

직접수열 확산대역 방식 기반 수중 이동 통신 모뎀 구현

김승근[°], 김시문^{*}, 백혁^{*}

Implementation of an Underwater Acoustic Mobile Modem Based on the Direct Sequence Spread Spectrum Scheme

Seung-Geun Kim[°], Sea-Moon Kim^{*}, Hyuk Baek^{*}

요약

본 논문에서는 6.25kHz의 반송주파수에서 약 2.1kHz의 대역폭을 사용하고, 심볼당 16개의 칩심볼로 확산하여 약 97.6 심볼율을 갖는 직접수열확산 기반 수중 이동 통신 모뎀 구현에 대해 설명한다. 구현한 수중 이동 통신 모뎀은 수신기에서의 신호처리를 간단하게 하기 위해 DQPSK 변조를 사용하였다. 또한, 한 패킷 길이 동안 통신 모뎀의 이동 속도가 변하는 것에 대응하기 위해 한 패킷을 20개의 부프레임으로 나누어 전송하고, 수신부에서는 부프레임별로 도플러 편이를 추정하여 부프레임별로 이를 보상하는 방법을 사용하였다. 구현한 모뎀의 실험 정보 데이터 전송속도는 부호율 1/2인 Turbo 부호를 사용할 때 약 82.5bps이고, 부호율 2/3인 Turbo 부호를 사용할 때 약 109.8bps이다. 구현한 모뎀은 채널시뮬레이터를 이용하여 18m/s까지 이동속도에서 잘 동작함을 검증하였으며, 정상출력의 1/10 크기로 낮추고 5km 거리에서 성공적으로 데이터를 수신함을 실증하였다. 구현한 모뎀은 장거리 이동환경에서 단문 메시지 등을 전달하기 위한 용도로 사용될 수 있을 것이다.

키워드 : 수중통신모뎀, 수중이동통신, 수중장거리통신, 확산대역통신, 도플러편이

Key Words : Underwater Modem, Underwater Mobile Communications, Underwater Long-range Communication, Spread Spectrum Communication, Doppler Shift

ABSTRACT

In this paper, we describe the implementation of an underwater acoustic mobile modem based on direct sequence spread spectrum scheme using a bandwidth of about 2.1kHz at a carrier frequency of 6.25kHz and spreading to 16 chip symbols per symbol with a channel symbol rate of about 97.6 symbol/sec. The implemented underwater acoustic mobile modem uses DQPSK modulation to simplify signal processing in the receiver. In addition, in order to respond to a change in the movement speed of the modem within one packet, one packet is divided into 20 sub-frames and transmitted, and the receiver estimates the Doppler shift for each sub-frame and compensates for the Doppler shift for each sub-frame. The effective information data transmission speed of the implemented modem is about 82.5bps when using the Turbo code with a code rate of 1/2, and about 109.8bps when using the Turbo code with a code rate of 2/3. The implemented modem is

※ 본 연구는 해양수산부 재원으로 해양수산과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(수중 광역 이동통신 시스템 기술개발/1525010926).

•° First and Corresponding Author : Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Ocean System Engineering Research Division, sgkim@kriso.re.kr, 중신회원

* Korea Research Institute of Ships & Ocean Engineering, Ocean System Engineering Research Division, smkim@kriso.re.kr, 정회원; hbaek@kriso.re.kr

논문번호 : 202205-098-D-RU, Received May 11, 2022; Revised May 23, 2022; Accepted June 2, 2022

well operates at a moving speed of up to 18m/s using a channel simulator, and it is successfully received data at a distance of 5km in the shallow water when an other implemented modem transmits data with the 1/10 of the normal output amplitude. The implemented modem will be used for the purpose of delivering a short message in a long-distance mobile environment.

1. 서 론

수중에서 무선으로 장거리 정보 전송을 할 수 있는 현재까지 알려진 유일한 방법은 음파를 이용하는 것이고^[1], 전송하려는 거리가 멀어짐에 따라 사용할 수 있는 주파수는 낮아지고, 가용한 대역폭은 줄어든다^[2-4]. 이는 주로 주파수가 높아짐에 따라 바닷물에서 음파의 흡음이 높아져 신호 감쇠가 커지고, 주파수에 따라 환경잡음의 주요발생요소와 특성이 다르기 때문이다^[3-4]. 이러한 물리적 특성으로 인해, 수중 음파 통신에서 통달거리에 따라 사용가능한 주파수의 제약으로 통신 주파수 대역이 수kHz~수십kHz 정도로 매우 협소한 대역폭을 사용하기 때문에 데이터 전송 속도가 매우 낮은 특성이 있다^[2,3].

수중에서 확산대역 통신은 하나의 데이터를 여러 칩(Chip)심볼 구간으로 나누어 보내어 대역폭에 비하여 전송속도는 낮아지지만 낮은 SNR에서도 강인한 특성이 있어 장거리 통신에 사용되거나^[5], 낮은 피탐을 요구하는 응용이나^[5], 음파신호가 해양생물에 미치는 영향을 경감하기 위해^[6] 사용된다. [5]에서는 13.5kHz의 반송주파수와 4.8kHz의 대역폭에서 19bps(255 칩확산)에서 320bps(15 칩확산)의 전송속도를 갖는 직접수열 확산 전송방식을 천해역 400-500m 거리에서 시험하였다. [6]에서는 17kHz의 반송주파수와 4kHz의 대역폭을 사용하고, 직접수열 대역확산 방식을 사용하여 8bps 전송속도를 갖는 방식을 3.4km 거리에서 시험하였다. [7]에서는 10km 거리에서 8kHz 대역폭을 이용하여 최대 140.69bps의 통신을 시험하였다. 국내 연구로는 동해 3km 거리에서 반송주파수 6kHz, 대역폭 약 2 kHz 대역폭을 사용한 직접 수열 확산방식을 사용하고, 칩심볼 단위 등화기를 적용하여 100bps 전송속도를 갖는 실험을 하였다^[8]. 또한, 심볼당 63개의 칩심볼로 확산시킨 후 직접수열 3개를 중첩하여 24bps의 전송속도를 갖는 수중 통신 방식을 동해 20km 거리에서 2,750Hz의 반송주파수와 1,536Hz의 대역폭을 사용하여 실험하였다^[9].

송수신기간의 상대적인 이동에 의해 도플러(Doppler) 편이가 발생한다^[10]. 도플러 편이가 발생하면 낮은 전파속도(약 1500m/s)로 인해 그 영향이 매

우 크게 나타나며, 신호의 길이가 도플러 편이에 비례하여 늘어나거나 줄어들고, 그 위상 또한 주파수 편이가 발생한 것과 같은 외곡이 발생한다^[10]. 시간축과 주파수 축에서 심각한 외곡을 일으키는 도플러 편이를 보상하여야 올바른 데이터 복원을 할 수 있다. 10m/s 이상 고속으로 이동하는 환경에서 사용할 수 있는 도플러 편이 추정 방법 및 확산대역 변조 신호의 수신 방법을 [11]에서 제안하였다. 제안한 방법은 자기상관 특성이 우수한 64 길이의 Frank 신호열을 프리엠블로 두 번 반복하고, 수신부에서는 두 단계에 걸쳐 도플러 편이를 추정하고 보상한다. 제안한 방법을 적용하여 거제도 해역에서 이동성이 없는 경우부터 약 5.8m/s의 간격으로 약 17.5m/s의 이동속도까지 통신거리가 증가하는 방향으로 이동하는 경우를 가정한 가상 이동 신호를 5km 거리에서 데이터를 성공적으로 수신함을 실험하였다. 이때 데이터 전송을 위해 6.25kHz 반송주파수에서 약 2.1kHz 대역폭을 사용하고, 심볼당 16개 칩으로 확산하여 약 97.6 심볼율을 갖는 DQPSK 변조를 사용하는 직접수열 확산대역변조를 사용하였다.

또한, 직접수열 확산대역방식을 사용하는 상용제품은 Tritech사의 Micron 모델^[12], L3사의 GPM300^[13], 탈레스사의 TUUM-6^[14], ELAC사의 UT3000^[15] 등이 있다. Micron 모델은 20~28kHz 대역을 사용하여 500m 거리에서 40bps의 전송속도를 갖는다. 이외의 상용제품들은 군사적인 응용에 사용되어 스펙의 일부만 공개되어 있다. GPM300은 사용하는 반송주파수 대역은 공개하지 않고 있으며, 45km 거리에서는 전송속도 10baud이고, 25km거리에서는 전송속도 100baud이고, 5km 거리에서는 전송속도 1000baud를 갖는다. TUUM-6는 1~60kHz 대역에서 다양한 변조방식을 사용하며, 200bps의 전송속도를 가진다. UT3000은 1~60kHz대역을 사용하고, 디지털 데이터 전송을 위해 직접수열확산대역방식을 사용한다고 알려져 있으며, 그 이외의 스펙은 공개되어 있지 않다.

한국해양과학기술원 부설 선박해양플랜트연구소에서는 30km 거리와 10m/s의 이동 속도에서 100bps급 전송속도를 갖는 수중 이동 통신 모뎀을 개발하고 있다. 30km의 통신 거리와 10m/s의 이동 속도에서 사용

할 수 있도록, 직접수열 확산변조방식을 사용하고, 높은 이동속도 지원을 위해 도플러 편이 추정 및 보상 방법을 제안하였다^[11]. [11]에서 제안한 방법은 약 5초 길이의 한 패킷 시간 동안 도플러 편이와 채널응답이 변하지 않는다고 가정을 하였으나, 이동 통신 모뎀이 동작하는 환경에서는 패킷 중간에 이동 속도가 변할 수 있고, 채널응답도 변할 수 있다. 이러한 실제 환경을 고려하여, 패킷구조를 보완하였으며, 도플러 편이 추정방법도 [11]에서 제안한 방법을 수정하여 수중 이동 통신 모뎀을 구현하였다. 본 논문에서는 직접수열 확산 대역 방식 기반으로 구현한 수중 통신 모뎀에 대하여 설명한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 제2장에서는 수중 이동 통신 모뎀 플랫폼에 대해 간략하게 설명하며, 소스레벨 측정 결과를 제시한다. 제3장에서는 구현한 수중 이동 통신모뎀의 패키지구조, 송신 신호 생성 방법 및 절차, 수신 신호처리 방법 및 절차에 대해 설명한다. 제4장에서는 신호처리 절차에 따라 송신 기능과 수신 기능을 플랫폼에 구현한 것에 대해 설명하며, 모뎀 동작을 모니터링 및 제어하기 위한 운용 GUI구현에 대해 설명한다. 제5장에서는 구현한 수중 이동 통신 모뎀의 실시간 동작 검증, 이동에 따른 도플러 극복 성능 검증, 실험역 동작 검증 등에 대해 설명하며, 마지막으로 제6장에서 결론을 맺는다.

II. 수중 이동 통신 모뎀 플랫폼

본 장에서는 수중 이동 통신 모뎀 플랫폼에 대해 설명한다. 수중 이동 통신 모뎀 플랫폼에 대해서는 [16]에서 자세히 설명하고 있으며, 본 논문에서는 간략하게 설명한다.

2.1 수중 이동 통신 모뎀 플랫폼[16]

수중 이동 통신 모뎀 플랫폼은 수밀구조를 갖는 하우징에 음향 센서부와 전자부를 포함하여 조립되어 있고, 그 형상과 크기는 그림 1과 같다. 플랫폼의 센서부는 668mm의 길이이고, 전자부 길이는 663mm에 직경이 240mm인 원통형 구조를 갖는다. 수중 이동 통신 모뎀 플랫폼의 센서는 그림 1과 같이 4개의 센서로 구성된 배열 음향 센서이고, 플랫폼의 전자부는 그림 2와 같이 전원공급보드, 송신앰프 보드, 아날로그 신호처리보드, FPGA보드, 주제어보드 및 인터페이스보드 등으로 구성되어 있다.

음향 센서는 수중 통신의 반송주파수와 신호의 대역폭을 고려하여 5kHz~8kHz 에서 수평방향으로 무

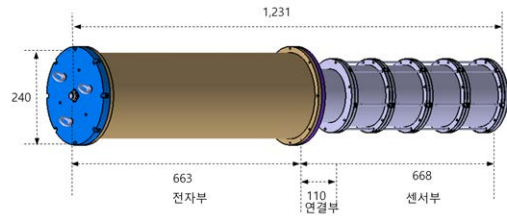


그림 1. 수중 이동 통신 모뎀 플랫폼 형상 및 크기
Fig. 1. Shape and size of underwater mobile modem platform



그림 2. 수중 이동 통신 모뎀 플랫폼의 전자부
Fig. 2. Electric part of underwater mobile modem platform

지향 빔패턴을 갖는 센서를 제작하였다. [16]에서 설명한 바와 같이 10개의 단일 센서를 제작하여 이중 성능이 좋은 8개를 선택하고, 각각 4개의 센서를 수직으로 배열하여 2개의 배열 음향 센서를 제작하였다. 제작한 2개의 배열 음향 센서의 송신전압감도(TVR: Transmitting Voltage Response)는 그림 3에서와 같이 6kHz에서 약 154 dB re uPa/V@1m이다. 2개의 배열 음향 센서의 수신전압감도(RVS: Receiving Voltage Sensitivity)는 그림 4와 같이 5kHz~8kHz사이에서 -176~-168 dB re V/uPa의 범위이다.

수중 통신 모뎀의 변복조 신호처리를 담당하는 신호처리부는 그림 5와 같이 주제어보드, FPGA보드, 아날로그신호처리보드 및 인터페이스보드로 구성된

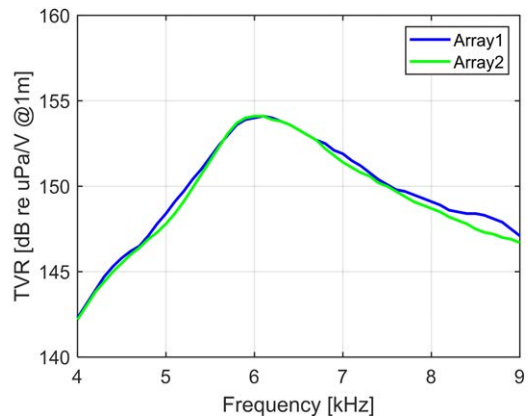


그림 3. 배열 음향 센서의 송신전압감도
Fig. 3. TVR of array acoustic sensor

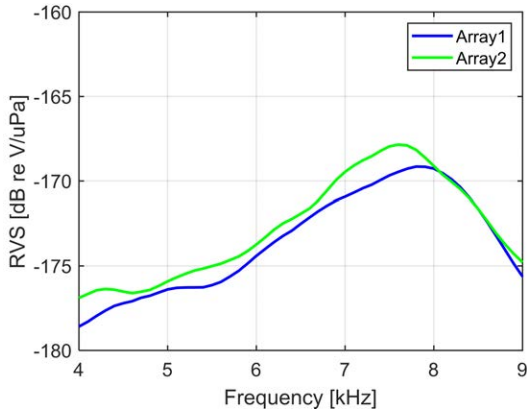


그림 4. 배열 음향 센서의 수신전압감도
Fig. 4. RVS of array acoustic sensor



그림 5. 주제어보드, FPGA보드, 아날로그 신호처리보드 및 인터페이스보드로 구성된 신호처리부
Fig. 5. Signal processing unit composed with main control board, FPGA board, analog signal processing board and interface board

다. 신호처리부는 4채널의 신호를 송신 및 수신할 수 있으며, 100kHz 이상의 샘플율로 DAC를 수행할 수 있다. 신호처리부는 인터페이스보드를 통해 동작에 필요한 전원을 공급받고, 송신증폭기보드와 연동한다. 인터페이스보드에는 2축 자세 및 온도를 측정할 수 있는 센서를 포함하여, 수중에서 운용될 때 모델의 자세 및 내부 온도를 모니터링 할 수 있다.

그림 2의 수중 이동 통신 모델 플랫폼은 선상에서 전원을 공급받고, 운용 프로그램과 데이터 교환 및 제어 명령을 전달한다. 수중 통신 모델의 부팅상황 모니터링 및 긴급 시스템 제어를 위해 시리얼통신을 사용하며, 운용 프로그램과 모델간 데이터 교환 및 제어 명령 전달을 위해 TCP/IP기반의 이더넷을 사용한다. 수중 이동 통신 모델과 수상부를 연결하는 수중케이블의 길이가 약 150m이므로, RS232 통신이 불가능하며, 수중케이블의 스펙제한으로 이더넷 데이터 전송이 불가능하다. 이러한 문제를 해결하기 위해 구현한 수

중 이동 통신 모델 플랫폼에서는 선상부와 정보교환을 위해 시리얼통신인 RS232신호를 긴 거리 통신이 가능한 RS422로 변환하여 수중 케이블 구간에서 데이터를 전달하고, 수상의 인터페이스모듈에서는 다시 RS422을 RS232신호로 변환하여 운용프로그램으로 전달한다. 또한, 이더넷 데이터 전송을 위해 수중 통신 모델과 수상의 인터페이스모듈에 각각 VDSL모뎀을 두어 수중케이블에서는 VDSL통신이 이루어지도록 하였다.

2.2 수중 이동 통신 모델 플랫폼의 소스레벨 측정

수중 이동 통신 모델 플랫폼에서 실제로 낼 수 있는 출력신호의 크기인 소스레벨을 수조에서 측정하였다. 소스레벨 측정은 [16]에서 구현한 데이터 취득기능을 이용하여 측정하였다. 송신신호는 2kHz부터 10kHz까지 변하는 LFM(Linear Frequency Modulation)신호를 100kHz로 샘플링한 신호를 미리 생성하여 사용하였다. 수중 통신 모델과 수신부는 2m 거리를 두고 수조에서 소스레벨을 측정하였다. 5kHz ~ 8kHz사이의 소스레벨을 측정한 결과가 그림 6에 있다. 그림에서 보면 개별 센서는 183.4~185.6 dB의 소스레벨을 가지며, 4채의 채널을 동시에 사용하면 194.1 dB의 소스레벨을 갖는다.

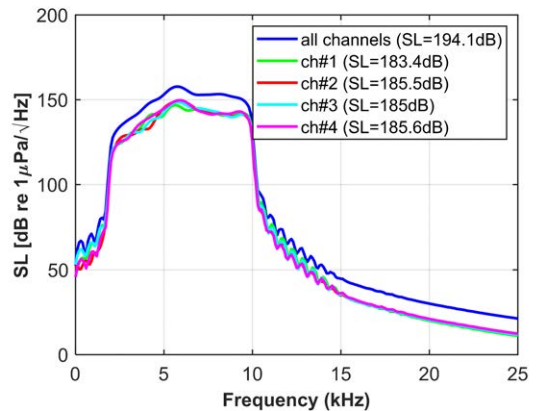


그림 6. 소스레벨 측정 결과(5-8kHz)
Fig. 6. Results of source level measurement(5-8kHz)

III. 수중 이동 통신 모델 신호처리 구조

3.1 패킷 구조

구현한 수중 이동 통신 모델은 직접수열 대역확산 방식을 사용한다. 데이터 전송을 위해 DQPSK

(Differential- QPSK) 성상도를 갖는 심볼을 사용하였다. 하나의 데이터 심볼은 16개의 칩심볼로 확산한다. 확산 칩심볼은 QPSK신호를 사용하고, 16칩심볼 길이를 갖는 Frank 심볼열^[7]을 사용하였다. DQPSK 변조 방법은 수신부에서 위상동기를 찾지 않아도 되는 장점이 있으며, RAKE구조를 갖는 수신기에서 다중경로 성분을 결합할 때 각 다중경로별 위상차에 의해 발생하는 영향이 없어 수신기 구조를 간단하게 할 수 있는 장점이 있다^[16].

구현한 수중 이동 통신 모델에서 사용하는 패키지 구조는 그림 7과 같다. 모델의 수중 이동에 따른 도플러 편이를 극복하기 위해 하나의 패키지는 20개의 부프레임으로 구성되며, 한 개의 부프레임은 26개의 DQPSK 심볼 길이를 갖는다. 패키지의 시작부에는 4 심볼 길이(64칩심볼)를 갖는 프리앰블 신호열을 두 번 반복하고, 부프레임 사이에는 4심볼 길이를 미드앰블 신호열이 있으며, 패키지의 마지막에도 4심볼 길이를 갖는 테일앰블 신호열을 두었다. 패키지에서 프리앰블, 미드앰블 및 테일앰블 신호열은 동일한 신호를 사용하며, 자기상관 특성이 우수한 64길이의 Frank 신호열을 사용하였다. 64길이의 Frank 신호열은 8-PSK 신호를 갖는 다중위상(Polyphase) 신호열이다^[17]. 부프레임의 데이터 심볼은 차동변조인 DQPSK를 사용하며, DQPSK 변조는 이전 심볼구간에서의 전송심볼과 2 bit의 전송 데이터를 조합하여 현재 심볼구간에서 전송할 심볼을 결정한다. 차동 변조 방식은 기준위상을 제공하는 심볼을 첫 번째 심볼로 전송한다. 본 논문에서 설계한 패키지구조에서는 각 부프레임의 앞에 있는 프리앰블 또는 미드앰블의 마지막 심볼을 기준위상으로 하여 DQPSK 심볼 매핑을 수행하는 방법을 제안

한다. 이러한 방법을 통해 각 부프레임에서 차동변조의 기준위상을 제공하기 위한 심볼 전송을 하지 않아 전송효율을 높일 수 있는 장점이 있다.

수중 이동 통신 모델을 통해 전송하는 정보 데이터는 채널에서 발생하는 오류에 대응하기 위해 Turbo부호를 채널부호로 사용하고, 데이터 패킷의 무결성을 확인하기 위해 8bit 길이의 CRC를 추가하여 전송한다. 구현한 수중 이동 통신 모델에서는 채널부호의 부호율을 1/2와 2/3을 사용할 수 있으며, 본 논문에서는 부호율 1/2를 기준으로 설명한다. 부호율 1/2인 채널 부호는 그림 8과 같이 한 패키지에는 최대 514bit의 데이터를 전송할 수 있으나, 패키지당 데이터 전송량을 8bit의 배수로 맞추기 위해 한 패키지당 전송하는 정보 데이터 504bit로 설정하였으며, 데이터의 무결성을 확인하기 위해 8bit의 CRC를 추가하여 512bit의 길이를 갖도록 하였다. 그림 9와 같이 생성다항식이 8진수로 $g_0 = 15_{oct}$, $g_1 = 13_{oct}$ 로 표시되는 부호율 1/2인 RSC(Recursive Systematic Convolutional) 부호를 사용하여 데이터 신호열과 512bit 크기를 갖는 인터리버를 거친 데이터 신호열을 각각 RSC 부호의 입력으로 하여 부호율 1/3인 부호를 생성하고, Puncturing을 통해 부호율 1/2인 Turbo부호를 생성한다^[18]. Turbo 부호화기에서 512bit 데이터는 1024 부호화 비트로 변환되며, 12bit 길이를 갖는 Turbo부호의 Tail bit를 1024부호화 비트에 이어 배치하고, 4bit의 0인 비트를 추가하여 하나의 패키지를 구성하는 1040bit 길이의 비트열 데이터를 생성한다. 앞에서 504bit를 전송하는 경우에 대해 설명하였으며, 패키지에서 전송가능한 최대 정보 데이터량인 506bit를 전송하고자하는 경우에는 인터리버 크기와 Tail bit의 위치만 변경하면 되기 때

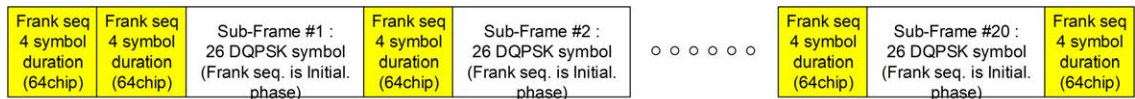


그림 7. 패키지 구조
Fig. 7. Packet structure

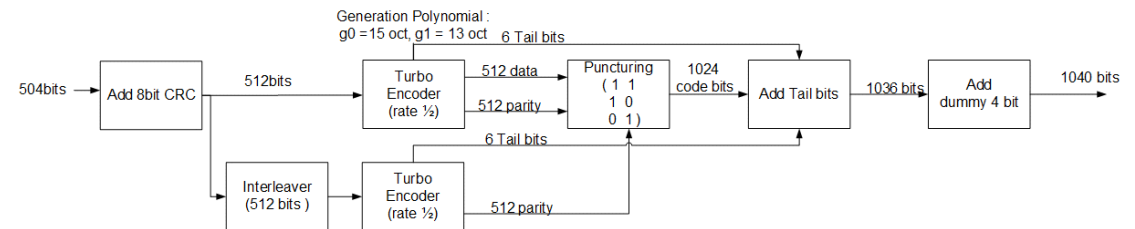


그림 8. 패키지 데이터 생성구조
Fig. 8. Packet data generation structure

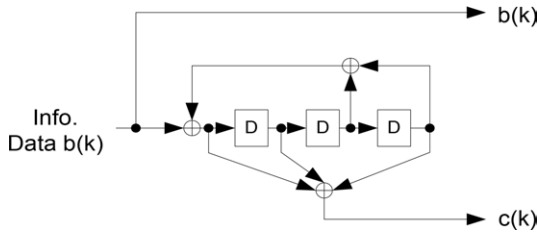


그림 9. RSC 부호기 구조
Fig. 9. RSC encoder structure

표 1. 패킷 생성 파라미터
Table 1. Packet generation parameters

Parameters	Value
Carrier Frequency	6.25kHz
Chip Rate	1.5625kHz
Processing Gain	16
Spreading sequence	Frank 16 sequence
Channel Symbol Rate	~97.65 symbol/sec
Symbol Mapping	DQPSK
Preamble/Midamble/Tail-amble sequence	Frank 64 sequence
sub-frame number per packet	20
symbol number per sub-frame	26
channel data bits per packet	1040 bits
Packet length	~6.226 sec
max. info. data bits per packet(Rate 1/2; Rate 2/3)	514 bits ; 684 bits
Effective info. data bit transmission rate (Code Rate 1/2; Rate 2/3)	~82.5bps ; ~109.8bps

문에 용이하게 확장가능하다.

앞에서 설명한 패킷구조 파라미터를 표 1에 정리하였다.

3.2 수중 이동 통신 모뎀 송신 신호 생성

수중 이동 통신 모뎀에서 생성된 패킷 데이터를 그림 7과 같은 패킷구조로 송신하는 절차는 그림 10과 같다. 생성된 패킷데이터를 부프레임 단위로 나누고, 부프레임 데이터는 프리앰블 또는 미드앰블의 마지막 신호의 위상을 초기값으로하여 DQPSK 심볼로 변환을 수행하고, 변환된 DQPSK 심볼은 한 심볼당 16개의 칩심볼을 곱해 확산심볼로 변환한다. 송신부에서는 패킷구조에 맞추어 Frank 64 심볼과 확산 심볼로 변환된 부프레임 심볼을 선택하여 PSF(Pulse-Shaping Filter)의 입력으로 사용한다. PSF에서는 입력심볼을 8배로 샘플율을 높인 신호를 생성한다. PSF는

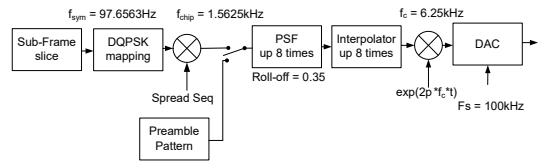


그림 10. 송신 신호 처리 구조
Fig. 10. Transmission signal processing structure

Roll-off를 0.35를 사용하는 RRC(Root-Raised Cosine) 필터를 사용한다. PSF출력은 다시 8배 인터폴레이션을 수행하여 최종적으로 64배 과샘플링 이산 신호열을 생성한다. 인터폴레이션된 신호열은 6.25kHz인 반송주파수 대역의 신호로 변조되고, 변조된 신호는 100kHz의 샘플율을 갖는 DAC를 거쳐 아날로그 신호로 변환된다. DAC변환된 아날로그 신호는 1차 저역통과필터를 거쳐 송신증폭기에서 증폭되어 음향 센서로 송신된다.

3.3 수중 이동 통신 모뎀 수신신호처리

구현한 수중 이동 통신 모뎀의 수신부 신호처리는 그림 11과 같다. 수중 채널을 거쳐 음향 센서로 수신된 신호는 아날로그 증폭기와 대역통과필터를 통과하여 ADC에 입력되고, ADC에서는 100kHz로 샘플링을 수행한다. 샘플링된 신호는 Demixing을 수행하고, 저역통과필터링을 통해 기저대역 신호로 변환한다. 기저대역 신호로 변환 후, 수신 신호는 데시메이션을 수행하여 25kHz로 샘플링한 신호로 변환한 후 수신신호처리를 수행한다.

수신부에서는 가장먼저 패킷의 시작을 찾는 패킷동기를 수행한다. 패킷동기는 수신신호와 64 칩심볼 길이를 갖는 프리앰블과의 상관값의 에너지와 수신신호의 에너지를 비교하여, 이 비율이 설정한 문턱값 이상일 때 패킷시작 후보 선정 연산을 시작한다. 이때, 다중경로환경을 고려하여 일정 샘플 길이의 관찰구간을 설정하여, 관찰 구간 안에서 상관값이 최대가 되는 값을 첫 번째 대푯값이라 하고, 첫 번째 대푯값을 갖는 샘플의 시작 인덱스를 패킷 시작 후보로 선정한다. 그림 7의 패킷구조에서 보듯 프리앰블, 미드앰블 및 테일앰블에서 문턱값을 넘는 상관값을 가질 수 있기 때문에, 프리앰블이 두 번 반복되는지를 검출하여 패킷의 시작지점으로 선정한다. 이를 위해 앞에서 계산한 패킷 시작 후보에서 프리앰블 길이인 64 칩심볼만큼 떨어진 샘플점을 기준으로 최대 도플러편이에 의해 신호가 먼저 도달하거나 지연되는 샘플시간차를 포함한 관찰구간을 설정한다. 설정한 관찰구간의 샘플을 프리앰블과 상관값을 계산하고, 이중 최대값을 두 번

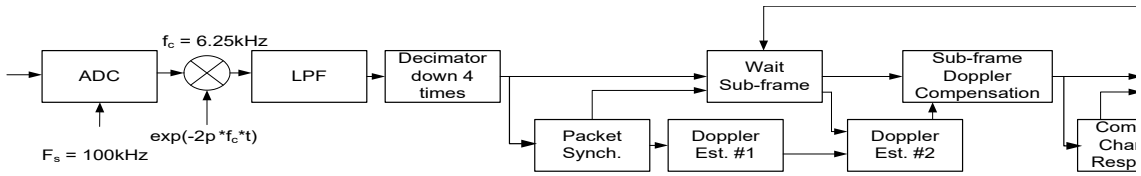


그림 11. 수신 신호처리 구조
Fig. 11. Receiving signal processing structure

째 대표값으로 선정한다. 첫 번째와 두 번째 대표값을 비교하여, 두 값의 상대적 크기가 설정한 문턱값 이상인 경우, 앞에서 선정된 패킷 시작 후보를 패킷 시작 샘플로 결정한다. 패킷 시작 샘플 결정 후, 패킷 시작 결정에서 두 번째 대표값을 얻는 샘플의 시작 샘플과 패킷 시작 샘플과의 차이를 계산하여 두 번 반복되는 프리앰블 구간에서 초기 도플러 편이를 추정한다.

패킷 시작을 검출하면, 수신부는 추정된 도플러 편이를 고려하여 첫 번째 부프레임과 부프레임 다음의 미드앰블까지 수신할 때까지 기다린다. 수신이 완료되면, 앞에서 추정된 도플러 편이와 도플러 편이 추정오차를 고려하여 미드앰블이 존재할 수 있는 구간의 샘플열과 프리앰블 신호열과의 상관값을 계산하고, 최대 상관값을 갖는 수신 신호열의 시작 샘플값을 계산한다. 앞에서 추정된 도플러 편이에 의해 계산되는 미드앰블의 시작 샘플값과의 차를 이용하여 도플러 편이 추정오차를 계산하고, 이 추정오차를 앞에서 추정된 도플러 편이에 더해 첫 번째 부프레임 구간에서의 도플러 편이를 추정한다. 추정된 도플러 편이를 적용하여 부프레임 앞의 프리앰블 또는 미드앰블 구간부터 부프레임 구간까지 도플러 편이 보상을 수행한다. 도플러 편이 보상은 리샘플링과 위상회전의 연산을 거치는 두 단계로 수행한다.

앞에서 설명한 초기 도플러 편이 추정방법은 [11]에서 제안한 두 단계에 방법 중 첫 번째 단계의 도플러 편이 추정방법과 동일하나, 패킷구조의 차이로 이후의 도플러 편이 추정 및 보상절차는 상이하다.

도플러 보상을 한 프리앰블 또는 미드앰블 구간의 샘플과 프리앰블 신호열과의 상관값을 다시 계산하여, 채널순시응답과 부프레임의 시작위치 샘플을 결정한다. 결정된 부프레임의 시작위치부터 역확산기의 입력으로 하여 한 부프레임에 대해 역확산을 수행한다. 역확산된 신호는 DQPSK Demapper에서 복호된다. 이때 앞에서 설명한 것과 같이 프리앰블 또는 미드앰블의 마지막 심볼의 위상을 기준 위상으로 하여 DQPSK Demapper가 연산을 수행한다. 앞에서 설명한 역확산부터 DQPSK Demapper 연산은 채널 순시응답을 기

반으로 결정된 다중 경로 성분들에 대해 반복적으로 수행한다. RAKE 결합기에서는 선정된 다중경로 성분들에 해당하는 DQPSK Demapper의 출력을 결합한다. RAKE 결합기는 다중 경로 성분들을 결합하며, 최대 16개까지 다중경로 성분들을 결합할 수 있도록 하였다. 이러한 RAKE 결합기에서의 다중경로 성분결합은 독립적인 경로를 갖는 다중경로 신호의 결합으로 볼 수 있다. 이후, 첫 번째 부프레임에 대한 RAKE 결합 결과를 저장한다.

첫 번째 부프레임에 대한 연산을 마친 후, 두 번째 부프레임 및 미드앰블 데이터가 수신이 완료될 때까지 기다린 후, 첫 번째 부프레임 수신이 완료되었을 때 수행한 연산을 동일하게 반복하고, 이러한 반복은 한 패킷 수신을 완료할 때까지 반복한다.

한 패킷에 대한 수신이 완료되면, 각 부프레임별로 신호를 정규화한다. 정규화한 심볼열은 Turbo 복호기로 전달되어 채널 복호를 수행한다. Turbo 복호기는 처음 3번의 반복 복호를 수행한 후, 복호한 데이터에 대해 CRC 체크를 수행한다. CRC 체크에 성공하면 복호한 데이터를 수신 데이터로 전달한다. CRC 체크에 성공하지 못하면, 다시 3번의 반복 복호를 수행하고, CRC 체크를 수행한다. CRC 체크를 성공하지 못한 경우, 최대 15번의 반복 복호를 수행하도록 하였다.

IV. 수중 이동 통신 모뎀 구현

수중 이동 통신 모뎀은 동일한 센서를 이용하여 송신과 수신을 수행하고, 모뎀간 통신시 동일한 주파수를 사용하므로, 반이중방식으로 송신과 수신을 수행한다. 모뎀의 송신기능은 패킷을 송신하는 경우에만 동작하지만, 수신기능은 항상 동작하도록 하였다. 아래에 송신기능과 수신기능의 구현에 대해 구체적으로 설명한다.

4.1 송신기능 구현

수중 이동 통신 모뎀의 송신기능 구현을 위해 DSP와 FPGA가 사용되었다. 그림 8과 그림 10의 신호처

리구조에서 패킷 데이터 생성 및 부프레임으로 분할부터 PSF입력까지 DSP에서 구현되었으며, PSF부터 DAC구동부까지는 FPGA에서 구현되었다.

DSP에서 송신기능은 세 개의 태스크로 구현되었다. 첫 번째 태스크는 네트워크 계층 또는 운용 GUI에서 송신데이터와 송신명령을 전달 받아, 한 패킷에 대해 송신해야하는 칩심볼 단위 심볼들을 생성하여 버퍼에 저장하는 역할을 담당한다. 두 번째 태스크는 신호를 송신하기 위해 송신 증폭기용 고전압 생성을 활성화하고, 플랫폼이 송신모드로 동작하도록 제어하고, 저장한 데이터를 DSP프로세서의 DMA 엔진^[19]과 McASP^[20] 채널을 통해 순차적으로 FPGA로 전송하도록 설정하여 구동시켜 FPGA에서 반송파 신호를 DAC를 통해 전송하게 한다. 세 번째 태스크는 패킷의 전송이 완료되면 동작하는 기능으로, FPGA에서 송신완료 신호를 수신하여 송신 증폭기의 전원을 끄며, 외부 칩들을 수신모드로 동작하게 제어하는 역할을 담당한다.

수중 통신 모뎀에서는 8PSK 심볼매핑만 사용하지만, FPGA에서는 다양한 변조방법의 전송이 가능하도록 8PSK, 16QAM, 16ASK 등의 심볼매핑 기능을 구현하였으며, I/Q채널의 심볼 매핑도 직접할 수 있도록 하였다. 또한, PSF로 Roll-off 계수가 0.3과 0.35인 RRC 필터를 선택할 수 있도록 하였다. FPGA는 그림 12에서와 같이 4개의 센서에 독립적으로 신호를 송신할 수 있도록 동일한 4개의 송신신호처리 블록이 병렬로 구현되어 있다.

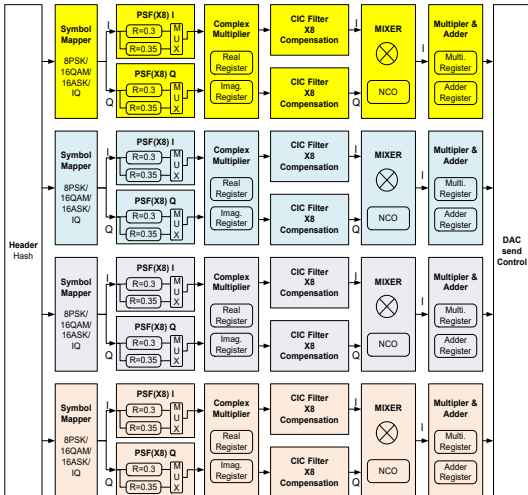


그림 12. FPGA에 구현한 송신기능 블록도
Fig. 12. Functional block diagram implemented in FPGA for generating TX signal

DSP에서 FPGA로 보내는 송신 데이터는 그림 13과 같이 32bit 단위로 구성되는데, 헤더정보가 8비트이고, 심볼 데이터가 24bit로 구성된다. 심볼 데이터는 4bit가 하나의 심볼을 지정하며, 그림 13.(a)와 같이 6개의 송신 심볼 데이터 또는 그림 13.(b)와 같이 1개의 송신 심볼 데이터를 포함할 수 있다. 또한, 그림 13.(c)와 같이 DSP에서 I-채널과 Q-채널 성상도 값을 직접 전달하는 경우에는 각각 12bit로 구성된다. 심볼 데이터의 구성정보는 헤더에 포함되어 있다. 이렇게 다양한 형태의 데이터 전달 형식을 정의한 이유는 한번에 6개의 심볼 데이터를 전달하여 전달 효율을 높임과 동시에 심볼 길이가 6의 배수가 아닌 경우에도 사용할 수 있도록 하며, 개발과정에서 새로운 성상도 형식을 정의하여 사용하기 위함이다.

DSP에서 칩심볼 단위의 송신 데이터를 FPGA에 전달하면, FPGA는 데이터의 헤더정보를 해석하여 데이터가 여러 개의 송신 심볼 정보를 포함하고 있는 경우에는 이를 여러 개의 단일 심볼 데이터로 변환하여 FIFO에 저장한다. 이후 FPGA에서는 송신 신호 생성을 시작하며, 4개의 음향 센서에서 동일한 신호를 송신하는 경우에는 그림 12의 4개 병렬 신호처리 블록 중 하나만 동작하여 전력소모를 줄이면서 신호를 생성한다. PSF이후에 복소 곱셈기를 두어 송신 신호의 크기와 위상을 조정할 수 있도록 하였다. 또한, 믹서 출력 신호에 곱셈과 덧셈을 할 수 있도록 하여, 출력 신호의 크기를 조정할 수 있으며, 송신신호 생성시 발생할 수 있는 DC offset에 대처할 수 있도록 하였다.

신호 생성에 필요한 설정데이터는 FPGA내에 존재하는 레지스터의 값을 이용하며, 각 레지스터는 DSP에서 데이터를 읽고 쓸 수 있다. 각 병렬 신호처리 블록은 독립된 레지스터를 사용하고 있다.

DAC 제어기능에서는 한 샘플주기당 4개의 채널에 DAC 변환을 위한 데이터 전송과 한 번의 제어명령을 전달할 수 있도록 제어하고 있다. 샘플링 주기는 FPGA외부에서 제공하는 클럭을 이용하여 100kHz DAC 샘플링을 수행한다. DAC의 샘플링 주파수는 제어에 의해 100kHz보다 고속이나 저속으로 샘플링

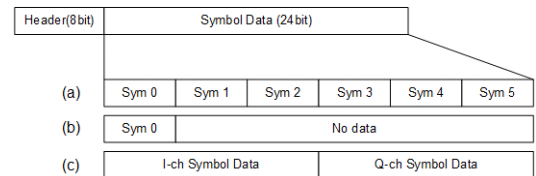


그림 13. 송신 심볼 데이터 전달 형식
Fig. 13. Transmitting symbol data interface format

할 수 있도록 구현하였다.

4.2 수신기능 구현

수중 통신 모뎀의 수신기능 또한 DSP와 FPGA가 역할을 나누어 구현하였다. FPGA는 수신부의 전단부 신호처리 기능인 ADC인터페이스, Demixing, Decimator 및 패킷 시작 검출을 위한 연산 일부 및 역확산기능을 담당하고, 그 이외의 기능은 DSP에서 담당한다.

그림 14는 FPGA에 구현한 수신기능의 블록도이다. 4개의 음향 센서에서 수신한 신호는 아날로그 신호처리단에서 증폭과 대역통과필터링을 수행하고 100kHz의 샘플율로 ADC를 수행한다. FPGA의 ADC I/F부는 ADC와 인터페이스를 수행하여, 샘플링한 데이터를 수신하고, 이를 4개의 샘플데이터로 분리한다. 채널별로 수신된 신호는 Demixer를 통해 기저대역으로 신호를 변환하고, 저역통과필터링과 1/4 Decimator를 통해 25kHz 샘플링된 신호로 변환되고, 변환된 신호는 버퍼에 저장된다. 25kHz 샘플링 신호로 변환된 4개의 채널 신호 중 설정에 의해 한 채널의 신호를 이용하여 프리앰블신호와 상관값을 계산하고, 상관값을 계산하는 샘플들의 에너지를 계산하여 버퍼에 저장한다. FPGA에서는 버퍼에 2048 샘플이 저장될 때마다 DSP에 샘플데이터가 있음을 알리고, DSP는 2048 샘플길이의 4채널의 샘플데이터와 상관값 계산 결과 및 수신 샘플 에너지 계산 결과를 읽어 DSP가 관리하는 대용량 버퍼에 옮긴다.

DSP에서 제어에 의해 n번째 2048샘플 블록을 DMA 엔진이 읽어오도록 하며, (n-1)번째 2048 샘플 블록 구간에 대해 3.3절에 설명한 수신 신호처리를 단

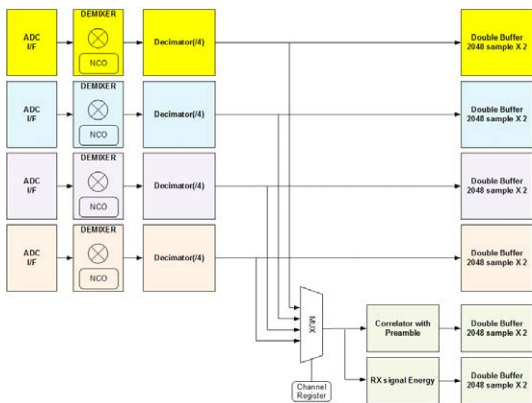


그림 14. FPGA에 구현한 수신기능 블록도
Fig. 14. Functional block diagram implemented in FPGA for received signal processing

계에 맞게 수행한다.

DSP에서는 수신 신호처리를 위해 3개의 태스크를 구성한다. 첫 번째 태스크는 FPGA의 샘플버퍼와 상관값 및 수신 신호 에너지 버퍼에서 데이터를 DSP로 옮기는 기능을 수행한다. 두 번째 태스크는 상관값의 에너지와 수신 샘플 에너지 데이터를 비교하여 패킷 동기를 검출하기 위한 연산을 수행하고, 프리앰블 심플 구간을 이용하여 도플러 편이를 추정하는 연산을 수행하며 수신부의 동작을 전체적으로 제어하는 역할을 수행한다. 패킷이 검출된 경우, 각 부프레임과 부프레임 다음의 미드앰블 또는 테일앰블까지 수신이 완료되면, 두 번째 태스크에서 세 번째 태스크를 호출한다. 세 번째 태스크는 한 부프레임 구간에 대해 도플러 편이 추정 및 보상부터 RAKE 결합 연산까지 3.3절에 설명한 연산을 순차적으로 수행하고, 한 패킷의 데이터가 수신되었을 때는 채널복호를 수행하여 수신 데이터를 결정하는 역할을 수행한다.

4.3 수중 이동 통신 모뎀 운용 GUI 구현

수중 이동 통신 모뎀의 동작을 모니터링하고, 제어하기 위해 운용 GUI와 운용 서버를 구현하였다. [11]에서 설명한 DAQ용으로 구현한 운용 GUI와 서버를 확장하여 모뎀 운용과 제어가 가능하도록 하였다. GUI와 운용 서버간 동작은 [11]에서 설명한 것과 유사하므로, 모뎀 운용을 위해 확장된 GUI에 대해서만 설명한다.

그림 15에 모뎀 운용 GUI 동작화면을 나타내었다. GUI의 화면은 크게 5부분으로 나누어져 있다. 첫 번째 부분은 송신 및 수신 파형신호가 전시되는 부분과 수신 데이터의 통계적 특성을 나타내는 부분으로 구성된다. 송신 및 수신 파형신호가 전시되는 부분은 모뎀에서 신호의 송신 또는 수신시 실시간 신호가 표시된다. 이때, 우측의 CH1~CH4의 체크박스에서 선택

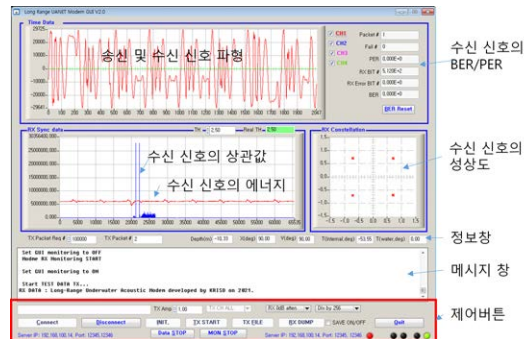


그림 15. 모뎀운용 GUI 화면구성
Fig. 15. Structure of modem operation GUI

된 채널 데이터만 표시된다. 수신 데이터의 통계적 특성을 나타내는 부분은 수신한 패킷 수, 수신한 패킷 중 오류인 패킷 수, 패킷 오류, 수신한 비트 수, 수신한 비트 중 오류인 비트 수, 비트 오류 등으로 구성된다. 수신 데이터의 통계적 특성은 누적되며, 초기화 버튼을 누르면 값이 모두 0으로 초기화된다.

두 번째 부분은 수신 신호의 에너지와 상관값이 전시되는 부분과 수신 신호의 정상도를 전시하는 부분으로 구성된다. 전시하는 두 값을 모니터링하여 패킷 시작 검출에 사용하는 문턱값을 조정할 수 있다. 수신 신호의 정상도는 채널복호기의 입력으로 사용되는 신호의 정상도를 표시한다. 수신 신호의 품질이 우수하면 그림 14와 같이 4개의 점의 형태로 표시된다.

세 번째 부분은 정보창 부분으로 표시순서는 패킷 전송시 송신하는 총 패킷 수, 현재 전송된 패킷수, 모뎀 설치 수심, 모뎀을 수면에서 본 자세를 2차원으로 도 단위로 표시, 모뎀의 내부 온도, 모뎀 설치 지점의 수온 등 이다.

네 번째 부분은 운용 GUI와 모뎀 GUI용 서버 소프트웨어간 주요한 명령 및 수신데이터를 표시하는 메시지 창이다.

다섯 번째 부분은 모뎀 GUI 및 모뎀을 제어하는 버튼들이다.

V. 수중 이동 통신 모뎀의 검증

5.1 수중 이동 통신 모뎀의 실시간 동작검증

그림 5과 같은 수중 이동 통신 모뎀 신호처리부에서 송신 출력을 수신부에 연결하여, 데이터 송신과 동시에 수신하는 동작을 수행시 수신 신호처리가 한 패킷시간 이내에 되는지를 검증하였다. 검증을 위해 수신부의 기능들이 동작하는 동안 FPGA를 통해 신호가 로직 '1'의 값을 갖도록 설정하고 시험을 수행하였다. 그림 16에 Turbo 복호를 15번 반복하는 경우에 대하여 오실로스코프를 이용하여 측정한 결과이다. 노란색

신호는 데이터를 송신하는 신호이고, 파란색 신호는 패킷검출 및 도플러 편이 추정을 수행하는 연산의 동작시간이다. 패킷 시작을 검출하면, 패킷 시작 검출 기능은 예상되는 패킷이 종료시점까지 해당 기능을 수행하지 않는다. 이러한 동작은 노란색의 신호가 시작되기 전의 구간에서는 파란색의 펄스가 2048 수신 샘플 주기에 한 번씩 관찰되나, 패킷이 시작한 이후 패킷 검출이 된 이후에는 해당 기능이 동작하지 않아 다음 패킷이 시작하기까지 공백이 관찰되는 것을 확인할 수 있다. 다홍색 신호는 부프레임에 대한 수신 신호처리시간을 나타낸다. 그리고, 마지막 녹색선은 채널복호를 수행하는 시간이다. 최대 반복 복호 횟수인 15번의 반복 복호를 수행할 때 소요되는 시간을 측정한 것으로 약 1초가 소요된다.

파란색 신호와 다홍색 신호를 보면, 첫 번째 패킷 구간에서는 균일한 간격으로 부프레임 연산이 수행되나, 두 번째 패킷 구간의 연산부터는 채널복호에 소요되는 시간으로 인해 다음 패킷의 시작부분에서 수행되었어야 하는 패킷 검출 연산 및 부프레임 연산이 지연되어 수행됨을 확인할 수 있다. 이는 그림 16의 하늘색과 다홍색 신호로 확인할 수 있다. 즉, 두 번째 패킷구간부터 패킷 시작 검출과 부프레임 연산이 앞 패킷의 채널복호가 완료될 때까지 기다린 이후에, 각 패킷 시작부분에서부터 예약되어 있던 패킷 검출 연산을 우선순위에 따라 조밀하게 수행한다. 또한, 패킷 시작이 검출됨에 따라 밀려있던 부프레임 연산을 연속적으로 수행하고, 밀려있던 연산을 다 처리한 후에는 다시 정상적인 주기로 부프레임 연산이 수행됨을 다홍색 신호로 부터 관찰할 수 있다. 채널복호 수행간격은 한 패킷 길이인 약 6.3초로 측정되어 수중 통신 모뎀이 충분한 동작시간 여유를 가지고 실시간으로 동작함을 확인하였다.

5.2 도플러 극복 동작 검증

선박해양플랜트연구소에서는 수중 이동 통신 모뎀의 고속이동에 대한 환경을 모사하기 위해 실시간 채널 시뮬레이터를 제작하였다. 제작한 채널시뮬레이터는 8개의 입력 채널을 1MHz로 샘플링하여 모뎀의 이동과 다중 경로를 갖는 수중채널환경을 설정에 따라 모사하여 8개의 출력 채널로 출력할 수 있다.

제작한 수중 통신 모뎀의 도플러 극복 동작 검증을 위해 2세트의 수중 이동 통신 모뎀 신호처리부를 채널시뮬레이터와 연결하였다. 채널시뮬레이터에서는 수심 200m환경에서 송/수신 모뎀이 수심 50m에 설치되고, 3개의 다중경로를 갖도록 설정하였으며, 20km

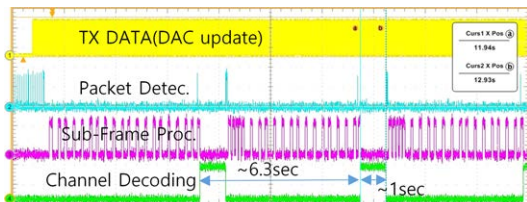


그림 16. 수신신호처리 동작시간 측정
Fig. 16. Receive signal processing operation time measurement

거리에서 가까워지는 방향으로 송신장치가 10m/s부터 20m/s까지 1m/s간격으로 파라미터를 설정하여 시험을 실시하였다. 측정을 위해 모뎀에서는 100개의 패킷을 송신하였다. 본 측정에서는 이동에 따른 도플러 극복을 동작을 검증하기 위한 목적으로 배경잡음 성분은 무시할 수 있을 만큼 낮게 설정하였다.

측정결과 18m/s까지는 도플러 외곡을 잘 극복하여 패킷의 손실 없이 수신하였으며, 수신한 패킷의 오류도 없었다. 19m/s부터는 패킷 손실과 수신한 패킷의 오류가 측정되었다. 이동속도가 19m/s일 때는 100개의 패킷 중 97개의 패킷을 수신하고, 3개의 패킷을 수신하지 못했으며, 수신한 97개 패킷 중 1개의 패킷에서 오류가 발생하였으며, BER은 4.4×10^{-3} 으로 관측되었다. 20m/s에서는 100개의 패킷 중 96개의 패킷을 수신하고, 4개의 패킷을 수신하지 못했으며, 수신한 96개의 패킷 중 14개 패킷에서 오류가 발생하였으며, BER은 5.28×10^{-2} 으로 관측되었다. 그러므로, 구현한 수중 이동 통신 모뎀은 18m/s까지 이동하는 환경에서 사용할 수 있음을 검증하였다.

5.3 실험역 동작 검증

구현한 수중 이동 통신 모뎀 두 셋을 2021년 12월에 진해만에서 두 대의 어선을 이용하여 실험역을 수행하였다. 두 셋 중 한 셋은 송신으로 사용하고, 나머지 한 셋은 수신으로 사용하였다. 시험해역은 수심 약 20m 내외이며, 그림 17과 같이 약 1499m/s이며, 수면에서부터 약 20m 해저까지 음속변화가 약 0.3m/s로 음속변화가 거의 없는 천해역 환경이다.

구현한 수중 이동 통신 모뎀은 그림 18과 같이 어선에서 진수하여 수심 약 10m에 위치하였으며, 어선 내에는 인터페이스모듈과 노트북을 설치하였다. 인터

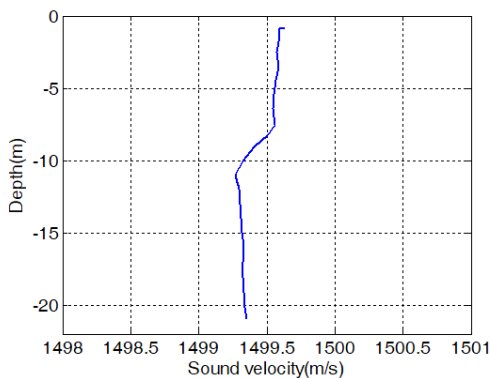


그림 17. 실험 해역의 음속프로파일
Fig. 17. Sound velocity profile at the test site

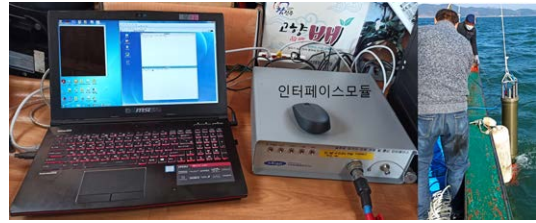


그림 18. 실험역 시험에서 모뎀 설치
Fig. 18. Set up for real sea test

페이스모듈은 수중 이동 통신 모뎀에 전원을 공급하고, 운용 GUI와 모뎀간 통신 인터페이스를 제공한다. 노트북은 운용 GUI를 동작시킨다. 모뎀의 실험역 동작 검증을 위해 수신측의 운용 GUI의 모뎀 모니터링 화면을 캡처하였다.

실험역 동작 검증 시험에서는 정상 크기를 갖는 경우와 정상 크기의 1/10을 갖는 경우를 시험하였다. 시험에서 두 경우 모두 오류 없이 데이터를 수신하였다. 그림 19와 그림 20에 송신 모뎀이 정상 크기의 신호를 송신하는 경우와 정상 크기의 1/10으로 신호를 송신하는 경우에 대하여 약 5km 떨어진 수신 모뎀의 운용 GUI화면을 캡처한 것을 각각 나타내었다. 그림에서 보면, 정상 크기의 신호로 송신한 경우의 수신신호 품질이 1/10의 크기로 송신한 경우보다 우수함을 수신신호의 정상도를 통해 확인할 수 있다. 또한, 1/10의 신호크기로 송신하더라도, 5km 거리에서 신호를 수신하기에 충분한 크기임을 수신 신호의 정상도가 4개의 신호위상점에 깨끗하게 모여 있는 것을 통해 확인할 수 있었다.

또한, [16]에서와 같이 수중 이동 통신 모뎀이 가상



그림 19. 정상 크기 신호를 송신한 경우의 수신측 GUI 화면 캡처
Fig. 19. Screen capture of receiving modem GUI when transmitting modem sends with normal signal amplitude

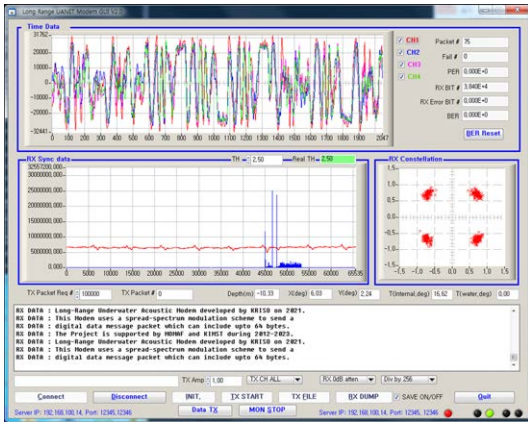


그림 20. 정상 크기의 1/10 신호를 송신한 경우의 수신측 GUI 화면 캡처
Fig. 20. Screen capture of receiving modem GUI when transmitting modem sends with 1/10 signal amplitude

으로 이동하는 것과 같은 신호를 송신하여 구현한 모뎀의 도플러 편이 보상기능을 추가적으로 확인하였다. 앞선 시험의 설정과 같이 5km 거리에서 1/10의 크기로 송신하였다. 구현한 수중 이동 통신 모뎀은 25.6MHz의 클럭을 256배 분주하여 100kHz의 DAC 샘플링 클럭을 생성한다. 구현한 수중 이동 통신 모뎀은 DAC 샘플링 주기를 252에서 260까지 운용 GUI에서 변경가능하다. 표 2와 같이 DAC 샘플링 클럭 생성기 분주율을 한 단계씩 변경함에 따라 약 5.8m/s의 이동 속도를 갖는 것과 같은 효과가 발생하며, 최대 +23.4m/s와 -23.4m/s의 가상 이동속도를 갖는 신호로 만들 수 있다. 실제 수신 모뎀에는 분주율로 설정한 상대속도와 어선의 표류 및 해류의 흐름 등에 의해 발생하는 도플러 편이가 결합하여 영향을 미친다.

그림 21~그림 23에 클럭 분주율을 259, 260 및 252로 설정하였을 때, 수신측 운용 GUI의 동작 모니터링 화면을 캡처한 것이다. 클럭 분주율을 259 또는

표 2. DAC 클럭 분주율에 따른 도플러편이와 이에 따른 상대 속도
Table 2. Doppler shift and its equivalent relative velocity according to the clock division rate

Clock Division rate	Doppler shift	Equivalent velocity(m/s)
256	0	0
255 or 267	1/256	~ 5.8m/s
254 or 268	2/256	~ 11.7 m/s
253 or 259	3/256	~17.5 m/s
252 or 260	4/256	~23.4 m/s

260으로 설정하면, 이는 가상적으로 두 노드가 서로 멀어지는 방향으로 이동하고, 그 속도는 각각 17.5m/s와 23.4m/s이다. 또한, 클럭 분주율을 252로 설정하면, 두 노드가 23.4m/s의 가상 이동속도로 가까워지는 것과 같다. 그림 21의 정상도가 그림 20의 경우에 비하여 더 퍼져있는 형태이나 오류 없이 신호 수신 가능한 상태이다. 그러나, 그림 22나 그림 23의 정상도에서 확인할 수 있듯이, 구현한 모뎀의 도플러 편이 보상 가능 범위를 벗어난 경우, 수신 신호에 많은 오류가 발생한다. 또한, 클럭 분주율을 260 또는 252로 설정하였을 때, 일부는 패킷의 시작을 검출하지 못하는 경우도 발생하였다.

실험을 통해 구현한 수중 이동 통신 모뎀이

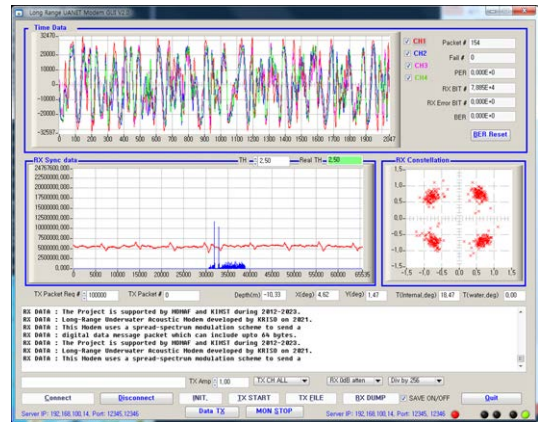


그림 21. 신호 발생주기를 259로 설정하고 송신한 경우의 수신측 GUI 화면 캡처
Fig. 21. Screen capture of receiving modem GUI when transmitting modem sends with 259 clock division rate

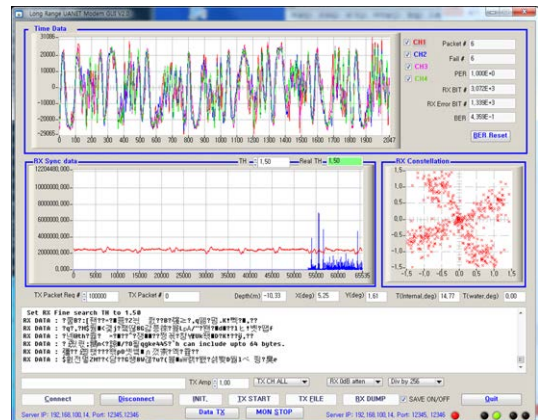


그림 22. 신호 발생주기를 260으로 설정하고 송신한 경우의 수신측 GUI 화면 캡처
Fig. 22. Screen capture of receiving modem GUI when transmitting modem sends with 260 clock division rate

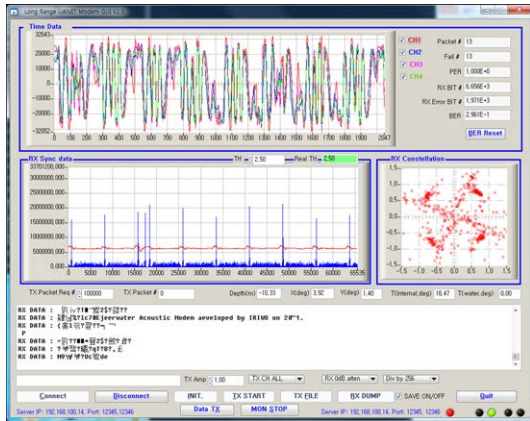


그림 23. 신호발생 주기를 252로 설정하고 송신한 경우의 수신측 GUI 화면 캡처
 Fig. 23. Screen capture of receiving modem GUI when transmitting modem sends with 252 clock division rate

실해역에서도 잘 동작함을 실증하였다. 또한, 가상으로 이동하는 것과 같은 신호를 송신하여 수신 성능 시험 결과는 5.2절의 채널시뮬레이터를 이용하여 18m/s의 이동속도까지는 도플러 편이를 잘 보상한다는 것을 다시 한 번 확인할 수 있었다.

VI. 결 론

본 논문은 국내 최초로 실시간으로 동작하는 수중 이동 통신 모뎀의 구현에 대하여 논하였다. 수중 이동 통신 모뎀은 배열 음향 센서, 음향 센서를 구동할 수 있는 송신증폭기보드, 아날로그 신호처리보드, 제어보드, FPGA보드, 인터페이스보드, 전원공급보드 등으로 구성된 플랫폼에서 구현되었다. 구현한 수중 이동 통신 모뎀은 음향 센서를 송신과 수신에 공동으로 사용하고, 단일 주파수 채널을 사용하는 반이중방식으로 송신과 수신을 수행한다. 또한, 구현한 모뎀은 장거리에 걸쳐 데이터 전송을 위해 확산대역방식의 변조를 사용하였으며, 정보전송을 위해 DQPSK 심볼 매핑을 사용하여, 연속된 심볼의 위상차에 2bit의 정보를 전달할 수 있다.

구현한 직접수열 확산대역 기반 모뎀은 6.25kHz의 반송주파수에서 약 2.1kHz의 대역폭을 사용하고, 심볼당 16개의 칩심볼로 확산하여 약 97.6 심볼율을 갖는다. 구현한 수중 이동 통신 모뎀은 수신기에서의 신호처리를 간단하게 하기 위해 DQPSK 변조를 사용하였다. 또한, 한 패킷내에서 통신 모뎀의 이동 속도가 변하는 것에 대응하기 위해 한 패킷을 20개의 부프레임으로 나누어 전송하였으며, 부프레임 사이에 도플러

외곡에 강인한 64 칩심볼 길이의 미드앰블을 추가하였다. 구현한 모뎀의 채널데이터 전송속도는 약 195 bps이고, 실험 정보데이터 전송속도는 부호율 1/2인 Turbo 부호를 사용할 때 약 82.5 bps이고, 부호율 2/3인 Turbo 부호를 사용할 때 약 109.8bps이다. 수신부에서는 부프레임별로 도플러 편이를 추정하여 프레임별로 이를 보상하는 방법을 사용하였다. 부프레임별로 도플러 편이 추정시 연산량 감소를 위해 직전 부프레임의 도플러 편이 추정값을 기준으로 1~2m/s의 속도 변화 범위에서 추정하도록 하였다.

구현한 수중 이동 통신 모뎀은 송신과 수신 모뎀간 상대적인 이동 속도가 18m/s 이내의 수중 이동 환경에서도 사용할 수 있도록 개발되었다. 구현한 모뎀을 천해역에서 정상출력 크기의 1/10로 송신하여도 5km 거리에서 성공적으로 데이터를 수신하는 것을 검증하였다. 또한, 실험해역에서 가상으로 이동하는 환경을 모사한 신호를 송신하여 17.5m/s까지 이동에 의한 도플러 편이는 잘 보상한다는 것을 확인하였다. 향후 구현한 두 모뎀간 통신 가능거리를 실험해역에서 추가적으로 시험할 예정이다. 구현한 수중 이동 통신 모뎀은 장거리 이동환경에서 단문 메시지 및 제어/명령 등 짧고 간단한 메시지를 전달하는 용도로 사용될 수 있을 것이다.

References

- [1] F. Campagnaro, R. Francescon, P. Casari, R. Diamant, and M. Zorzi. "Multimodal underwater networks: Recent advances and a look ahead," *WUWNET: Int. Conf. Underwater Netw. & Syst.*, no. 4, pp. 1-8, Halifax NS, Canada, Nov. 2017. (<https://doi.org/10.1145/3148675.3152759>)
- [2] I. F. Akyildiz, D. Pompili, and T. Melodia, "Underwater acoustic sensor networks: Research challenges," *Ad Hoc Networks*, vol. 3, no. 3, pp. 257-279, May 2005. (<https://doi.org/10.1016/j.adhoc.2005.01.004>)
- [3] M. Stojanovic and J. Preisig, "Underwater acoustic communication channels: Propagation models and statistical characterization," *IEEE Commun. Mag.*, pp. 84-89, Jan. 2009. (<https://doi.org/10.1109/MCOM.2009.4752682>)
- [4] L. M. Brekhovskikh and Y. P. Lysanov, *Fundamentals of Ocean Acoustics*, Springer,

- New York, 3rd Ed., 2003.
- [5] L. Freitag, M. Stojanovic, S. Singh, and M. Johnson, "Analysis of channel effects on direct-sequence and frequency-hopped spread-spectrum acoustic communication," *IEEE J. Ocean. Eng.*, vol. 26, no. 4, pp. 586-593, Oct. 2001. (<https://doi.org/10.1109/48.972098>)
- [6] T. C. Yang and W. Yang, "Low probability of detection underwater acoustic communications using direct-sequence spread spectrum," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 124, no. 6, pp. 3632-3647, Dec. 2008. (<https://doi.org/10.1121/1.2996329>)
- [7] B. Sherlock, J. A. Neasham, and C. C. Tsimenidis, "Spread-spectrum techniques for bio-friendly underwater acoustic communications," *IEEE Access*, vol. 6, pp. 4506-4520, Feb. 2018. (<https://doi.org/10.1109/ACCESS.2018.2790478>)
- [8] J. W. Han, K. M. Kim, Y. J. Yun, H. U. Mun, S. Y. Chun, and K. Son, "Sea trial results of the direct sequence spread spectrum underwater acoustic communication in the East Sea," *J. Acoust. Soc. Kr.*, vol. 31, no. 7, pp. 441-448, Oct. 2012. (<https://doi.org/10.7776/ASK.2012.31.7.441>)
- [9] H. I. Ra, J. H. An, C. H. Youn, K. M. Kim, and I. S. Kim, "Sea trial results of long range underwater acoustic communication based on direct sequence spread spectrum transmission in the East Sea," *J. Acoust. Soc. Kr.*, vol. 40, no. 4, pp. 304-313, Jul. 2021. (<https://doi.org/10.7776/ASK.2021.40.4.304>)
- [10] B. Sharif, J. Neasham, O. R. Hinton, and A. E. Adams, "A computationally efficient Doppler compensation system for underwater acoustic communications," *J. IEEE Ocean Eng.*, vol. 25, no. 1, pp. 52-61, Jan. 2000. (<https://doi.org/10.1109/48.820736>)
- [11] S. Kim, "Underwater mobile communication scheme based on the direct sequence spread spectrum transmission using Doppler estimation and its sea trial results with the pseudo-moving transmission," *J. Acoust. Soc. Kor.*, vol. 41, no. 1, pp. 16-29, Jan. 2022. (<https://doi.org/10.7776/ASK.2022.41.1.016>)
- [12] *Mocron Modem Data Sheet*, Retrieved May 20, 2022, from <https://www.tritech.co.uk/media/products/Micron%20Modem%202022.pdf?id=150fd420>
- [13] *GMP 300 Acoustic Modem*, Retrieved May 20, 2022, from <https://www.l3harris.com/sites/default/files/2020-09/ims-maritime-datasheet-GPM%20300.pdf>
- [14] *TUUM-6*, Retrieved May 20, 2022, from <https://www.yumpu.com/en/document/read/33604711/tuum-6>
- [15] *UT 3000 2G*, Retrieved May 20, 2022, from https://www.elac-sonar.de/fileadmin/content/products/Produktblatt_UT_3000_web_RDY.pdf
- [16] S. Kim, "Implementation of a long-range underwater acoustic modem platform and its functional verification via data acquisition application implementation," *J. KCIS*, vol. 46, no. 12, pp. 2361-2371, Dec. 2021. (<https://doi.org/10.7840/kics.2021.46.12.2361>)
- [17] P. Z. Peebles Jr., *Radar Principles*, John Wiley & Sons, 1998.
- [18] ETSI EN 300 392-2 V3.2.1, "Terrestrial Trunked Radio; Voice plus Data; Part2: Air Interface," 2007.
- [19] *OMAP-L137 Low-Power Applications Processor Data Sheet*, Retrieved May 04, 2022, from https://www.ti.com/lit/ds/symlink/omap-l137.pdf?ts=1635929383135&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.ti.com%252Fproduct%252FOMAP-L137.
- [20] *McASP Design Guide - Tips, Tricks, and Practical Examples*, Retrieved May 04, 2022, from <https://www.ti.com/lit/an/sprack0/sprack0.pdf?ts=1635882882536>.

김 승 근 (Seung-Geun Kim)



1995년 2월 : 인하대학교 전자공
학과 졸업
1997년 2월 : 광주과학기술원 정
보통신공학과 석사
2002년 8월 : 광주과학기술원 정
보통신공학과 박사
2002년 12월~현재 : 한국해양과

학기술원부설 선박해양플랜트연구소 책임연구원
<관심분야> 수중음향 통신 시스템 설계 및 구현, 동기
기술, 채널 등화기술 등

[ORCID:0000-0002-5957-4055]

백 혁 (Hyuk Baek)



2005년 2월 : 건국대학교 생명공
학과 졸업
2007년 8월 : 경상대학교 정보통
신공학 석사
2021년 8월 : 충남대학교 기계설
계메카트로닉스공학과 박사
2004년 3월~2007년 1월 : 한국

해양과학기술원 남해연구소 기기운영개발팀 근무
2007년 2월~현재 : 한국해양과학기술원 부설 선박해양
플랜트연구소 시험기술원

<관심분야> 수중통신, 수중드론 복합체계 및 임무계획
[ORCID:0000-0002-2371-4160]

김 시 문 (Sea-Moon Kim)



1992년 2월 : KAIST 기계공학
과 학사
1994년 8월 : KAIST 기계공학
과 석사
2001년 2월 : KAIST 기계공학
과 박사
2001년 3월~현재 : 한국해양과

학기술원 부설 선박해양플랜트연구소 책임연구원
2004년 3월~2020년 2월 : 과학기술연합대학원대학교
선박해양공학과 겸임교원(부교수)

2006년 2월~2007년 2월 : Scripps Institution of
Oceanography, UCSD 방문연구원(Visiting Scholar)
<관심분야> 수중음향채널 모델링, 소나 신호처리, 수중
초음파 항법

[ORCID:0000-0002-0488-9770]