

천해역에서의 실시간 수중 데이터 통신 시스템 구현

백혁* · 박종원** · 임용곤**

*경상대학교 정보통신학과

**한국해양연구원 해양시스템안전연구소

The Implementation of a Real-time Underwater Acoustic Communication System at Shallow water

Hyuk Baek* · Jong-Won Park** · Yong-Kon Lim**

*Department of Communication and Information, the College of Marine Science, Gyeong Sang National University

**Maritime and Ocean Engineering Research Institute(MOERI)/KORDI

E-mail : hbaek@kordi.re.kr

요 약

본 논문은 시변하는 열악한 수중환경에서 복잡도를 줄이면서 강인한 수중 음향 데이터 통신 시스템의 구현내용과 천해역에서의 실험결과를 다루고 있다. 실험역 시험시의 복잡하고 시변하는 실험환경에 쉽게 적용할 수 있도록 수중음향센서와 증폭기를 제외한 모든 부분을 디지털화된 송신 시스템과 수신 시스템으로 구현하였다. 프레임 동기방식으로 CAZAC 시퀀스가 사용되었고, 중심주파수 25kHz와 대역폭이 5kHz를 갖는 QPSK 변복조 방식이 사용되어 오버헤드를 포함하여 10kbps의 전송율을 가질 수 있도록 설계되었으며, 전송 효율을 향상시키기 위해서 적응 빔형성기, 적응 등화기, 컨볼루션/Viterbi 부호화기 등과 같은 여러 가지 기술이 사용되었다. 개발된 시스템의 성능검증을 위해서 거제도 장목연안의 수심 8m에서 실시간 데이터 통신 시험을 수행하였으며, 전송거리 7.4km에서 10kbps의 전송속도를 가지고 영상 데이터가 성공적으로 전송되었음을 확인하였다.

ABSTRACT

In this paper, we present an implementation and it's real-sea test of an underwater acoustic data communication system, which allows the system to reduce complexity and increase robustness in time variant underwater environments. For easy adaptation to complicated and time-varying environments of the ocean, all-digital transmitter and receiver systems were implemented. For frame synchronization the CAZAC sequence was used, and QPSK modulation/ demodulation method with carrier frequency of 25kHz and a bandwidth of 5kHz were applied to generate 10kbps transmission rate including overhead. To improve transmission quality, we used several techniques and algorithms such as adaptive beamforming, adaptive equalizer, and convolution coding/Viterbi decoding. For the verification of the system performance, measurement of BER has been done in a very shallow water with depth of 8m at JangMok, Geoje. During the experiment, image data were successfully transmitted up to about 7.4km.

키워드

Underwater Acoustic Modem, Underwater Communication System, CAZAC

1. 서 론

최근 들어, 석유·천연가스와의 같은 에너지 자원고갈에 대비하기 위해서 해저에 존재하고

는 미래 에너지 자원(망간단괴, 가스 수화물 등)에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 6,000m 수심 이상의 심해에 대륙판의 비틀림에 의해 자연적으로 생성되는 열수 분출구 주변의 광산자

원과 서식하고 있는 고대생물 및 희귀한 생물종에 대한 유전자 연구가 전 세계적으로 활발히 추진되고 있다. 또한, 해난사고에 의해 좌초된 대형선박에 대한 조사 및 회수작업, 해저 케이블 포설 및 관리, 기뢰제거용 자율무인잠수정(Autonomous Underwater Vehicle, AUV) 등의 수중에서의 탐사 및 작업에 대한 수요가 끊임없이 증가하고 있다. 나아가 수중 초음파 통신에 기반한 네트워크 구축을 통한 실시간 해양환경 모니터링에 대한 연구가 선진 외국을 중심으로 진행되고 있다[1].

1.1 수중 데이터 통신 분류

수중에서 사용되는 통신은 크게 전원과 신호 케이블이 포함되어 있는 테더(Tether) 케이블과 광케이블에 의한 유선통신과 초음파를 이용한 무선통신으로 구분할 수 있다. 수중에서 유선통신은 높은 전송속도를 가지고 먼 거리의 데이터 전송이 가능하다는 장점을 가지고 있으나, 먼 거리의 케이블에 걸리는 해류 및 고압의 영향으로 수중에서의 연구 및 작업을 하는데 이동성의 한계를 갖는 단점이 존재한다. 그리고, 수중에서의 무선통신은 배터리를 내장한 시스템에 탑재되어 사용되며 이동성이 확보되는 장점을 가지고 있으나, 낮은 전송속도와 짧은 전송거리의 한계를 갖는다는 단점을 갖고 있다.

1.2 수중 데이터 통신을 위한 초음파 특성

일반적인 통신매체로서 많이 사용되고 있는 광파(Optic Wave)나 전자파는 수중에서 거리에 따른 급격한 신호 감쇠현상[2]을 갖고 있어, 전송거리가 수백 m의 범위 이상에서 사용할 수 있는 범용의 수중 통신에 있어 초음파가 유일한 통신 전달매체로서 사용되고 있다.

수중에서 초음파는 전송거리와 주파수 특성에 반비례의 관계를 가지고 있어 주파수가 높을수록 전송거리가 짧아지고, 주파수가 낮을수록 전송거리가 길어진다. 한편, 통신 시스템의 전송속도는 사용되는 주파수의 대역폭에 비례하여 증가되는 특성을 갖고 있다. 따라서 먼 거리 전송을 위해서는 낮은 주파수를 사용하여야 하지만 이 경우에 전송속도는 낮아지게 되어 수중에서의 데이터 통신효율이 나빠지고, 높은 전송속도를 얻기 위해서는 높은 주파수를 사용하게 되면 전송거리가 짧아지는 특성을 가지고 있다[2].

전송거리에 따라 제한되는 주파수 특성을 가지고 높은 전송속도를 얻기 위해서는 중심주파수를 중심으로 수중에서 초음파 신호를 발생하고 수신하기 위해 사용되는 초음파 센서가 넓은 주파수 대역폭을 갖고 있어야 하는데, 실제적으로 위상과 크기가 모두 균일한 넓은 주파수 대역폭을 갖는 초음파 센서 설계가 매우 어렵기 때문에 일반적인 수중음향 통신 시스템은 낮은 전송속도를 갖는 특징을 가지고 있다.

또한, 부유물과 파도에 의해서 음파의 산란(Scattering) 현상, 파도의 부서짐과 선박의 프로펠러에 의한 배경잡음, 해류의 이동에 따른 도플러(Doppler) 현상, 음파의 반사로 인한 다중경로(Multi-path) 현상 등은 수중에서 초음파를 이용한 통신의 열악한 환경조건으로 작용하며, 수중에서의 음속의 비균질적인 특성으로 인해 초음파가 수신위치에 따라서 전달되지 않는 지역(Shadow Zone, 음파 음영구역)이 존재한다는 특징을 갖고 있다.

본 논문에서는 수중음향 데이터 통신 시스템의 설계·구현과 천해역에서의 실험결과를 소개하고 있다.

II. 수중음향 데이터 통신 시스템 설계

그림 1은 본 논문에서 설계한 수중음향 데이터 통신 시스템의 구성도를 보여준다. 그림에서 데이터는 수중영상의 샘플을 채취하여 디지털화된 영상정보(8bit Gray level, 132*100)를 사용하였으며, 주파수 효율이 우수한 QPSK 변복조 방식, 프레임기반 동기방식, 적응 등화기, 빔형성기, 부호화 기법 및 Block Interleaving 등의 신호처리 기법을 사용하여 설계하였다.

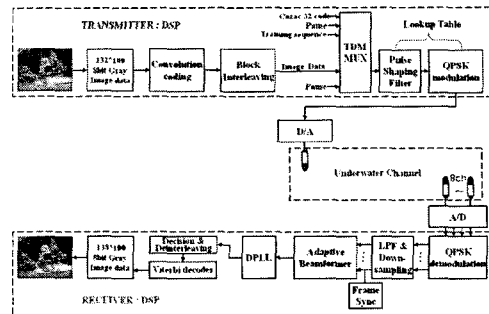


그림 1. 수중 음향 데이터 통신 시스템 구성도

수중음향 통신채널은 수중에서 초음파의 전달속도(약 1500m/s)가 느리기 때문에 수중에서의 통신오류가 발생을 하였을 경우에 데이터 재전송이 어려운 환경을 가지고 있다. 따라서 본 논문에서는 1/2 convolutional 부호화 기법 및 Viterbi 기법을 이용하여 통신오류가 발생하더라도 부호화된 데이터를 이용하여 데이터 복구가 가능하도록 설계하였으며, 부호화된 신호중에서 연속적인 신호가 계속 전송되는 경우에 대하여 반송파의 Phase Lock을 잃어버리는 현상을 막기 위하여 혼화기(Scrambler) 기법을 도입하였다.

또한, 실제 수중음향 통신채널은 시간에 따라서 변화하는 다중경로 전파특성으로 인해서 발생하는 페이딩(Fading) 현상에 의해서 SNR(신호대 잡음비 : Signal to Noise Ratio)가 매우 작아지는 경우에 오류가 연속적으로 발생하게 되는

데, 본 논문에서는 오류가 시간 영역에서 독립적으로 발생하도록 데이터를 분산시키는 방법인 Block Interleaving 방식을 사용하여 설계하였다.

해저면과 표면의 반사로 인한 다중경로는 수중에서의 초음파 통신에 가장 크게 전송성능에 영향을 주는 요인으로서, 다중경로를 상쇄하기 위하여 적응 등화기(Adaptive Equalizer)와 광대역 빔형성기(Beamforming)과 같은 디지털 신호처리 기법이 필요하다.

수중 음향 데이터 통신에서는 반송주파수(수십 kHz)에 비해 높은 대역폭(수 kHz)을 갖고 있어 일반적으로 사용되는 협대역 빔형성기에서는 상대 대역폭이 증가할수록 성능이 저하되는 특성을 가지고 있다[3]. 따라서 본 논문에서는 수중음향 데이터 통신을 위해서는 광대역 빔형성기 구조를 사용하였다.

빔형성기 신호처리 기법은 다중경로를 갖는 수신 신호에 대해서 특정 방향으로 수신되는 다중경로만을 선택하여 수신하는 공간적인 필터링을 함으로 다중경로의 영향을 상쇄하고 신호대 잡음비를 향상시키는 기법이며, 적응 등화기는 빔형성기를 거쳐 수신된 다중경로를 제거하는 기법으로 사용된다. 최근에는 수중 음향 데이터 통신 시스템에 적응등화기와 빔형성기를 함께 사용되는 구조를 채택하고 있으며[4], 본 논문에서도 그림 1과 같이 혼합 구조를 갖는 시스템으로 설계하였다.

수중음향에서의 데이터 통신은 주로 배터리를 내장하는 형태의 운용이 대부분이기 때문에 연속적인 데이터 전송방식이 아닌 버스트(Burst) 데이터 전송방식을 사용하는 것이 매우 효과적이며, 본 논문에서는 Barker 코드와 CAZAC Sequence를 사용한 데이터 도움(Data-Aided) 방식에 의한 프레임 동기방식을 사용하여 설계하였다[3][5].

그리고, 한정된 주파수 대역폭의 효율을 극대화하기 위해서 QPSK 변복조 방식을 적용하였으며, I채널과 Q채널에 반송주파수로 천이하는 과정에서 계산량을 줄이기 위해서 Look-up table 방식의 QPSK 시스템으로 설계하였다[6][7].

III. 수중음향 데이터 통신 시스템 구현 및 실험적 시험결과

설계되어진 알고리즘에 대한 성능검증을 하기 위해서 DSP(Digital Signal Processing) 프로세서 기반의 수중 음향 데이터 통신 시스템을 구현하였으며, 그림 1의 초음파 센서와 증폭기를 제외한 모든 알고리즘을 DSP상에서 구현하는 All Digital 수중음향 데이터 통신 시스템을 제작하였다.

프레임 동기를 위해서 카작(CAZAC) 신호열을 사용하였는데, 구현된 수중음향 데이터 통신

시스템은 QPSK 변복조 방식을 사용하고 있기 때문에 I 채널과 Q 채널로 프레임이 입력되어진다. 그림 2는 CAZAC 신호열을 이용한 프레임 구조를 보여준다.

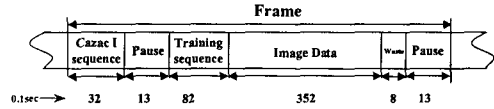


그림 2 CAZAC 신호열 이용한 신호프레임 설계

구현된 시스템은 한 프레임을 전송하는데 100ms가 소요되도록 프레임을 설계하였고, 한 프레임은 2에서 알 수 있듯이 헤더(Header)를 포함하여 총 500비트로 구성되어 있어 1초에 5k bit를 전송할 수 있게 된다. 본 시스템은 QPSK 변복조 방식을 사용하고 있기 때문에 I 채널과 Q 채널을 합하게 되면 총 10k bit의 전송효율을 갖는 프레임을 가지게 된다.

그림 3은 최종 구현된 DSP 프로세서 기반의 수중음향 데이터 통신 시스템의 사진을 보여주며, 송신부와 수신부로 구성되는 단방향 데이터 통신 시스템으로 제작되었다. 그림 4는 수신측 수중음향 데이터 통신 시스템의 GUI 화면을 보여주며, 수신된 신호의 A/D 신호 및 스펙트럼, 필터 출력, 빔형성기 성상도 및 수신 영상을 보여준다.



그림 3. 구현된 수중음향 데이터 통신 시스템

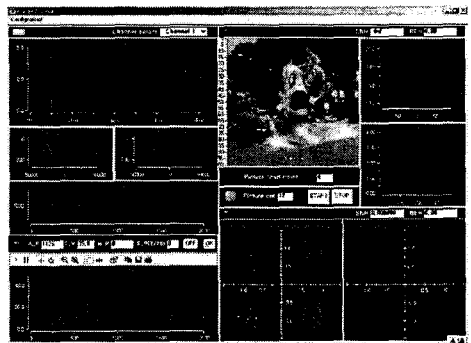


그림 4. 수신측 수중음향 데이터 통신 GUI

그림 3과 같이 제작된 수중음향 데이터 통신 시스템의 성능검증을 위해서 거제도 잠복역안에서 실험적 시험을 수행하였으며, 송신기와 수신

기 사이의 거리는 약 7.4km로 수심 8m의 천해역에서 시험을 수행하였다. 실험에 사용된 초음파 센서는 25KHz의 중심주파수와 5KHz의 대역폭을 가지며, 송신은 140배(43dB)의 증폭기와 단일센서로 구성되어 있으며, 수신은 만배(80dB)의 증폭비를 갖는 증폭기와 8개의 선형 배열센서로 구성되어 있다.

7.4km의 거리, 수심 약 8m에서 CAZAC 신호 열 기반의 프레임 구조를 갖는 영상 데이터를 전송하였을 때, 표 1과 같은 전송성능을 측정한 결과 샘플을 얻었다. 표에서 BER은 Bit Error Rate로서 1×10^{-3} 은 1000비트를 보낼 때 1 비트의 에러가 발생한다는 의미를 갖으며, 최소 BER은 약 1×10^{-4} 이었으며, 평균 BER은 약 1×10^{-3} 이었다. 실험에 전송 시험을 통하여 현재의 육상 이동통신에서 요구하는 BER 1×10^{-3} 값에 준하는 성능을 보임으로써 DSP시스템 및 알고리즘이 실시간으로 수중에서 영상 전송이 가능하다는 것을 검증하였다.

표 1 수중음향 데이터 통신 시스템의 실험 결과 : BER 특성(CAZAC)

	1차	2차	3차	4차	5차	6차	7차	8차	9차
BER ($\times 10^{-5}$)	110	56	180	120	15	140	62	97	83

IV. 결론

본 논문에서는 수중에서 초음파를 이용한 데이터 통신 시스템에 대한 설계·구현 및 실험에서의 성능시험 결과를 보여준다. 수중에서 초음파를 이용한 데이터 통신 시스템을 설계할 때의 고려해야 할 내용과 극복하기 위한 디지털 신호처리 기법을 제안하였으며, 설계된 수중음향 데이터 통신 시스템을 실험 시험을 통해서, 다중경로의 영향이 큰 천해 수평채널 환경에서 7.4km 전송거리에서 최초로 10kbps의 전송속도로 데이터를 성공적으로 전송하였음을 소개하였다. 또한, 프레임 동기방식, Look-up Table 방식의 QPSK 변복조 기법, 적응 등화기와 빔형성 혼합 구조 등을 최초로 적용하여, 실험 시험을 통해서 성능검증을 보여주었다.

향후, 보다 정확한 성능검증을 위해서는 보다 많은 실험을 하고, 천해역에서의 수평채널에서 뿐만 아니라 심해에서 수직채널에서의 실험 시험을 수행하여 보다 객관적인 성능검증을 수행할 계획이다. 또한, 새로 개발된 동기화 기법과 디지털 신호처리 방식을 사용하여 수중 무선 네트워크 구축을 위해서 필요한 새로운 양방향 수중 음향 통신 시스템에 대한 연구를 진행할 계획이다.

후 기

본 연구결과는 한국해양연구원의 기본연구사업인 “수중 탐사선단의 스마트 네트워크 및 운용기술 개발” 과제, “수중 3차원 푸진영상 생성·탐지 및 전송기술 개발” 과제, 해양수산부의 “수중 무선통신 시스템 개발” 과제에서 수행된 연구결과 중 일부를 밝히며, 연구비 지원에 감사드립니다.

참고문헌

- [1] 박종원, “수중음향 버스트 통신을 위한 프레임 동기 연구,” 아주대학교 박사학위논문, 2006.2
- [2] Xavier Lurton, *An Introduction to Underwater Acoustics*, Springer, Dec. 2002
- [3] 한국해양연구원, 초음파를 이용한 수중 영상 정보 전송기술 개발 1단계 보고서, 산업자원부, 2002.10
- [4] 박종원 외, “A Digital Acoustic Transceiver for Underwater Acoustic Communication,” 한국음향학회 논문집 24권 3E호, pp.109-114, 2005.9
- [5] 김승근 외, “Joint Phase and Frequency Offset Estimator for Short Burst MPSK Transmission with Preamble,” 한국음향학회 논문집 제24권 4E호, 2005.12
- [6] 박종원 외, “초음파를 이용한 수중 버스트 전송에서 높은 과샘플을 기반 QPSK 수신기의 프레임 동기 방안,” 한국음향학회지 24권 8호, pp.462-468, 2005.11
- [7] 김승근 외, “Phase Tracking Loop Parameter Computing Algorithm in the Underwater QPSK Transmission,” ISOPE2005, vol.2, pp.336-341, 2005.6