

수조 및 저수지 실험을 통한 수중 코드 분할 다중 접속 기법 순방향 링크 성능 분석

서보민*, 손권*, 조호신^o

Performance Evaluation of Underwater Code Division Multiple Access Scheme on Forward-Link through Water-Tank and Lake Experiment

Bo-Min Seo*, Kweon Son*, Ho-Shin Cho^o

요약

코드 분할 다중 접속 기법은 주파수 선택적 페이딩에 강인하고 높은 주파수 재사용 효율 특성으로 인해 열악한 수중 환경에서의 유망한 매체 접속 제어 기법으로 많은 연구가 진행되고 있다. 또한 최근 수중 매체 접속 제어 기법의 성능 분석이 모의실험을 통해서 뿐만 아니라 해상 및 저수지에서의 실제 실험을 통해 이뤄지고 있다. 이에 본 논문에서는 수중 코드 분할 다중 접속 기법의 순방향 링크에 대한 트랜스미터를 설계한다. 수조 실험을 통해 코드 분할 다중 접속 기법의 수중 환경 적용 가능성을 검증하며, 수조 실험으로 얻어진 결과를 바탕으로 개선된 성능의 트랜스미터를 설계하고 모의실험과 저수지 실험을 통해 성능 개선을 확인한다. 사용자 데이터는 Walsh 부호를 사용하여 다중화되며, PN 획득 과정을 통해 위상 오류 정정 및 PN 부호 역확산을 수행한다. 또한 성능 향상을 위해 인터리빙 기법과 높은 오류 정정 효율을 가지는 채널 부호화 기법을 사용한다. 결과적으로 두 개의 다중화 데이터는 모두 오류 없이 복원되었으며, 세 개, 네 개의 다중화 데이터는 15% 이하의 오류율로 복원되었다.

Key Words : CDMA, Underwater acoustic sensor networks, Water-tank experiment, Lake experiment

ABSTRACT

Code division multiple access (CDMA) is one of the promising medium access control (MAC) schemes for underwater acoustic sensor networks because of its robustness against frequency-selective fading and high frequency-reuse efficiency. As a way of performance evaluation, sea or lake experiment has been employed along with computer simulation.. In this study, we design the underwater CDMA forward-link transceiver and evaluate the feasibility against harsh underwater acoustic channel in water-tank first. Then, based on the water-tank experiment results, we improved the transceiver and showed the improvements in a lake experiment. A pseudo random noise code acquisition process is added for phase error correction before decoding the user data by means of a Walsh code in the receiver. Interleaving and convolutional channel coding scheme are also used for performance improvement. Experimental results show that the multiplexed data is recovered by means of demultiplexing at receivers with error-free in case of two users while with less than 15% bit error rate in case of three and four users.

※본 연구는 방위사업청과 국방과학연구소의 지원으로 수행되었으며, 이에 대해 깊이 감사를 드립니다. (계약번호 UD130007DD)

♦ First Author : 경북대학교 IT대학 전자공학부 이동통신연구실, bmseo@ee.knu.ac.kr, 학생회원

° Corresponding Author : 경북대학교 IT대학 전자공학부 이동통신연구실, hscho@ee.knu.ac.kr, 종신회원

* 국방과학연구소, sk142298@add.re.kr

논문번호 : KICS2013-12-533, 접수일자 : 2013년 12월 12일, 심사일자 : 2014년 1월 20일, 최종논문접수일자 : 2014년 2월 3일

I. 서 론

최근 해양 자원에 대한 중요성이 부각되면서 해양 환경 감시, 자원 조사, 재난 방지, 해양 탐지 등과 같은 응용 분야에 대한 관심이 증가하고 있으며^[1] 이를 위한 성공적인 수중 음향 센서 네트워크 구성에 대한 중요성이 증가하고 있다. 다양한 응용 분야에서 효율적인 수중 음향 센서 네트워크를 구성하기 위해서는 센서 노드 사이의 신뢰성 있는 통신 링크를 구현하는 것이 필수적이며, 기존의 많은 연구에서 음향 신호를 사용하는 것이 수중 환경에서 가장 효율적으로 정보를 전달할 수 있는 방법임이 증명되었다^[2].

그러나 수중 채널은 음향 신호의 느린 전파 속도, 제한된 대역폭, 다중 경로 페이딩(multipath fading), 주파수 선택적 페이딩(frequency-selective fading) 및 도플러 확산(Doppler spread)으로 인해 높은 비트 오류율 및 큰 전송 지연 특성을 가진다^{[3][4]}. 열악한 수중 채널 특성을 극복하기 위해서는 수중 환경에 적합한 변조 기법의 설계뿐만 아니라 효율적인 매체 접속 제어(Medium Access Control: MAC) 프로토콜의 설계가 필수적이다.

코드 분할 다중 접속(Code Division Multiple Access: CDMA) 기법은 주파수 선택적 페이딩과 다중 경로 페이딩에 강인할 뿐만 아니라 여러 노드가 연속적으로 전송하는 신호를 직교 부호를 사용하여 쉽게 구별할 수 있고 주파수 재사용 효율이 좋으므로 수중 환경에서의 유망한 매체 접속 제어 기법으로 활발히 연구되고 있다^[1,5,6]. 하지만 기존의 연구 대부분이 이론적인 연구이며, 실제 구현에 관한 연구는 거의 이뤄지지 않았다. CDMA 기법의 성능 분석 이전에 대표적인 확산 스펙트럼 기법에 대한 성능 분석이 수행되어 직접 시퀀스 확산 스펙트럼(Direct Sequence Spread Spectrum: DSSS) 방식과 주파수 도약 확산 스펙트럼(Frequency Hopping Spread Spectrum: FHSS) 방식의 성능을 비트 오류율(Bit Error Rate: BER) 측면에서 비교 및 분석하였다^[7]. 수중 환경에서 다양한 CDMA 기법에 대한 성능 분석이 수행되어 주파수 도약 CDMA (Frequency Hopping CDMA: FH-CDMA) 기법의 성능이 모의실험을 통해 분석되었다^[8]. 열악한 수중 채널에서 작은 전송 지연과 높은 전송률을 얻기 위해 다중 반송파 CDMA (Multi-Carrier CDMA: MC-CDMA) 기법의 성능 분석 또한 연구되었다^[9]. 다양한 CDMA 기법의 성능 분석뿐만 아니라 수중 채널 특성에 적합한 직교 부호 할당(code assign)과 전력 제어(power control) 기법을 통해 높은

네트워크 처리율(throughput)과 낮은 소비 전력, 작은 전송 지연 특성을 가지는 CDMA 시스템에 관한 연구도 진행되었다^[10]. 또한 트리 구조(tree topology)에서 엇갈림 깨어남(staggered wake-up) 기법을 사용하는 CDMA 시스템의 성능 분석이 수행되어 다양한 네트워크 구조에서의 CDMA 시스템을 적용하는 연구가 진행되었다^[11].

한편 CDMA 송신기 및 수신기의 실제 구현에 대한 연구도 드물게 수행되었다. 4상 위상 편이 키잉(Quadrature Phase Shift Keying: QPSK) 변조 기법과 오류 정정을 위해 귀환 루프(feedback loop) 방식을 사용하는 다중 채널 CDMA 수신기에 대한 성능을 비트 오류율 관점에서 분석한 연구가 수행되었다^[12]. 또한 이진 위상 편이 키잉(Binary Phase Shift Keying: BPSK) 변조 기법과 QPSK 변조 기법을 사용하는 CDMA 송수신기의 구조 또한 제안되었다^{[13][14][15]}. 아울러 수중 CDMA 송수신기의 전송 규격을 결정하고 그에 따른 성능을 분석하기 위해 수중 CDMA 시뮬레이터가 개발되기도 하였다^[16]. 그러나 이러한 CDMA 기법의 구현과 관련된 기존의 연구에서도 실제 실험을 통한 성능 분석은 거의 이뤄지지 않고 있다.

본 논문은 하나의 송신기가 여러 사용자 데이터를 다중화하여 다수의 수신기로 데이터를 전송하는 순방향 링크 CDMA 트랜스미터를 설계하고 수조 실험을 통해 수중 환경 적용 가능성을 분석한다. 아울러 수조 실험 결과를 바탕으로 개선된 성능의 트랜스미터를 설계하고 모의실험과 저수지 실험을 통해 성능을 분석한다. 각 사용자 데이터는 직교 부호인 월시 부호를 사용하여 확산 및 다중화되며, 의사 잡음(Pseudo Noise: PN) 획득을 활용하여 수신 신호의 시작점을 찾고 위상 오류를 정정한다.

본 논문은 다음과 같은 구성을 가진다. 서론에 이어 본론에서는 순방향 링크 수중 CDMA 송신기 및 수신기의 구조에 대해 설명하고, 3장에서는 수조 실험과 저수지 실험 결과를 비트 오류율 관점에서 분석한다. 마지막으로 4장에서는 실험 결과를 바탕으로 결론을 맺는다.

II. 본 론

일반적으로 순방향 CDMA 링크는 하나의 기지국에서 다수의 단말로 전송되는 통신 링크를 의미하며, 따라서 하나의 송신 신호에 다수의 사용자 데이터가 다중화되어 있다. 수중에 배치된 다수의 센서 노드에서 센싱된 데이터가 수면에 위치한 싱크 노드로 수집

되는 수중 음향 센서 네트워크 환경에서는 싱크 노드와 센서 노드가 각각 기지국과 단말 역할을 수행한다. 싱크 노드에서 발생된 각 사용자 데이터는 직교 부호를 사용하여 다중화되어 각 센서 노드로 전송되며, 센서 노드는 자신의 직교 부호를 사용하여 여러 사용자 데이터가 다중화되어 있는 수신 신호에서 자신의 데이터를 구분할 수 있다. 순방향 CDMA 링크에서는 각각의 직교 부호가 곱해진 여러 사용자 데이터가 더해져 송신 신호가 구성되기 때문에 높은 성능의 트랜스미터를 설계하기 위해서는 각 직교 부호 사이의 직교성을 유지하는 것이 필수적이다.

2.1 송신기 구조

그림 1은 두 개의 사용자 데이터에 대한 송신기 구조를 나타낸다. 먼저 사용자 데이터는 수신기에서의 오류 정정을 위해 채널 부호화 과정을 거친다. 채널 부호화 과정을 거친 사용자 데이터는 각각 $d_1(t)$ 와 $d_2(t)$ 로 나타낼 수 있다. 채널 부호화된 각 사용자 데이터는 서로 다른 Walsh 부호 $w_1(t)$ 와 $w_2(t)$ 를 곱함으로써 확산된다. 한 주기의 Walsh 부호는 사용자 데이터의 모든 심볼마다 곱해지며, 따라서 송신 신호는 사용자 데이터의 심볼 단계에서 Walsh 부호의 직교성을 유지할 수 있다. 이때 곱해지는 Walsh 부호의 전송률과 사용자 데이터의 전송률의 비가 확산 이득(spreading gain)이 되며, 일반적으로 확산 이득이 높을수록 비트 오류율 측면에서 높은 성능을 나타낸다. Walsh 부호로 확산된 사용자 데이터는 수신기에서의 성공적인 PN 획득(PN acquisition)을 위해 모든 신호의 값이 1인 파일럿 신호 $p(t)$ 와 함께 더해진다. 파일럿 신호가 더해진 신호는 Walsh 부호와 같은 전송률의 PN 부호 $pn(t)$ 가 곱해진 뒤 반송파 $c(t)$ 로 변조되어 패킷 형태로 전송된다. 송신 신호 $x(t)$ 는 수식 (1)과 같이 정리할 수 있으며, 그림 2는 송신 신호의 예를 나타낸다.

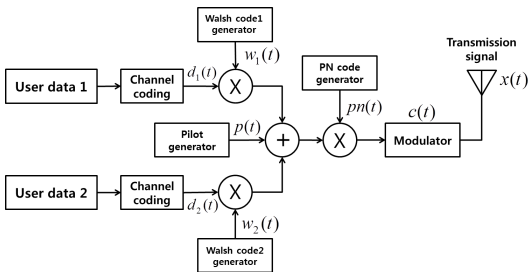


그림 1. 송신기 구조
Fig. 1. Transmitter structure

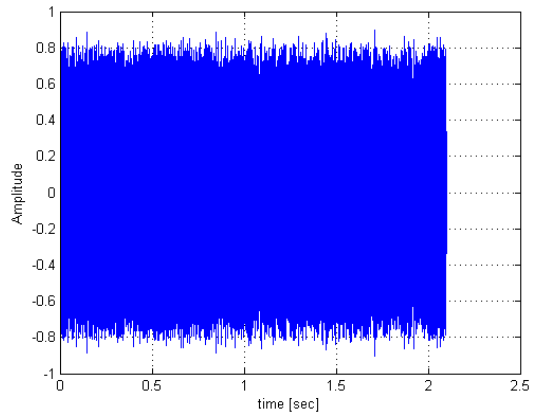


그림 2. 송신 신호 예시
Fig. 2. Example of transmitted signal

$$x(t) = [d_1(t) \cdot w_1(t) + d_2(t) \cdot w_2(t) + p(t)] \cdot pn(t) \cdot c(t) \quad (1)$$

2.2 수신기 구조

그림 3은 두 개의 사용자 데이터에 대한 수신기 구조를 나타내며, 그림 4는 모의실험 수신 신호의 예를 나타낸다. 먼저 수신된 신호는 반송파 $c(t)$ 를 곱한 뒤 저역 통과 필터(Low Pass Filter: LPF)를 통과시킴으로써 복조 과정을 수행한다. 복조된 신호는 PN 획득 과정을 통해 수신 신호의 시작점을 찾고 위상 오류에 대한 정보를 얻는다. PN 획득은 PN 부호의 자기 상관 특성을 이용하여 수신 신호와 송신기에서 사용한 PN 부호 사이의 상관값이 최대가 되는 지점을 찾는 과정이며, 이론적으로는 PN 부호의 매 주기마다 큰 상관값을 가지는 지점이 나타난다. 이때 상관값이 최대가 되는 지점이 수신 신호의 시작점이 된다. 또한 상관값이 최대가 되는 지점에서의 위상값이 신호의 위상 오류 정보가 되며, 이를 활용하여 PN 획득 이후 신호의 위상 오류를 정정할 수 있다. 위상 오류를 정정한 수신 신호는 각 사용자 데이터의 확산에 사용된 Walsh 부호를 곱하고 적분하는 Walsh 부호 역확산 과정을 수행하며, Walsh 부호의 직교성으로 인해 사용자 다중화된 사용자 신호가 복원된다. 최종적으로 채널 부호 복호기를 통해 비트 오류를 정정함으로써 송신기에서 생

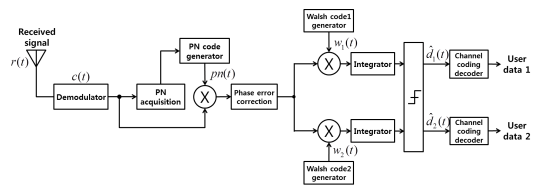


그림 3. 수신기 구조
Fig. 3. Receiver structure

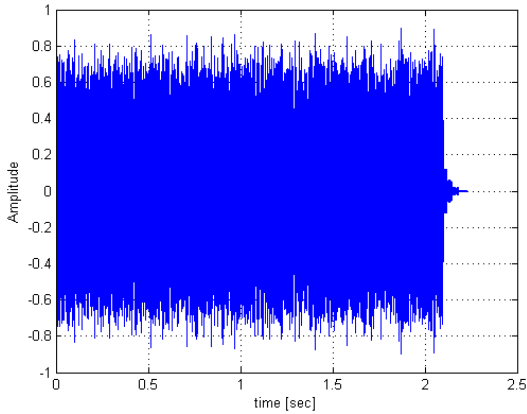


그림 4. 수신 신호 예시
Fig. 4. Example of received signal

성된 사용자 데이터를 복원할 수 있다. 각 월서 부호 사이의 직교성을 유지시키는 것이 수신기에서 사용자 데이터를 복원함에 있어 가장 중요하며, 이를 위해서는 성공적인 PN 획득이 수행되어야 한다. 실험 데이터를 통한 자세한 해설은 III장에서 다룬다.

III. 수조 및 저수지 실험 결과

본 논문에서는 수중 CDMA 순방향 링크 트랜스미터의 성능 분석 및 개선을 위해 수조 실험과 저수지 실험을 수행하였다. 먼저 순방향 링크 CDMA 트랜스미터의 수중 환경 적용 가능성을 확인하기 위해 두 개의 사용자 데이터에 대한 수조 실험을 수행하였으며, 수조 실험을 통해 얻은 결과를 바탕으로 전송률 및 사용자 데이터 수의 성능이 개선된 트랜스미터를 설계하였다. 개선된 성능의 트랜스미터는 모의실험 및 저수지 실험을 통해 성능을 분석하였다.

3.1 수조 실험

그림 5는 수조 실험 환경을 나타낸다. 수조 실험은

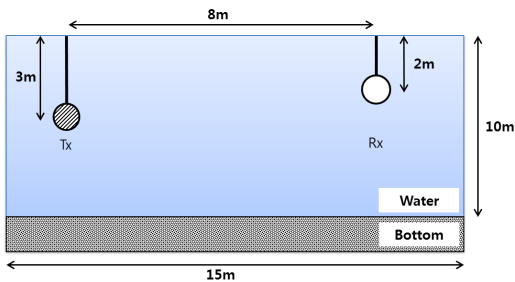


그림 5. 수조 실험 환경
Fig. 5. Environment of water-tank experiment

2012년 5월 11일 경상남도 창원시 국방과학연구소 내의 수조에서 수행되었으며, 실험에 사용된 수조의 크기는 10 m × 15 m × 10 m 이다. 송신기와 수신기 사이의 거리는 8 m 이며, 송신기와 수신기는 각각 3 m, 2 m 깊이에 배치되었다. 실험에 사용된 송신기는 ITC-1001 트랜스듀서가 사용되었으며 수신기는 B&K 8106 하이드로폰이 사용되었다.

표 1은 모의실험에 사용된 파라미터를 정리한 것이다. 해당 모의실험은 수중 CDMA 순방향 링크 트랜스미터의 수중 환경 적용 가능성을 확인하는 실험이므로 비트 오류율을 최소화하기 위해 낮은 전송률을 사용하여 데이터를 전송하였으며 비교적 짧은 길이의 사용자 데이터를 사용하였다. 또한 페이딩으로 인한 비트 오류율을 최소화하기 위해 하나의 송신 신호를 네 개의 프레임(frame)으로 나누어 각 프레임 사이에 1 초의 시간을 두고 전송하였으며, 프레임의 시작점을 파악하기 위해 각 프레임 앞에 프리앰블(preamble)을 붙여 전송하였다. 최종적으로 전송된 신호의 형태는 그림 6과 같다.

표 1. 수조 실험 파라미터
Table 1. Water-tank experiment parameters

Parameters	Value
Bit rate	50 bps
Spreading gain	8
Modulation Scheme	BPSK
Frequency	Carrier: 6 kHz / Smaping: 192 kHz
Channel coding	Bit repetition(1/7)
Source data	'wireless' / 'acoustic'

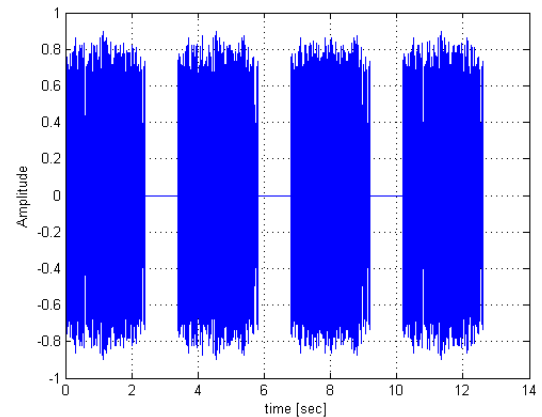


그림 6. 수조 실험 송신 신호
Fig. 6. Transmitted signal of water-tank experiment

그림 7은 수조 실험의 수신 신호를 나타낸다. 수중 채널의 다중 경로 전파 특성으로 인해 수신 신호의 각 프레임의 길이가 송신 신호에 비해 길어진 것(A)을 확인할 수 있다. 또한 주변 소음의 영향으로 수신 신호의 특정 부분에 신호의 값이 갑자기 증가하거나 감소하는 임펄스 성분(B)이 발생하였다.

그림 8은 하나의 프레임에 대한 PN 획득 결과를 나타낸다. 수조 실험에서는 하나의 프레임에 한 주기의 PN 부호가 포함되도록 설계하였으므로 하나의 큰 상관값이 나타난다. 또한 수조의 크기가 작아 신호의 지연이 거의 고려되지 않으므로 0 초와 가까운 곳에서 큰 상관값이 나타난다.

표 2는 수조 실험의 결과를 나타낸다. 실험 결과는 각 프레임마다 채널 부호를 복호하기 전과 복호한 후의 비트 오류율을 퍼센티지로 표시하였다. 모든 프레임의 결과를 종합하면 채널 부호를 복호하기 전의 비

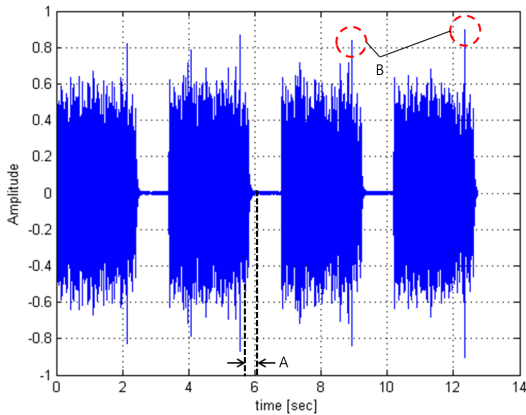


그림 7. 수조 실험 수신 신호
Fig. 7. Received signal of water-tank experiment

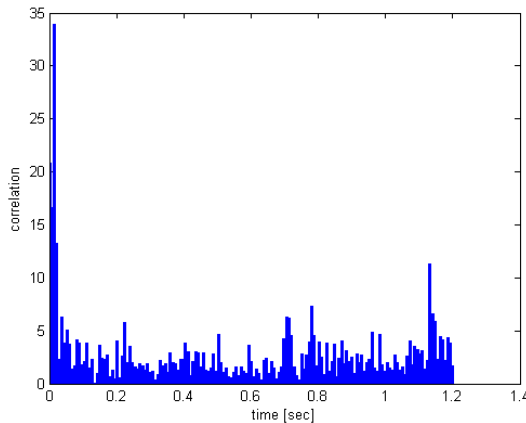


그림 8. 수조 실험 PN 획득 결과
Fig. 8. Result for PN acquisition of water-tank experiment

표 2. 수조 실험 결과
Table 2. Results of water-tank experiment

	Bit Error Rate before channel code decoding [%]			
	frame 1	frame 2	frame 3	frame 4
user 1 (wireless)	17.5	16.67	15.00	15.00
user 2 (acoustic)	21.67	21.67	22.50	19.17
	Bit Error Rate after channel code decoding [%]			
	frame 1	frame 2	frame 3	frame 4
user 1 (wireless)	0	0	0	0
user 2 (acoustic)	0	0	0	0

트 오류율은 첫 번째 사용자 데이터의 경우 16.04%, 두 번째 사용자 데이터의 경우 21.25%로 나타났으며, 복호한 후에는 오류율이 없이 완벽하게 모든 사용자 데이터가 복원되었다.

3.2 저수지 실험

저수지 실험은 수조 실험의 트랜스미버보다 전송률, 확산 이득, 다중화된 사용자 데이터의 수, 사용자 데이터의 크기 측면에서 개선된 성능을 가지는 트랜스미버의 설계를 목표로 진행되었다. 이를 위해서는 높은 오류 정정 성능이 요구되므로 인터리빙(interleaving), 길쌈 부호(convolutional encoding)를 적용하여 실험을 수행하였다.

그림 9는 저수지 실험 환경을 나타낸다. 저수지 실험은 2013년 10월 22일 경상북도 문경시 경천호에 위치한 저수조와 수중 음향 실험실에서 수행되었다. 저수지 실험은 하나의 송신기와 두 개의 수신기를 사용하여 진행되었으며, 실험 결과는 두 수신기에서 수신한

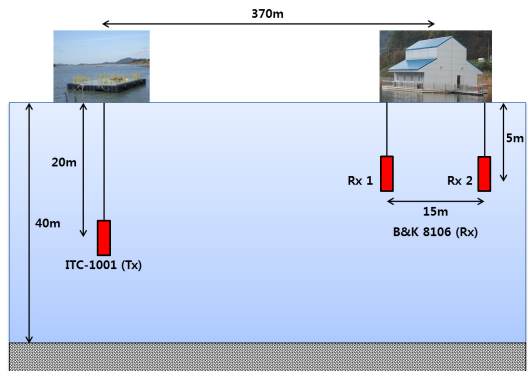


그림 9. 저수지 실험 환경
Fig. 9. Environment of lake experiment

신호를 모두 해석한 뒤 가장 좋은 결과를 선택하였다. 실험에 사용된 송신기는 ITC-1001 트랜스듀서, 수신기는 B&K 8106 하이드로폰이며, 370 m 거리를 두고 각각 수심 20 m, 5 m에 배치되었다.

표 3은 저수지 실험에 사용된 파라미터를 수조 실험에 사용된 파라미터와 비교하여 정리한 것이다. 네 개의 프레임으로 나눈 뒤 각 프레임에 프리앰블을 붙여 전송한 수조 실험의 송신 신호와 달리 저수지 실험의 송신 신호는 프레임으로 나누지 않은 하나의 패킷 형태로 전송되며 프리앰블을 사용하지 않는다. 이는 PN 획득으로 신호의 시작점을 찾을 수 있으므로 굳이 신호의 시작점을 구분하기 위한 프리앰블이 필요하지 않기 때문이다. 또한 높은 오류 정정 효율을 보이는 길쌈 부호를 사용하여 수조 실험에 비해 채널 부호화의 부호율을 낮출 수 있다. 이를 통해 8 개 문자로 이루어진 텍스트 형태의 사용자 데이터를 전송하는데 480 비트를 사용한 수조 실험에 비해 저수지 실험에서는 15 개 문자의 사용자 데이터를 전송하는데 525 비트만 사용되었다. 최종적으로 저수지 실험에 사용된 송신 신호는 그림 10과 같다.

그림 11은 송신기와 두 수신기 사이의 채널 응답을 나타낸다. 송신기와 수신기 1(Rx 1) 사이의 채널 응답은 최단 경로(direct path)로 신호가 수신된 뒤 약 3 ms 뒤 첫 번째 반사파가, 약 11 ms 뒤에 두 번째 반사파가 수신되는 응답 특성을 나타내며, 송신기와 수신기 2(Rx 2) 사이의 채널 응답은 최단 경로로 신호가 수신된 뒤 약 8 ms 뒤에 반사파가 수신되는 응답 특성을 보인다. 반사파는 PN 획득 과정에서 간섭으로 작용하여 PN 획득의 성능을 저하시킴으로써 트랜스미터의 전체 성능을 저하시킬 수 있다. 또한 실험 당

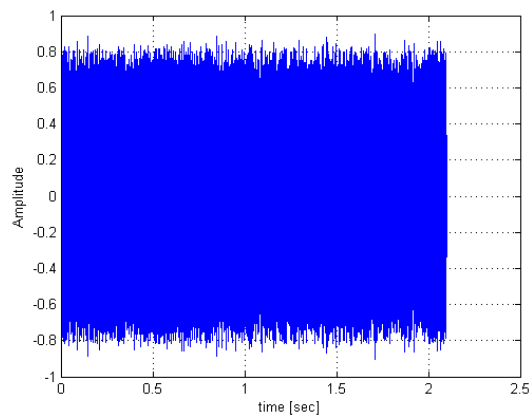


그림 10. 저수지 실험 송신 신호
Fig. 10. Transmitted signal of lake experiment

표 3. 저수지 실험 파라미터
Table 3. Parameters of lake experiment

Parameters	Value	
	Water-tank experiment	Lake experiment
Bit rate	50 bps	250 / 500 bps
Spreading gain	8	8 / 16
Modulation scheme	BPSK	BPSK
Frequency	Carrier: 6 kHz Sampling: 192 kHz	Carrier: 16 kHz Sampling: 192 kHz
Channel coding	Bit repetition(1/7)	Convolutional encoding(1/5)
Source data	'wireless' 'acoustic' (8 characters)	'UWCommunication' 'Kyungpook_univ.' 'Underwater_Test' 'WirelessNetworks' (15 characters)

일 풍속 8 m/s의 바람이 불어 송신기가 배치된 바지선의 이동이 있었으며, 이로 인해 송신기가 이동하여 도플러 확산이 발생하였다. 도플러 확산은 수신 신호

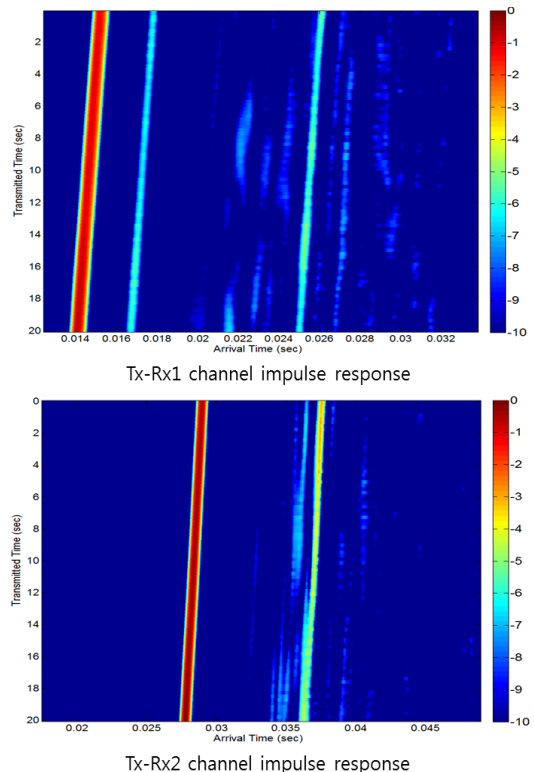
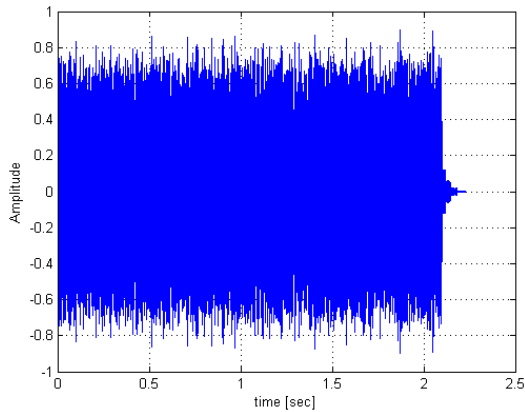


그림 11. 송수신기 사이의 채널 응답 특성
Fig. 11. Channel impulse response between transmitter and receivers

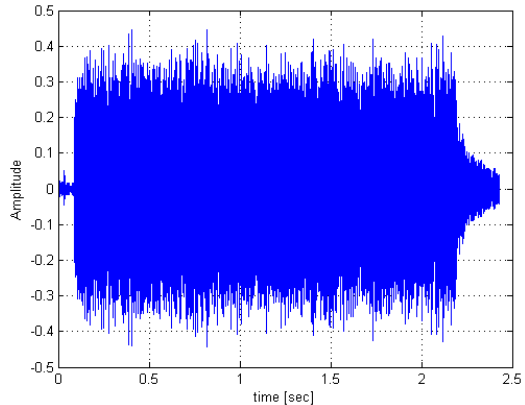
의 반송파 주파수를 왜곡시켜 높은 비트 오류율을 초래할 수 있다.

그림 12는 모의실험과 저수지 실험의 수신 신호를 나타낸다. 모의실험과 실제 실험 모두 수신 신호는 수중 음향 채널의 다중 경로 전파로 인해 송신 신호보다 신호의 길이가 길어진다. 모의실험에서는 수중 채널의 위상 오류 특성을 반영하기 위해 수신 신호에 임의의 위상 오류를 곱한 뒤 신호 해석을 수행하였으며, 발생한 위상 오류의 범위는 $[0, 2\pi]$ 로 설정하였다.

그림 13은 모의실험과 저수지 실험의 PN 획득 결과를 나타낸다. 모의실험에서는 신호의 지연이 거의 고려되지 않으므로 신호의 시작점에서 큰 상관값을 가지는 지점이 나타나며, 큰 상관값은 PN 부호의 매 주기마다 나타난다. 저수지 실험 결과는 수신기 1(Rx 1)에서 수신된 신호를 해석한 것이다. 모의실험과 마찬가지로 큰 상관값을 가지는 두 지점이 발생하며, 두 지점 사이의 시간은 PN 부호의 주기와 일치한다. 그러

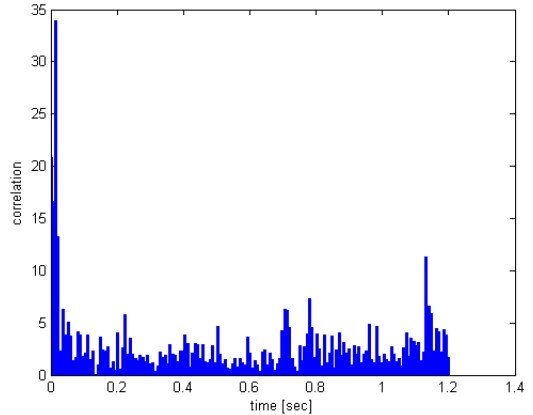


(a) Simulation

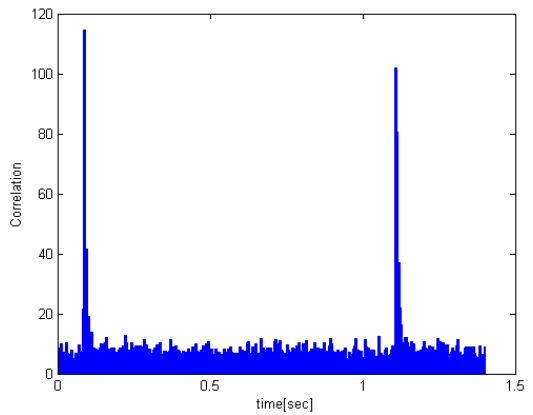


(b) Lake experiment

그림 12. 저수지 실험 수신 신호
Fig. 12. Received signal of lake experiment



(a) Simulation



(b) Lake experiment

그림 13. 저수지 실험 PN 획득 결과
Fig. 13. Results for PN acquisition of lake experiment

나 저수지 실험 결과에서는 큰 상관값을 가지는 두 지점 모두 약간의 지연을 가지고 상대적으로 큰 상관값이 추가적으로 두 개가 발생한 것을 확인할 수 있으며, 이 두 개의 상관값은 반사파에 의해 발생한 것이다.

표 4는 모의실험 결과를 정리한 것이다. 채널 부호 복호 이후 모든 사용자 데이터가 오류 없이 복원되었으므로 결과는 채널 부호 복호 이전의 오류율을 정리하여 나타났다. 같은 확산 이득에서는 다중화된 사용자 데이터 수가 많아질수록 오류율이 증가함을 확인할 수 있다. 이는 월시 부호 사이의 직교성이 완전하지 않은 환경에서 월시 부호 역확산 과정에서 서로 다른 사용자 데이터 성분이 간섭으로 작용하기 때문이다. 이론적으로 전송률이 증가할수록 비트 오류율은 증가하지만 모의실험 결과 전송률이 높은 실험 환경에서 낮은 오류율을 나타냈다. 이는 PN 부호의 칩 시간(chip duration)이 작아질수록 PN 획득 과정에서의 분해능(resolution)이 증가하여 보다 정확한 PN 획득

표 4. 모의실험의 비트 오류율 결과(채널 부호 복호 이전)
Table 4. BER of simulation (before channel code decoding)

bit rate	# of user data	spreading gain: 8				spreading gain: 16			
		Bir Error Rate [%]				Bit Error Rate [%]			
		user 1	user 2	user 3	user 4	user 1	user 2	user 3	user 4
250	2	2.2	2.0	-	-	0.3	0.3	-	-
	3	8.3	6.8	8.1	-	1.7	1.3	1.3	-
	4	7.2	9.6	8.3	8.5	3.0	2.3	3.8	2.1
500	2	2.3	2.3	-	-	0	0	-	-
	3	7.4	7.4	6.6	-	0.7	0.4	0.8	-
	4	6.0	8.2	9.3	8.2	1.7	1.1	1.3	1.2

표 5. 저수지 실험 비트 오류율 결과(채널 부호 복호 이후)
Table 5. BER of lake experiment (after channel code decoding)

bit rate	# of user data	spreading gain: 8				spreading gain: 16			
		Bir Error Rate [%]				Bit Error Rate [%]			
		user 1	user 2	user 3	user 4	user 1	user 2	user 3	user 4
250	2	0	0	-	-	0	0	-	-
	3	×	×	×	-	0	0	0	-
	4	0.9	1.9	0	4.7	3.3	0.9	4.2	4.7
500	2	0	0	-	-	0	0	-	-
	3	×	×	×	-	7.6	10.4	13.3	-
	4	×	×	×	×	×	×	×	×

이 가능해져 월시 부호의 직교성이 낮은 전송률에 비해 잘 유지되었기 때문이다. 또한 전송률과 다중화된 사용자 데이터 수가 같은 조건에서는 확산 이득이 클수록 비트 오류율이 감소하며, 이는 확산 이득이 클수록 나은 성능을 보이는 CDMA 기법의 특성을 반영한다.

표 5는 저수지 실험의 결과를 정리한 것이다. 저수지 실험 결과는 채널 부호 복호 이후의 오류율을 나타낸다. ×로 표시된 결과는 신호를 해석하였으나 오류율이 20%가 넘는 결과를 의미한다. 두 개의 사용자 데이터를 다중화한 실험은 모든 전송률과 확산 이득 조건에서 오류율 없이 복원됨을 확인할 수 있었다. 그러나 사용자 데이터의 수가 증가할수록 일부의 실험에서 비트 오류로 인해 신호가 완벽히 복원이 되지 않거나 해석이 되지 않는다. 특히 사용자 데이터의 수가 네 개인 경우 오류 없이 복원되는 데이터는 없었으며, 전송률 250 bps 환경에서 확산 이득과 상관없이 수 %의 오류율로 복원되었다. 이는 다중 경로 전파와 도플러 확산이 모두 존재하는 열악한 수중 채널 환경에서 PN 획득의 성능 저하로 인해 월시 부호의 직교성이 제대로 유지되지 않았기 때문이다.

CDMA 기법의 수중 환경 적용 가능성을 확인하고 이를 바탕으로 개선된 트랜스미터를 설계하여 모의실험 및 저수지 실험으로 성능을 분석하였다. 다수의 사용자 데이터를 다중화하기 위해 월시 부호를 사용하였으며, 위상 오류 정정 및 수신 신호의 시작점을 찾기 위해 PN 획득을 사용하였다. 수중 실험에서 설계된 트랜스미터보다 높은 성능의 트랜스미터를 설계하기 위해 높은 오류 정정 효율을 가지는 채널 부호화 기법과 인터리빙 기법을 사용하였으며 송신 신호의 구조를 개선하여 전송 효율을 높였다.

추후 도플러 확산과 다중 경로 전파를 고려하여 다수의 사용자 데이터가 다중화되어 있는 실험에서도 오류 없이 사용자 데이터를 복원하도록 하는 트랜스미터를 설계하여 실제 실험을 통해 성능을 분석할 계획이다. 또한 순방향 링크뿐만 아니라 다수의 센서 노드에서 하나의 싱크 노드로 데이터를 전송하는 역방향 링크 수중 CDMA 트랜스미터를 설계하여 모의실험 및 실제 실험을 통해 성능을 검증할 계획이다. 또한 해상 실험을 통해 순방향 및 역방향 링크 수중 CDMA 기법의 성능을 분석하고 개선할 예정이다.

IV. 결 론

References

본 논문에서는 수중 실험을 통해 순방향 링크

[1] I. F. Akyildiz, D. Pompili, and T. Melodia,

- “Underwater acoustic sensor networks: Research challenges,” *Ad Hoc Networks (Elsevier)*, vol. 3, no. 3, pp. 257-279, May 2005.
- [2] L. Xavier, *An Introduction to Underwater Acoustics - Principles and Applications*, Springer Praxis, 2002.
- [3] M. Stojanovic and C. J. Preisig, “Underwater acoustic communication channels: Propagation models and statistical characterization,” *IEEE Comm. Mag.*, vol. 47, no. 1, pp. 84-89, Jan. 2009.
- [4] M. Stojanovic, “On the relationship between capacity and distance in an underwater acoustic communication channel,” *ACM SIGMOBILE Mobile Comput. and Comm. Rev.*, pp. 34-43, New York, USA, Oct. 2007.
- [5] E. Sozer, J. Proakis, M. Stojanovic, J. Rice, A. Benson, and M. Hatch, “Direct sequence spread spectrum based modem for underwater acoustic communication and channel measurements,” in *Proc. MTS/IEEE OCEANS’99*, vol. 1, pp. 228-233, Seattle, USA, Sept. 1999.
- [6] I. F. Akyildiz, D. Pompili, and T. Melodia, “A CDMA-based medium access control for underwater acoustic sensor Networks,” *IEEE Trans. on Wireless Comm.*, vol. 8, no. 4, pp. 1899-1909, Apr. 2009.
- [7] 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. Oceanic Engineering*, vol. 26, no. 4, pp. 586-593, Oct. 2001.
- [8] C. En, Z. Ziming, Z. Kanghuang, Q. Yuan, and D. Jie, “Performance analysis of underwater acoustic FH-CDMA network,” in *Proc. 2nd Int’l Conf. on Anti-counterfeiting, Secur. and Identifi. (ASID 2008)*, pp. 101 - 104, Guiyang, China, Aug. 2008.
- [9] Y. Jiemin, X. Ru, W. Deqing, C. Huabin, and H. Xiaoyi, “Study on MC-CDMA for underwater acoustic networks,” in *Proc. Int’l Conf. on Comput. Sci. and Softw. Eng. 2008*, vol. 3, pp. 614 - 617, Wuhan, China, Dec. 2008.
- [10] D. Pompili, T. Melodia, and I. F. Akyildiz, “A CDMA-based medium access control for underwater acoustic Sensor networks,” *IEEE Trans. on Wireless Comm.*, vol. 8, no. 4, pp. 1899 - 1909, May 2009.
- [11] B. Seo and H.-S. Cho, “Performance analysis on code-division multiple access in underwater acoustic sensor networks,” *J. KICS*, vol. 35, no. 9, pp. 874-881, Sept. 2010.
- [12] M. Stojanovic and L. Freitag, “Wideband underwater acoustic CDMA: Adaptive multichannel receiver design,” in *Proc. MTS/IEEE OCEANS’05*, pp. 1508-1513, Washington DC, USA, Sept. 2005.
- [13] G. Shuxiang, Z. Zixin, and P. Qinxue, “A CDMA acoustic communication system for multiple underwater robots,” in *Proc. IEEE Int’l Conf. on Robotics and Bio. 2008 (ROBIO 2008)*, pp. 1522-1526, Bangkok, Thailand, Feb. 2009.
- [14] G. Shuxiang and Z. Zixin, “Design of a QPSK-CDMA acoustic communication system for multiple underwater vehicles,” in *Proc. Int’l Conf. on Mechatronics and Automation 2009 (ICMA 2009)*, pp. 3568-3572, Changchun, China, Aug. 2009.
- [15] B.-M. Seo, J. Cho, K. Son, S.-K. Lee, and H.-S. Cho, “Design for 2-channel underwater code division multiple access transceiver,” in *Proc. The 23rd Joint Conf. on Comm. and Info. (JCCI 2013)*, pp. 1-2, Gyeongju, Korea, May 2013.
- [16] J. Cho, D.-K. Kye, S. Kim, J. Kim, S. Choi, and H.-S. Cho, “An implementation of the code division multiple access(CDMA) simulator in the underwater channel,” in *Proc. KICS Int’l Conf. Commun. 2012 (KICS ICC 2012)*, pp. 177-178, Seoul, Korea, Nov. 2012.

서 보 민 (Bo-Min Seo)



2009년 2월 : 경북대학교 전자
전기컴퓨터학부 공학사
2011년 8월 : 경북대학교 전자
전기컴퓨터학부 공학석사
2011년 9월~2013년 2월 : 국방
수중통신/탐지연구특화연구
센터 전문연구요원

2013년 3월~현재 : 경북대학교 IT대학 전자공학부
박사과정

<관심분야> 이동통신시스템, 수중음향센서네트워크

손 권 (Kweon Son)



1988년 2월 : 경북대학교 전자
공학과 공학사
1991년 2월 : 경북대학교 전자
공학과 공학석사
2012년 8월 : 경북대학교 전자
공학부 공학박사
1991년2월~현재 : 국방과학연구
소 재직

<관심분야> 수중음향센서네트워크

조 호 신 (Ho-Shin Cho)



1992년 2월 : 한국과학기술원 전
기 및 전자공학과 공학사
1994년 2월 : 한국과학기술원 전
기 및 전자공학과 공학석사
1999년 2월 : 한국과학기술원 전
기 및 전자공학과 공학박사
1999년 3월~2001년 2월 : 한국
전자통신연구원 선임연구원

2001년 3월~2003년 2월 : 한국항공대학교 전자정보
통신컴퓨터공학부 전임강사

2003년 3월~2012년 3월 : 경북대학교 전자전기컴퓨
터학부 부교수

2012년 4월~현재 : 경북대학교 IT 대학 전자공학부
교수

<관심분야> 이동통신시스템, 무선자원관리, 트래픽
제어, 수중음향센서네트워크