좋은 방안이 될 수 있다고 판단된다. 파라메트릭 어레이는 매질의 비선형성을 이용해 적은 면적으로 고지향성 빔을 형성할 수 있는 기술로, Westervelt에 의해 처음 발표된 [8] 이후, 수중에서는 통신이나 고해상도 능동 소나에, 공기 중에서는 초음파 스피커나 고지향성 거리센서로 많은 연구가 이루어져 왔다. [9-11] 충분히 큰 음압의 두 가지 주파수 성분의 신호 (primary wave)가 매질을 진행할 경우, 매질의 비선형성에 의해서 두 가지 주파수의 차 주파수 성분을 가지는 차음 (difference frequency wave)이 발생되게 된다. 이 때, 차음에 대해서 매질이 라인형태의 가상 음원 (virtual line source) 역할을 하므로 이를 파라메트릭 어레이라고 하고, 적은 방사면적으로 부엽이 없는 고지향성 차음을 발생하게 한다. 따라서 파라메트릭 어레이의 부엽이 없는 고지향성 특성은 음향 통신시 발생하는 다중경로 (multipath) 문제, 보안성 문제에 있어서 큰 장점이 있을 것으로 판단된다.

본 논문에서는 파라메트릭 어레이를 이용한 공기 중 통신에 대한 가능성을 판단하기 위해 On-Off Keying (OOK) 변조 방식을 이용하여 이진 데이터 (binary data)를 전송해 보았다. 전송된 음파의 파형 측정 및 분석을 통해 파라메트릭 어레이를 이용한 통신의 구현을 확인하였고, 거리 및 각도에 따른 SNR을 측정하여 파라메트릭 어레이 통신의 특성을 측정해 보았다.

II. 통신시스템 구성

그림 1은 공기 중 파라메트릭 어레이 디지털 통신 시스템의 구성을 나타낸다. 통신 신호는 PC (PXI-8186) 의 LabVIEW 8.6 프로그램에 의해 변조되어 디지털-아날로그 컨버터 (DAC, PXI-6251)를 통해 파워 앰프 (HAS 40520, NF) 에 인가된다. 파워 앰프에 의해 증폭된 신호는 제작된 트랜스듀서에 인가되어 공기 중에 1차 음파 (primary wave) 를 발생시킨다. 1차 음파와 비선형 현상에 의해 발생된 차음은 1/8인치 마이크로폰 (type 4138, Bruel and Kjaer) 에서 측정되어 차지 앰프를 통해 증폭된다. 증폭된 신호는 아날로그-디지털 컨버터 (ADC,

PXI6251) 를 통해 PC에 입력되고, 입력된 신호는 LabVIEW 8.6 프로그램을 통해 복조 되어 데이터가 전송된다. 모든 음향실험은 반무향실 (2 m x 2 m x 3 m) 에서 수행되었고, 무향실내 주변소음은 150 Hz 이상에서 15 dB 이하로 측정되었다. 바닥으로부터 반사파의 영향을 줄이기 위해 트랜스듀서와 마이크로폰은 1.2 m 높이에 설치되었다.

2.1. 트랜스듀서

파라메트릭 어레이 현상의 경우 2차 오더의 비선형 현상이므로 두 가지 이상 주파수 대역에서 강력한 1차 음파를 발생시켜주는 것이 중요하다. 특히 공기 중에서는 매질과 트랜스듀서간의 임피던스 차이, 높은 감쇄 효과, 낮은 비선형 상수에 의해 파라메트릭 어레이 현상의 구현에 어려움이 있어 트랜스듀서의 선택이 중요하다. Gallego Juarez 연구진은 방사판에 요철을 부착하여 방사판의 크기를 크게 하여 단일 주파수에서 고효율 ($\eta_{MA} \sim 80\%$), 고출력 (SPL ~ 160 dB)의 초음파 트랜스듀서를 제안한 바 있다. [12][13] 본 연구진은 요철 트랜스듀서가 파라메트릭 어레이 트랜스듀서로 적합하다고 판단하여 기존의 요철 트랜스듀서를 두 가지 주파수에서 고출력, 고효율의 음파 방사가 가능한 형태로 제작하여 실험에 사용하였다. [14] 그림 2는 제작된 트랜스듀서의 형태 및 구조를 나타낸다. 구동부는 링 형태의 압전세라믹 두 개를 사용한 Langevin 트랜스듀서를 사용하였고, 여기서 발생한 음파는 stepped horn을 통해 증폭하여 방사판에 전달된다.

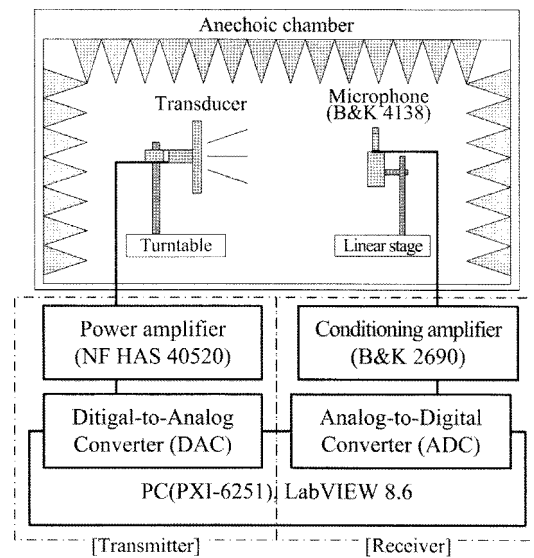


그림 1. 공기 중 파라메트릭 어레이 디지털 통신 시스템 구성
Fig. 1. Block diagram of airborne communication system using parametric array.

방사판에 부착된 요철은 두 가지 공진 주파수에서 방사판의 진동모드를 보강하는 역할을 한다. 트랜스듀서는 지름 5cm, 두께 5cm 공진 주파수는 80kHz, 120kHz로 디자인 되었다.

2.2. 송신부

그림 3 (a)는 파라메트릭 어레이 디지털 통신 시스템의 송신부를 나타낸다. 송신부는 그림과 같이 컨트롤러와 소프트웨어로 구성된 디지털-아날로그 컨버터, 파워 앰프로 구성된다. 트랜스듀서 공진에 맞추어 80 kHz, 120 kHz의 신호를 함수발생기에서 각각 발생시킨 후 이진 데이터와 곱하여 변조된 신호를 생성한다. 따라서 데이터 값이 1일 때는 심볼 타임 (symbol time) 동안 80 kHz, 120 kHz 주파수 신호를 생성하고, 0일 때는 심볼 타임 동안 신호를 발생시키지 않는다. 변조된 신호는 앰프를 통해 증폭되어 트랜스듀서에 인가된다.

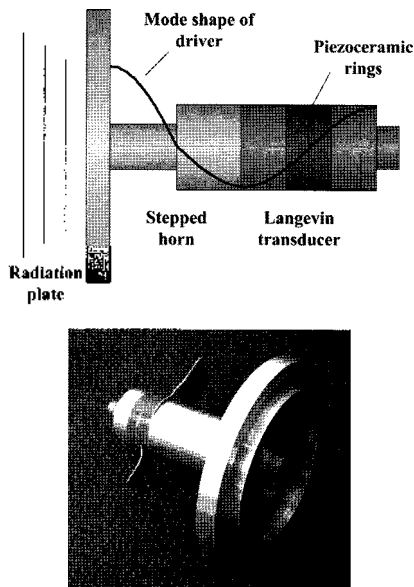


그림 2. 파라메트릭 어레이 응용을 위한요철 트랜스듀서 구조
Fig. 2. Structure of the stepped-plate transducer for parametric array.

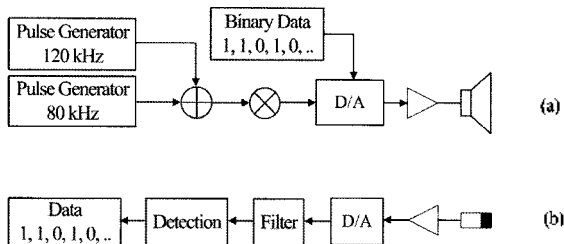


그림 3. 파라메트릭 어레이 디지털 통신 시스템.
(a) 송신부 (b) 수신부
Fig. 3. Digital communication system using parametric array.
(a) Transmitter (b) Receiver.

2.3. 수신부

그림 3 (b)는 파라메트릭 어레이 디지털 통신 시스템의 수신부를 나타낸다. 수신부는 그림과 같이 마이크로폰, 차지앰프, 아날로그-디지털 컨버터로 구성된다. 마이크로폰으로 측정된 신호는 차지 앰프를 통해 증폭된 후, 아날로그-디지털 컨버터를 통해 디지털 신호로 변환된다. 변환된 신호는 필터링을 통해 1차 음파인 고주파수 신호 (80 kHz, 120 kHz)를 없애고, 파라메트릭 어레이를 통해 발생한 차음인 40kHz 신호만 걸러낸다. 필터링된 신호는 절대값을 취해 적분하여 이진 데이터로 변환된다.

III. 실험 결과 및 고찰

3.1. 트랜스듀서 특성 분석

먼저, 통신 시스템의 정확한 분석을 위해 그림 4와 같이 트랜스듀서의 주파수 특성을 측정하였다. 트랜스듀서의 원거리 음장 영역인 1 m에서 20 Vpk의 입력전압을 트랜스듀서에 인가하여 측정하였다. 트랜스듀서의 근거리 음장 거리와 원거리 음장 거리를 구분하는 Rayleigh distance ($ka^2/2$, k 는 wave number, a 는 방사면의 반경)는 0.57 m로 계산되었다. 가장 높은 진폭을 가지는 공진 주파수는 83 kHz 와 122 kHz로 측정되었고 따라서 차음을 발생시키기 위한 1차 음파의 주파수를 83 kHz, 122 kHz로 선택하였다. 120 kHz 부근에서 측정된 두 가지 공진 주파수는 (118 kHz, 122 kHz) 방사판과 구동부 각각의 공진주파수로 이들이 일치하지 않아 나타난 효과라고 판단된다.

3.2. 전송 파형 분석

데이터 전송 파형을 측정하기 위하여 1 m 거리에서 100 Vpk의 전압을 트랜스듀서에 인가해 1, 0, 1, 1, 0, 0,

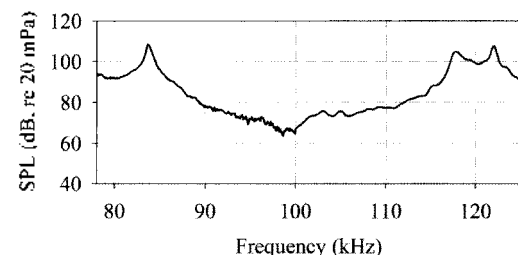


그림 4. 트랜스듀서 주파수 응답 특성
Fig. 4. Frequency response of the transducer.

1의 데이터를 전송하였다. 각 이진 데이터의 심볼 타임은 10ms로 주어졌다. 긴 심볼타임은 신호처리 하드웨어의 속도 문제로 추후 충분히 향상이 가능할 것으로 판단된다. 그림 5는 트랜스듀서에 인가된 (a) 송신 파형, 마이크로폰으로 측정된 (b) 수신 파형, 측정된 신호를 (c) 필터링 한 파형, (d) 적분된 파형을 나타낸다. 그림 5 (a)의 송신된 파형을 측정하여, 전송데이터에 맞추어 신호처리 장치에서 올바르게 변조된 신호가 발생함을 확인할 수 있었다. 하지만 마이크로폰으로 수신된 파형인 그림 5 (b)의 경우, 송신된 파형과 다른 형태의 파형을 보여주었는데, 이는 트랜스듀서가 충분히 가진 된 때까지의 소요되는 시간과 트랜스듀서의 잔향음에 의한 효과라고 판단된다. 트랜스듀서에 의해 발생된 음파는 충분히 가진 되

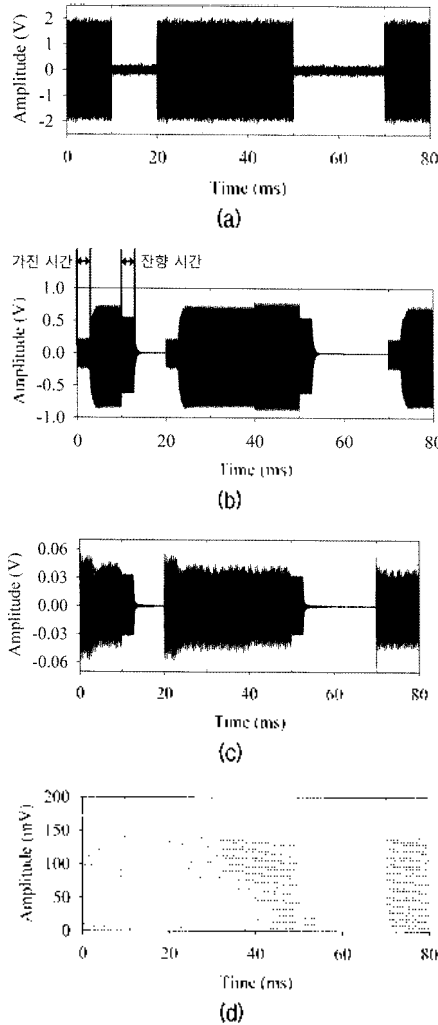


그림 5. 데이터가 {1, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 1} 일 때 전송 파형. (a) 송신 파형 (b) 수신 파형 (c) 필터링된 파형 (d) 적분된 파형

Fig. 5. Waveform for the binary data {1, 0, 1, 1, 1, 0, 0, 1}. (a) transmitted waveform (b) received waveform (c) filtered wave form (d) integrated waveform

어 최대 진폭에 도달할 때까지 약 3 ms의 시간이 소요되고, 신호가 사라진 후에도 잔향음에 의해 약 2.5 ms의 시간 동안 음파가 발생함을 그림5 (b)의 수신파형을 통해 알 수 있다. 이렇게 긴 과도응답 (transient response) 상태는 요철 트랜스듀서의 높은 Q factor (80 kHz: 325, 120 kHz: 1841)에 의해 유발된 것으로 판단된다. 또한, 통신 시스템에 사용된 요철 트랜스듀서는 압전소자에서 발생한 진동이 증폭부를 거쳐 방사판에 충분히 전달되어야 하므로, 정상상태에 도달하기까지 상대적으로 긴 시간이 걸렸을 것으로 판단된다. 긴 과도응답의 문제는 방사판 뒷면에 실리콘과 같은 댐핑 물질을 부착하여 Q factor를 낮춤으로서 해결 할 수 있을 것이라 판단된다. 그림5 (b)의 측정된 신호는 1차 음파의 고주파수 성분은 밴드패스 필터링하여 그림 5 (c)와 같은 필터링 된 신호를 얻을 수 있었다. 필터링 된 신호는 절대 값을 취하여 심볼 타임 (10 ms) 동안 적분한 값으로 그림 5 (d)와 같이 변환되었다. 적분값은 이진 데이터 값이 1일 때 약 150 mV,

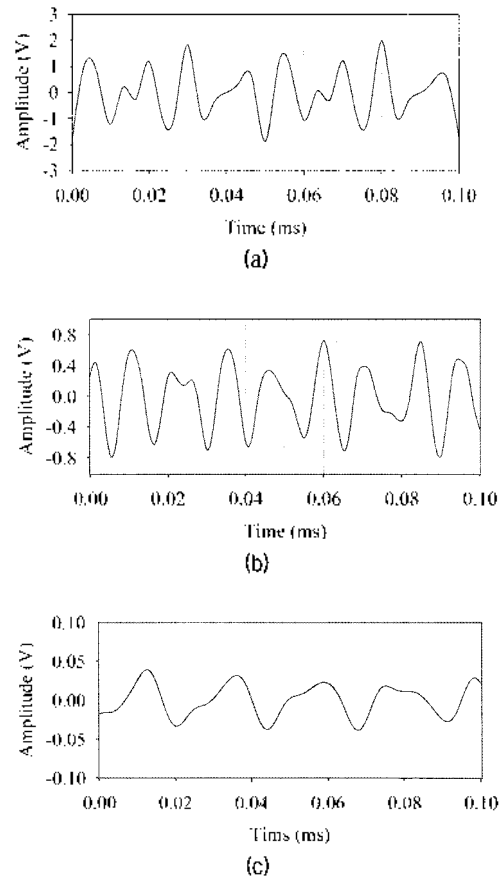


그림 6. 데이터가 1일 때 (a) 송신 파형 (b) 수신 파형 (c) 필터링 된 파형

Fig. 6. Waveform for the symbol 1. (a) transmitted waveform (b) received waveform (c) filtered wave form

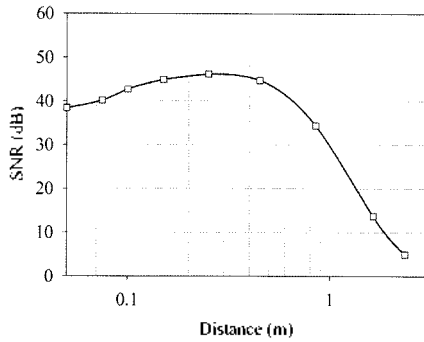


그림 7. 중심축에서 트랜스듀서로부터의 거리에 따른 SNR
Fig. 7. SNR vs the distance from transducer.

0일 때 최대 30 mV의 값을 출력하였다. 적분된 파형인 그림 5 (d)의 6번째 0과 7번째 0의 적분값이 다른 이유는 5번째 이진데이터 1에서 발생된 음파의 잔향음에 의한 효과라고 판단된다. 따라서 30 mV와 150 mV사이에서 문턱 값을 설정하여 전송 데이터를 판별하였다. 그림 6은 데이터가 1일 때 시간 축을 확대한 (a) 송신 파형 (b) 수신 파형 (c) 필터링 된 파형을 나타낸다. 그림 6 (b)의 수신된 파형의 주기가 83 kHz 신호의 주기 (0.0120 ms)와 잘 일치함을 확인할 수 있고, 이를 통해 트랜스듀서의 음파 발생 특성에 따라 83 kHz 신호가 더 크게 발생 되었음을 알 수 있다. 그림 4 (c)의 필터링 된 파형의 경우 39 kHz의 주기 (0.0256 ms)와 잘 일치함을 확인할 수 있고, 이를 통해 1차 음파인 83 kHz와 122 kHz 성분이 필터링을 통해 대부분 감소하고 파라메트릭 어레이를 통해 발생된 차주파수 성분이 지배적인 것을 확인하였다. 39 kHz 성분은 1차 음파에 비해 10 dB이상 높은 것으로 측정되었다.

3.3. SNR 측정

파라메트릭 어레이를 이용한 디지털 통신 특성을 파악하기 위해서 거리 및 각도에 따른 SNR을 측정하였다. 그림 7은 중심축에서 트랜스듀서로부터의 거리에 따른 SNR값을 나타낸다. 리니어 스테이지를 이용해 마이크로폰을 5 mm 에서 2500 mm 까지 이동하며 측정을 수행하였다. 파라메트릭 어레이로 발생된 차음의 경우, 1차 음파간의 상호작용으로 발생되므로 근거리에서는 낮은 음압을 가지다가 최대값을 가진 후, 구면확산 (spherical spreading)에 의해 감소한다. 그림 7에는 이러한 파라메트릭 어레이 특성이 잘 나타난다. 최대 SNR은 25 cm의 거리에서 46 dB로 측정되었다. 무향실 크기의 제약으로 2.5 m 이상을 측정해보진 못했지만, 측정 데이터로 미루어 보아 파라메트릭 어레이를 이용한 통신은 3 m 이내의 근거리 통신에 적합하다고 판단된다.

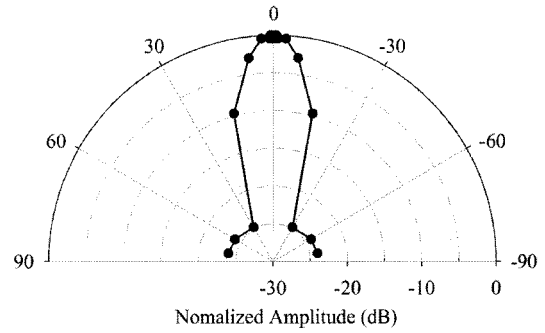


그림 8. 중심축에 대한 각도에 따른 SNR
Fig. 8. SNR vs the degree from acoustic axis.

그림 8은 트랜스듀서의 원거리 음장 영역인 1 m 거리에서 중심축에 대한 각도에 따라 SNR을 측정된 그래프이다. 중심축에서 80° 까지 트랜스듀서에 턴테이블을 부착하여 회전하며 측정을 수행하였다. 측정결과 3 dB 감소 빔폭은 11°로 측정되었고 중심축에서 30° 이상 떨어진 곳에서 25 dB이상의 SNR 감소를 볼 수 있었다. 위의 결과를 바탕으로 파라메트릭 어레이를 이용하여 고지향성 통신이 가능함을 확인할 수 있었다.

IV. 결론

본 논문에서는 공기 중 파라메트릭 어레이를 이용한 디지털 통신의 특성을 측정해 보았다. On-Off keying 방식을 이용하여 이진 데이터를 성공적으로 전송하였으며 파라메트릭 어레이 통신의 특성을 보기 위하여 거리 및 각도에 대한 SNR을 측정하였다. 그 결과 파라메트릭 어레이 통신의 부엽이 없는 고지향성 특성을 측정 할 수 있었다. 파라메트릭 어레이를 이용한 디지털 통신의 경우 근거리 영역의 고지향성 음향 통신 방법으로 사용될 수 있을 것으로 판단된다.

감사의 글

본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 대해 깊이 감사를 드립니다. (계약번호UT070054AD)

참고 문헌

1. K. Mizutani, N. Wakatsuki, and K. Mizutani, "Acoustic Communication in Air Using Differential Biphase Shift Keying with Influence of Impulse Response and Background Noise", *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 46, no. 7B, pp. 4541-4544, 2007.
2. L. Chuan, D. A. Hutchins, and R. J. Green, "Short-Range Ultrasonic Digital Communications in Air," *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control.*, vol. 55, no. 4, pp. 908-918, 2008.
3. M. C. Heard, "Short range communications using modulated ultrasound," *IEE Colloquium (Digest)*, pp. 2.1 - 2.3, 1983.
4. S. Holm, "Airborne ultrasound data communications: The core of an indoor positioning system," in *Proc. IEEE Ultrason. Symp.*, vol. 3, pp. 1801 - 1804, 2005.
5. R. A. Zurek, M. L. Charlier, and A. Dietrich, "Omnidirectional ultrasonic communication system," *U.S. Patent*, Mar. 26, 2002.
6. H. D. Haynes, M. A. Akerman, and V. M. Baylor, "Ultrasonic communication project phase 1 final report," *National Security Program, Office Rep. Y/NSP-252*, 2000.
7. K. Mizutani, T. Ebihara, N. Wakatsuki, and K. Mizutani, "Locality of Area Coverage on Digital Acoustic Communication in Air using Differential Phase Shift Keying," *Jpn. J. Appl. Phys.*, vol. 48 07GB07, 2009.
8. P. J. Westervelt, "Parametric acoustic array," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 35, no. 4, pp. 535 - 537, 1963.
9. H. Lee, D. Kang, and W. Moon, "A micro-machined source transducer for a parametric array in air," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 125, no. 4, pp. 1879 - 1893, 2009.
10. I. O. Wygant, M. Kupnik, J. C. Windsor, W. M. Wright, M. S. Wochner, G. G. Yaralioglu, M. F. Hamilton, and B. T. Khuri-Yakub, "50 kHz Capacitive micromachined ultrasonic transducers for generation of highly directional sound with parametric arrays," *IEEE Trans. Ultrasonics.*, vol. 56, no. 1, pp. 193 - 203, 2009.
11. B. K. Novikov, O. V. Rudenko, and V. I. Timoshenko, "Nonlinear Underwater Acoustics," pp. 71 ~ 97, The American Institute of Physics, New York, 1987.
12. A. Baron and J. A. Gallego-Juarez, "Flexural vibrating free-edge plates with stepped thicknesses for generating high directional ultrasonic radiation," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 51, no. 3B, pp 953 - 959, 1972.
13. J. A. Gallego-Juarez, G. Rodriguez-Corral, and L. Gaete-Garrelon, "An ultrasonic transducer for high power applications in gases," *Ultrasonics.*, vol 16, no.6, pp 267 - 271, 1978.
14. Yub Je, Jong-Kyu Park, Dong Hoon Yi, Haksue Lee, Wonkyu Moon, "A stepped plate transducer as ultrasonic range sensor," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 123, No. 5, Pt. 2, 2008.

저자 약력

•제업 (Yub Je)



1985년 1월 8일생
2002년 ~ 2005년 포항공과대학교 기계공학과 졸업
2006년 ~ 현재 포항공과대학교 기계공학과 통학과정

•이재일 (Jae-il Lee)



1981년 3월 29일생
2000년 ~ 2009년 제주대학교 해양산업공학과 졸업
2009년 ~ 현재 제주대학교 해양시스템공학과 석사과정

•이종현 (Chong-Hyun Lee)



1962년 10월 16일생
1990년 ~ 1995년 한국전자통신연구원 선임연구원
2000년 ~ 2002년 주 KM Telecom 연구소장
2003년 3월 ~ 2006년 1월 시경대학교 전기공학과 전임강사
2006년 3월 ~ 현재 제주대학교 해양과학대학 해양시스템공학과 조교수

•문원규 (Won-kyu Moon)



1961년 3월 22일생
1986년 ~ 1990년 한국원자력 에너지 연구소 연구원
1996년 ~ 1998년 삼성중합화학 기술원 연구원
2004년 ~ 현재 포항공과대학교 기계공학과 부교수