

# 수중 음향 디지털 송수신기의 DSP 구현 및 실험적 고찰

박종원\* · 최영철\* · 이덕환\* · 김시문\* · 김승근\* · 임용곤\*

\*한국해양연구원 해양시스템안전연구소

## Experimental Results on an Underwater Acoustic Digital Transceiver Based on DSP

Jong-won Park\* · Youngchol Choi\* · Duk-hwan Lee\* · Sea-moon Kim\* · Seung-geun Kim\* ·  
Yong-kon Lim\*

\*Korea Research Institute of Ships and Ocean engineering, KORDI

E-mail : poetwon@kriso.re.kr, ycchoi@kriso.re.kr

### 요 약

본 논문에서는 수중 음향 디지털 송수신기를 설계하고 DSP를 이용하여 구현하였으며 한국해양연구원 해양시스템안전연구소에서 보유하고 있는 무향수조 및 강원도 고성, 동해, 소양호 등에서 실험을 수행하였다. Quadrature phase shift keying (QPSK) 변조기술을 채택하였고, look-up table 기반의 효율적인 송신기 구조를 설계하였다. 13-symbols Barker code를 이용하여 에너지 검출 방식으로 프레임 동기를 획득하였고, FIR 필터 기반의 광대역 빔형성기, 적응 등화기 등과 같은 기저대역 디지털 신호처리 기법을 적용하였다. 광대역 빔형성기의 배열 센서 구조는 선형 등간격이며 4개의 센서를 이용하였다. 수중 음향 채널의 페이딩 특성을 극복하기 위해서 오류 정정 부호로써 1/2 길쌈부호화 방식을 채택하였으며 널리 사용되고 있는 Viterbi 복호기를 구현하였다. 무향수조 실험 및 실험실 실험을 통하여 설계한 디지털 송수신기 성능을 분석하였다.

### ABSTRACT

In this paper, an underwater acoustic digital transceiver is designed and implemented by a multiple DSPs system. We have designed a QPSK transmitter based on look-up table and 13-symbols Barker code is used for frame synchronization. Channel distortions are compensated by a wide-band beamformer based on FIR filter and an adaptive equalizer with RLS algorithm. Uniform linear array (ULA) with four elements is used for the spartial signal processing. 1/2 convolutional code and Viterbi decoder are implemented to overcome time-varying multi-path fading. Also, we show experimental results in the underwater anechoic basin at KRISO/KORDI and Goseong, Donghae and Soyang lake of Kangwon-do.

### 1. 서 론

수중 통신 채널은 fast fading과 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 수십 symbol에 해당하는 다중 경로 성분이 존재하는 경우도 있다[2]. 이러한 수중 통신 채널의 특성 때문에 과거에는 PSK나 QAM 등과 같은 phase-coherent 디지털 변조기법보다는 FSK 등과 같은 non-coherent 변조기법을 이용해서 수중 통신 시스템을 구현하였으나[1], 미국 WHOI에서

PSK 기법을 수중 통신에 적용한 결과를 발표한 이후로는 phase-coherent 변조기법을 활용한 수중 통신 시스템 연구가 활발히 진행되고 있다[2]. [2]에서는 결정 제한 등화기와 2차 DPLL을 동시에 최적화하였으며 시변 채널 특성을 보상하기 위해서 신호를 프레임 단위로 구성하고 훈련 신호를 이용하여 적응 등화기 가중치를 프레임마다 주기적으로 갱신하고 채널 트래킹을 하였다. 또한 실험 데이터를 이용하여 분석한 결과를 제시하였다.

수중 통신에서는 대부분 음파를 활용하고 있으며 원거리 전송을 위해서는 반송 주파수가 수십

KHz 미만이다. 따라서 수중 통신에서는 대역폭이 매우 작으므로 효율적인 대역폭 활용이 가장 중요하다. 대역폭이 제한된 통신 시스템의 경우에 전송 속도를 높이기 위해서는 PSK 등과 같은 phase-coherent 통신 기법을 채택할 수밖에 없다.

본 논문에서 우리는 수중 음향 디지털 송수신기를 설계하고 DSP를 이용하여 구현하였으며 한국해양연구원 해양시스템안전연구소에서 보유하고 있는 무향수조 및 강원도 고성, 동해, 소양호 등에서 실험을 수행하였다. Quadrature phase shift keying (QPSK) 변조기술을 채택하였고, look-up table 기반의 효율적인 송신기 구조를 설계하였다. FIR 필터 기반의 광대역 빔형성기, 적응 등화기 등과 같은 기저대역 디지털 신호처리 기법을 적용하였다. 광대역 빔형성기의 배열 센서 구조는 선형 등간격이며 4개의 센서를 이용하였다. 수중 음향 채널의 페이딩 특성을 극복하기 위해서 오류 정정 부호로서 1/2 길쌈부호화 방식을 채택하였으며 널리 사용되고 있는 Viterbi 복호기를 구현하였다. 또한 무향수조 실험 및 실험실 실험을 통하여 설계한 디지털 송수신기 성능을 분석하였다.

II. 디지털 송수신기 구조

우리가 설계한 디지털 송수신기는 QPSK 변조 기법을 채택하였으며 반송 주파수 25KHz, symbol rate 5KHz이다. 반송 주파수가 25KHz로써 낮기 때문에 증폭기를 제외한 통신 알고리즘은 모두 디지털 영역에서 구현하였다. 그림 1은 설계한 신호 프레임 구조이다.

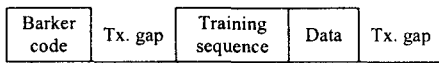


Fig. 4 Signal frame

프레임 동기 획득을 위해서 13-symbol Barker code가 삽입되고 원활한 matched filtering을 위해서 신호가 존재하지 않는 Transmission gap을 두었다. 적응 알고리즘 가중치 갱신을 위해서 훈련 신호가 삽입된다. 신호 프레임 길이는 채널이 시간에 따라서 변화하는 속도에 따라서 변화 가능하다. 전송기 구조는 일반적인 QPSK 변조기 구조를 채택하였으며 raised cosine 필터를 펄스 성형 필터로 사용하였다[5]. 그림 2는 수신기 구조이다. ADC 후에 디지털 데이터를 취득하면 주파수 변환부터 신호처리 알고리즘 전체를 DSP에서 구현하였다. 특히 간단한 복조기 구현을 위해서 ADC 표본화 주파수를 반송 주파수 25KHz의 4배인 100KHz로 하였으며 빔형성기와 적응 등화기는 symbol rate의 4배인 20KHz로 동작한다. 배열 센서는 4개로 구성되며 선형 등간격 구조이다. 송신기는 ADSP-TS101S 한 개를 이용하여 구현하였고 수신기는 4개를 이용하여 구현하였다.

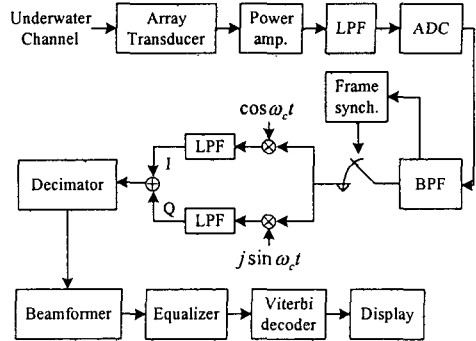


Fig. 5 수신기 구조

III. 무향수조 실험

실험실 시험에 앞서 디지털 송수신기 성능 검증을 위해서 한국해양연구원 해양시스템안전연구소에서 보유하고 있는 무향수조[3]에서 실험을 하였다. 반송 주파수, 표본화 주파수, 전송 거리를 변화시키면서 실험을 수행하였고 그 결과를 분석하였다. 그림 3은 무향수조 실험환경이다.

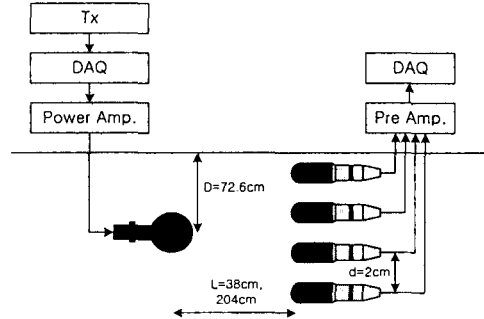


Fig. 6 무향수조 실험 구성도

무향수조 표면 반사 파의 시간 지연은 3~4 symbol에 해당하며[3], 빔형성기 및 등화기의 tap 수는 각각 8개와 20개이다. 신호 프레임 길이는 변화 가능하지만 수조에서는 시변 채널이 아니므로 250ms로 고정하였다.

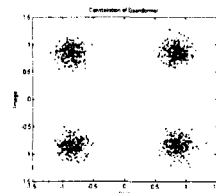


Fig. 7 빔형성기 정상도 (실험#1)

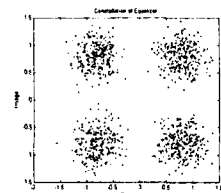


Fig. 8 등화기 정상도 (실험#1)

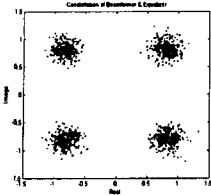


Fig. 9 빔형성기+등화기  
성상도(실험#1)

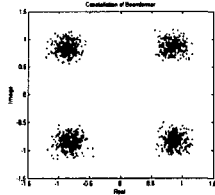


Fig. 10 빔형성기 성상도  
(실험#2)

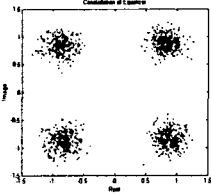


Fig. 11 등화기 성상도  
(실험#2)

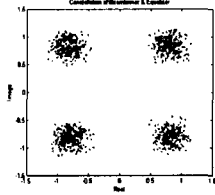


Fig. 12 빔형성기+등화기  
성상도(실험#2)

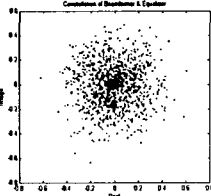


Fig. 13 빔형성기+등화기  
성상도(실험#3)

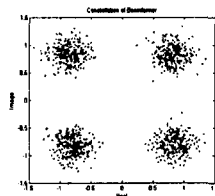


Fig. 14 빔형성기 성상도  
(실험#4)

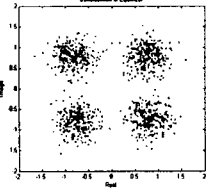


Fig. 15 등화기 성상도  
(실험#4)

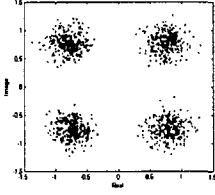


Fig. 16 빔형성기+등화기  
성상도(실험#4)

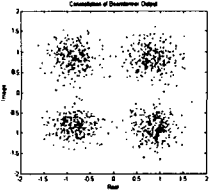


Fig. 17 빔형성기 성상도  
(실험#5)

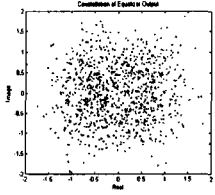


Fig. 18 등화기 성상도  
(실험#5)

실험#1: 중심 주파수 25 kHz, D/A 200 kHz, A/D 100 kHz, 송수신 거리 38 cm

그림 4부터 그림 6은 실험#1에 대한 빔형성기, 등화기, 빔형성기+등화기 출력의 성상도이다. 그림

4와 5를 비교하면 빔형성기가 등화기보다 성능이 우수한 것을 알 수 있고, 그림 4와 6을 비교하면 빔형성기와 등화기를 같이 적용한 경우에 빔형성기 단독인 경우보다 성능 향상 효과가 미미한 것을 알 수 있다. 이것은 광대역 빔형성기의 경우에는 협대역 빔형성기와는 달리 시간 뿐만 아니라 공간 영역에서 필터링을 수행하기 때문이다. 빔형성기는 4개의 채널 데이터에 대해서 적용하므로 SNR 측면에서도 등화기보다 유리하다. 적용 등화기만을 단독으로 사용하는 경우에는 결과가 위협스러운 수준인데, 적용 등화기 단독 성능 향상을 위한 연구가 추가적으로 더 필요한 것으로 사료되며, 우리는 여기에서 수중 음향 통신에서 빔형성기법이 매우 중요함을 알 수 있다. 추후 성능 향상을 위해서는 빔형성기와 적용 등화기를 독립적으로 적용하지 않고 동시에 최적화하는 알고리즘에 대한 연구가 필요하다고 생각된다. 전송 거리가 길어져서 다중 경로가 수십 symbol에 이를 경우, 빔형성기에서 미처 제거하지 못한 다중 경로 성분을 적용 등화기에서 제거할 수 있을 것으로 추정한다. 모든 경우에 대해서 오차는 없었다.

실험#2: 중심 주파수 50 kHz, D/A 300 kHz, A/D 300 kHz, 송수신 거리 38cm

실험#2는 실험#1과 비교했을 때 중심 주파수를 높였고 표면화 주파수를 증가시켰다. 가장 두드러진 결과는 등화기를 단독으로 적용하였을 경우에 성능이 향상된 점이다. 실험#1에서 등화기 단독 결과는 위협스러운 수준이었지만, 실험#2의 경우에는 빔형성기를 단독으로 적용하였을 경우보다 약간의 성능 저하는 있지만 비슷한 결과를 보였다. 따라서 광대역 빔형성 알고리즘은 중심 주파수 및 표면화 주파수에 대해서 민감하지 않지만 등화기는 중심 주파수 및 표면화 주파수에 크게 영향을 받음을 알 수 있다.

실험#3: 중심 주파수 25 kHz, D/A 200 kHz, A/D 100 kHz, 송수신 거리 205cm

실험#3, #4는 송수신 거리에 따른 디지털 송수신기의 영향을 고찰하기 위해서 실험#1, #2보다 송수신 거리를 204cm로 증가시켰다. 송수신 거리 증가에 따른 표면 반사 파의 크기가 커지면서 디지털 송수신기 성능 저하가 발생하였다. 센서 깊이가 얇은 상태에서 송수신 거리가 멀어지면 표면 반사 파의 세기가 직접 파의 세기에 점점 근접하면서 매우 큰 성능 저하를 일으킨다[6]. 특히 다중 경로 신호의 세기가 직접 파의 세기에 근접하면서 신호 대 잡음 비가 낮으면 통신이 불가능해진다. 실험#3에서는 통신이 전혀 불가능했다. 따라서 송수신 센서 깊이 및 전송 거리가 수중 음향 통신에 중요한 변수임을 알 수 있다.

실험#4: 중심 주파수 50 kHz, D/A 300 kHz, A/D 300 kHz, 송수신 거리 205cm

실험#4의 결과는 실험#2와 비교했을 때 신호 성상도가 퍼진 것을 알 수 있다. 등화기의 경우에만 수 bit 정도의 오류가 있었다. 여기에서도 다시 한번 확인할 수 있는 것은 수중 음향 통신에서 시간

영역에서의 신호처리 (적용 등화기) 기법만으로는 부족하며 빔형성 기법과 같은 공간 영역에서의 신호처리 기법이 성능 향상에 반드시 필요함을 알 수 있다.

실험#5: 중심 주파수 25 kHz, D/A 400 kHz, A/D 400 kHz, 송수신 거리 243 cm

실험 ⑩은 표본화 주파수가 송수신기 성능에 미치는 영향을 분석하기 위한 것으로써 실험#1과 비교했을 때, 표본화 주파수를 송수신 모두 400kHz로 증가시켰다. 실험#3에서는 통신이 불가능한 상태였지만 실험#5에서는 빔형성기를 적용한 경우에는 신호 성상도가 각 사분면에 모였으며 8-bit 정도의 오류가 발생하였으며 등화기 단독의 경우에는 통신이 불가능했다. 이와 같이 산발적으로 발생한 오류는 Viterbi 디코더에서 정정 가능하다. 우리는 이 실험결과로부터 표본화 주파수가 높을수록 성능이 향상됨을 알 수 있는데, 표본화 주파수가 빔형성기 및 등화기에 미치는 영향은 추가 실험을 통하여 더 체계적으로 정리할 예정이다. 이것은 표본화 주파수가 높을수록 우리가 송신하고자 하는 신호에 가장 근접하는 신호를 송신하며 수신시 좀더 정확한 데이터를 얻을 수 있기 때문이다. 또한 표본화 주파수가 커지면 신호 대 잡음 비가 증가하였다.

#### IV. 실험역 실험

우리는 구현한 디지털 송수신기를 고성, 동해, 소양호 등에서 3회에 걸쳐서 실험역 실험을 진행하였다. 지면 관계상 이것들 중에서 동해 대진항 연안에서 실시한 실험 결과를 중심으로 요약하겠다. 약 3톤 어선 2척을 이용하여 각각 송신과 수신을 구분하였고 수심 60m 지역과 200m 지역에서 데이터를 취득하였다. 수심 60m에서는 송수신 센서 깊이가 30m이고 수심 200m에서는 80m이다. 신호 프레임 길이는 50ms, 100ms, 250ms로 변화시켰다. 250ms 경우에는 그림 19에서 알 수 있는 것처럼 도플러 효과가 매우 심해서 DPLL이 보정을 하지 못해서 통신이 불가능하였다. 50ms에서는 안정적인 성능을 보였다. 불행하게도 프레임 길이가 짧을수록 데이터 수율이 저하된다. 우리는 실험역 실험을 통해서 신호 프레임 길이가 50ms~100ms 정도면 DPLL이 없이도 통신에 지장이 없으며 신호 프레임 길이를 길게하기 위해서는 channel tracking 및 DPLL 알고리즘 보완이 필요한 것으로 결론을 내렸다. 시험 도중 전력증폭기 결함으로 다양한 전송 거리에 관한 결과를 얻지 못하였다. 송수신 거리는 30~50m 사이였다. 그림 16은 수심 60m 지역에서 취득한 배열 데이터 중에서 수신 상태가 가장 좋은 채널 데이터를 시간 영역과 주파수 영역에서 표시한 것이다. SNR이 15dB 정도 되는데, 복원 신호 성상도는 흩어짐이 심하다. 원인은 여러가지가 있겠지만, 4개의 채널 데이터가 일정치 않은 것이 하나의 원인이 될 수 있다. 채널#4의 경우 SNR이 3dB 정도밖에 되지 않았다. 향후, 이와 같

은 원인을 정확히 규명하고, 신호처리 알고리즘 보완을 진행할 예정이다.

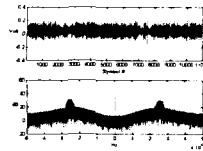


Fig. 19 수신 데이터(250ms, 60m)

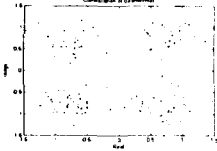


Fig. 20 복원 신호 성상도(50ms, 200m)

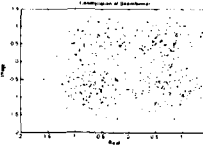


Fig. 21 복원 신호 성상도(100ms, 200m)

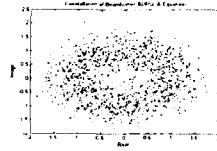


Fig. 22 복원 신호 성상도(250ms, 60m)

#### 후 기

본 연구결과는 과학기술부의 국가지정연구실 과제 "수중 3차원 푸전영상 생성, 탐지 및 전송기술개발" 연구결과의 일부임을 밝힙니다.

#### 참고 문헌

- [1] D. Kilfoyle and A. Baggeroer, "The state of the art in underwater acoustic telemetry," IEEE J. of Oceanic Eng., Vol. 25, Jan. 2000, pp. 4-27.
- [2] M. Stojanovic, J. Catipovic, and J. Proakis, "Phase-coherent digital communications for underwater acoustic channels," IEEE J. Oceanic Eng., vol. 19, pp. 100-111, Jan. 1994.
- [3] S. Kim, C. Lee, Y. Choi, J. Park, and Y. Kim, "An experimental model of surface reflection in the underwater anechoic basin at KRISO," Proc. UT 2002, 2002, pp. 257-260.
- [4] Y. Choi, S. Kim, J. Park and Y. Lim, "A Phase Coherent Transceiver for Underwater Acoustic Communication without PLL and DLL," Proc. ISPC 2003.
- [5] J. G. Proakis, Digital Communications, McGraw-Hill, 1983
- [6] 임용곤 외, "초음파를 이용한 수중 영상정보 전송기술 개발" 연구보고서, 2003.