

저수지 실험을 통한 수중 음향 코드 분할 다중 접속 방식의 다이버시티 수신 성능 검증

Performance evaluation of diversity reception of underwater acoustic code division multiple access using lake experiment

서보민,¹ 조호신^{1†}

(Bo-Min Seo¹ and Ho-Shin Cho^{1†})

¹경북대학교 IT대학 전자공학부

(Received November 18, 2016; accepted January 25, 2017)

초 록: 코드 분할 다중 접속 기법은 주파수 선택적 페이딩에 강인할 뿐만 아니라 주파수 재사용 효율이 좋으므로 열악한 수중 환경에서의 유망한 매체 접속 제어 기법으로 많은 연구가 진행되고 있다. 본 논문에서는 다이버시티 기법을 적용한 수중 코드 분할 다중 접속 기법의 순방향 및 역방향 링크 트랜스시버를 설계한다. 사용자 데이터는 월시 부호를 사용하여 다중화되며, 유사 잡음 부호 획득 과정을 통해 위상 오류 정정 및 유사 잡음 부호 역확산을 수행한다. 수중 음향 채널의 다중 경로 페이딩에 의한 트랜스시버 성능 감소를 최소화하기 위해 동일 이득 합성 및 최대비 합성의 다이버시티 기법을 적용한다. 다이버시티 기법으로 인한 트랜스시버의 성능 개선을 확인하기 위해 평균 수심 40 m의 문경시 경천호에서 두 개의 송신기와 두 개의 수신기를 활용하여 460 m 거리에서 저수지 실험을 수행하였으며, 결과적으로 순방향 및 역방향 링크 모두 사용자 데이터가 오류 없이 복원되었다.

핵심용어: 수중 음향 센서 네트워크, 코드 분할 다중 접속, 다이버시티, 트랜스시버, 저수지 실험

ABSTRACT: CDMA (Code Division Multiple Access) is promising medium access control schemes for underwater acoustic sensor networks because of its robustness against frequency-selective fading and high frequency-reuse efficiency. In this paper, we design diversity schemes of underwater CDMA transceiver for the forward and reverse links. User data are multiplexed by Walsh code and a pseudo random noise code acquisition process is added for phase error correction before decoding the user data at the receiver. Then, the diversity reception using equal gain combining and maximal ratio combining is performed in order to minimize performance degradation caused by rich multipath fading of underwater acoustic channel. We evaluated the performance of diversity transceiver through lake experiment, which was performed at Lake Kyungcheon, Mungyeong city using two transmitters and two receivers placed 460 m apart at an average depth of 40 m. The lake experiment results show that user data are recovered with error-free in both of the forward and reverse links.

Keywords: Underwater acoustic sensor networks, CDMA (Code Division Multiple Access), Diversity, Transceiver, Lake experiment

PACS numbers: 43.60.Dh, 43.60.Ek

1. 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 이를 위한 성공적인 수중 음향 센서 네트워크 구성에 대한 중요성이 증가하고 있다.^[1] 다양한 응용 분야에서 효율적인 수중 음향 센서 네트워크를 구성하기 위해서는 센서 노드 사이의 신뢰성 있는 통신 링크

†Corresponding author: Ho-Shin Cho (hscho@ee.knu.ac.kr)
School of Electronics Engineering, Kyungpook National University,
80 Daehak-ro, Buk-gu, Daegu 41566, Republic of Korea
(Tel: 82-53-950-7577, Fax: 82-53-950-5505)

를 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, 주파수 선택적 페이딩 및 도플러 확산으로 인해 높은 비트 오류율(Bit Error Rate, BER) 및 큰 전송 지연 특성을 가진다.^[3,4] 열악한 수중 채널 특성을 극복하기 위해서는 수중 환경에 적합한 변조 기법의 설계뿐만 아니라 효율적인 매체 접속 제어프로토콜의 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 구분할 수 있고 주파수 재사용 효율이 좋으므로 수중 환경에서의 유망한 매체 접속 제어 기법으로 활발히 연구되고 있다.^[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 방식과 주파수 도약 확산 스펙트럼 방식의 성능을 비트 오류율 측면에서 비교 및 분석하였다.^[7] 수중 환경에서 다양한 CDMA 기법에 대한 성능 분석을 위해 주파수 도약 CDMA 기법의 성능이 모의실험을 통해 분석되었다.^[8] 열악한 수중 채널에서 작은 전송 지연과 높은 전송률을 얻기 위해 다중 반송파 CDMA 기법의 성능 분석 또한 연구되었다.^[9] 다양한 CDMA 기법의 성능 분석뿐만 아니라 수중 채널 특성에 적합한 직교 부호 할당과 전력 제어 기법을 통해 높은 네트워크 처리율과 낮은 소비 전력, 작은 전송 지연 특성을 가지는 CDMA 시스템에 관한 연구도 진행되었다.^[10] 트리 구조에서 엇갈림 깨어남 기법을 사용하는 CDMA 시스템의 성능 분석이 수행되어 다양한 네트워크 구조에서 CDMA 시스템을 적용하는 연구가 진행되었다.^[11] 또한 다중 홉 네트워크 구조에서 데이터를 수집하는 싱크 노드의 이웃 노드들의 에너지 소모 및 트래픽 부하의 불균형 문제를 해결하기 위해 경로마다 직교 부호를 할당

하는 기법^[12]이 제안되었다.

한편 CDMA 송신기 및 수신기의 실제 구현에 대한 연구도 드물게 수행되었다. QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) 변조 기법과 오류 정정을 위해 귀환 루프 방식을 사용하는 다중 채널 CDMA 수신기에 대한 성능을 비트 오류율 관점에서 분석한 연구가 수행되었다.^[13] 또한 BPSK (Binary Phase Shift Keying) 변조 기법과 QPSK 변조 기법을 사용하는 CDMA 송수신기의 구조 또한 제안되었다.^[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 연구는 주로 역방향 링크에 대해 수행되었으며, 순방향 링크를 포함한 전체 CDMA 시스템의 구현과 관련된 연구는 수행되지 않았다. 또한 실제 실험을 통한 성능 분석이 거의 이뤄지지 않고 있다.

본 논문에서는 다이버시티 기법을 적용한 수중 CDMA 기법의 순방향 및 역방향 링크 트랜스시버를 설계하고 저수지 실험을 통해 다이버시티 기법으로 인한 트랜스시버의 성능 향상을 분석한다. 각 사용자 데이터는 월시 부호(Walsh code)를 사용하여 확산 및 다중화되며, 유사 잡음(Pseudo Noise, PN) 부호 획득을 활용하여 위상 오류를 정정한다. 다이버시티 기법으로 동일 이득 합성(Equal Gain Combining, EGC) 및 최대비 합성(Maximal Ratio Combining, MRC) 기법이 적용된다.

본 논문은 다음과 같은 구성을 가진다. 서론에 이어 2장에서 수중 CDMA 순방향 및 역방향 링크의 송신기 구조에 대해 설명하고, 3장에서 다이버시티 기법이 적용된 수신기 구조에 대해 설명한다. 4장에서는 저수지 실험 결과를 비트 오류율 관점에서 분석하며, 마지막으로 5장에서 실험 결과를 바탕으로 결론을 맺는다.

II. 수중 CDMA 송신기 구조

일반적으로 CDMA의 순방향 링크는 하나의 기지국에서 다수의 단말로 전송되는 통신 링크를 의미한다. 수중에 배치된 다수의 센서 노드에서 센싱된 데

이터가 수면에 위치한 싱크 노드로 수집되는 수중 음향 센서 네트워크 환경에서의 순방향 링크는 Fig. 1(a)와 같이 싱크 노드에서 센서 노드로의 통신 링크를 의미한다. 싱크 노드에서 발생된 각 사용자 데이터는 직교 부호를 사용하여 다중화되어 각 센서 노드로 전송된다. 센서 노드는 자신의 직교 부호를 사용하여 수신 신호에서 자신의 데이터를 구분할 수 있다. 이 때, 싱크 노드만 송신에 참여하므로 이질적 채널을 형성하는 다른 노드로부터의 간섭은 무시된다. 반면, 역방향 링크는 순방향 링크와 반대 과정으로 Fig. 1(b)에 나타낸 것과 같이 다수의 센서 노드에서 싱크 노드로의 통신 링크를 의미한다. 따라서 이질적 채널을 통해 전송되는 각 센서 노드로부터의 데이터는 상호간에 간섭으로 작용하며, 싱크 노드에서는 직교 부호의 직교성을 이용하여 이러한 간섭을 해결한다. 일반적으로 직교 부호 사이의 직교성을 유지하기 위해 센서 노드의 데이터는 싱크 노드로 동시에 수신되도록 설계된다.

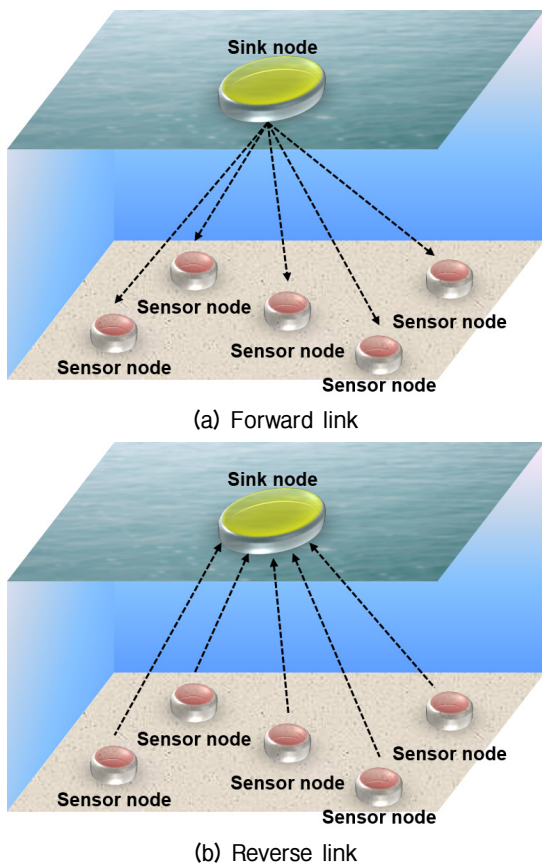


Fig. 1. Structure of underwater CDMA system.

2.1 순방향 링크

Fig. 2는 두 개의 사용자 데이터에 대한 순방향 링크 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 월시 부호 $w_1(t)$ 와 $w_2(t)$ 를 곱함으로써 확산된다. 한 주기의 월시 부호는 사용자 데이터의 모든 심볼마다 곱해지며, 따라서 송신 신호는 사용자 데이터의 심볼 단계에서 월시 부호의 직교성을 유지할 수 있다. 이때 곱해지는 월시 부호의 전송률과 사용자 데이터의 전송률의 비를 확산 이득이라 하며, 일반적으로 확산 이득이 높을수록 비트 오류율 측면에서 나은 성능을 나타낸다. 월시 부호로 확산된 사용자 데이터는 수신기에서의 성공적인 PN 획득을 위해 모든 신호의 값이 1인 파일럿 신호 $p(t)$ 와 함께 더해진다. 파일럿 신호가 더해진 신호는 월시 부호와 같은 전송률의 PN 부호 $pm(t)$ 가 곱해진 뒤 반송파 $c(t)$ 로 변조되어 패킷 형태로 전송되며, 송신 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

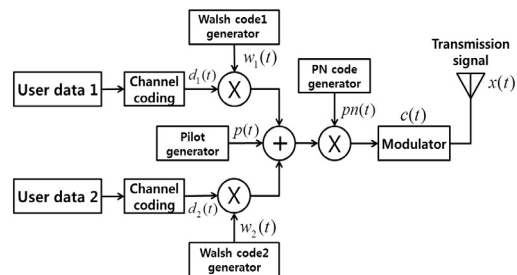


Fig. 2. Transmitter structure of the forward link.

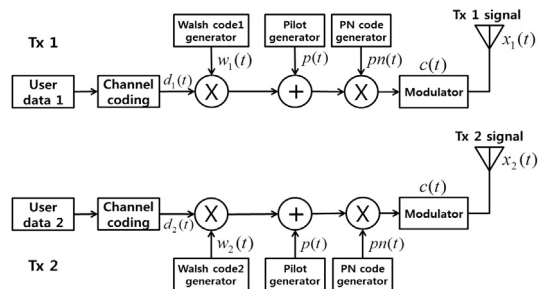


Fig. 3. Transmitter structure of the reverse link.

2.2 역방향 링크

Fig. 3은 두 개의 사용자 데이터에 대한 역방향 링크 송신기 구조를 나타낸다. 각 사용자 데이터에 대한 신호 처리 과정은 서로 다른 송신기에서 독립적으로 진행된다는 것을 제외하고 순방향 링크와 흡사하며, 송신 신호는 Eq. (2)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} x_1(t) &= [d_1(t) \cdot w_1(t) + p(t)] \cdot pn(t) \cdot c(t), \\ x_2(t) &= [d_2(t) \cdot w_2(t) + p(t)] \cdot pn(t) \cdot c(t). \end{aligned} \quad (2)$$

III. 다이버시티 수신기 구조

Fig. 4는 순방향 및 역방향 링크의 다이버시티 기법을 적용한 수신기 구조를 나타낸다. 수신된 신호는 반송파를 곱한 뒤 저역 통과 필터를 통과함으로써 복조 과정이 수행된다. 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 시점을 찾는 과정이며, 이론적으로는 PN 부호의 매 주기마다 큰 상관값을 가지는 시점이 나타나고 이외의 시점에서는 0이 된다. 그러나 수중 채널의 다중 경로 전파 특성으로 인해 상관값이 최대가 되는 시점 주변으로 큰 상관값을 나타내는 여러 시점이 발생하며, 다이버시티 기법을 활용하여 이를 병렬적으로 처리하고 선형적으로 결합함으로써 수중 환경에 보다 적합한 수신기를 설계할 수 있다. PN 획득과 다이버시티 특

성과 관련한 자세한 해설은 각각 3.1절과 3.2절에서 다룬다.

3.1 PN 획득

수신기는 수신 신호와 송신기에서 사용한 PN 부호 사이의 상관값이 최대가 되는 시점을 찾으며, 이때 상관값이 최대가 되는 시점이 수신 신호의 시작점이 된다. 또한 상관값이 최대가 되는 시점에서의 위상값은 수신 신호의 위상 오류 정보이며, 수신기는 위상 오류 정보의 역수를 수신 신호에 곱함으로써 위상 오류를 정정할 수 있다.

PN 획득은 순방향 링크와 역방향 링크에 따라 다르게 진행된다. 순방향 링크의 경우 하나의 신호가 수신되므로 수신기는 단순히 하나의 PN 부호 주기 결과를 얻게 된다. 그러나 역방향 링크의 경우 하나의 수신 신호에 서로 다른 오프셋을 가지는 다수의 PN 부호가 포함되므로 다수의 주기에 대한 PN 획득 결과를 얻게 되며, 수신기는 이를 PN 부호의 주기와 송신 패킷의 길이를 활용하여 구분한다. Fig. 5는 송신 신호가 두 개일 경우 역방향 링크의 PN 획득 결과에 대한 예시를 나타낸다. 두 개의 서로 다른 오프셋을 가지는 PN 부호로 인해 큰 상관값을 가지는 시점이 PN 부호의 주기마다 나타나지 않는다. 수신기는 PN 부호의 주기와 송신 패킷의 길이를 활용하여 PN 획득 결과를 두 개로 나눌 수 있으며 각각에 대해서 독립적으로 PN 획득 이후의 수신 신호 복호 과정을 수행한다.

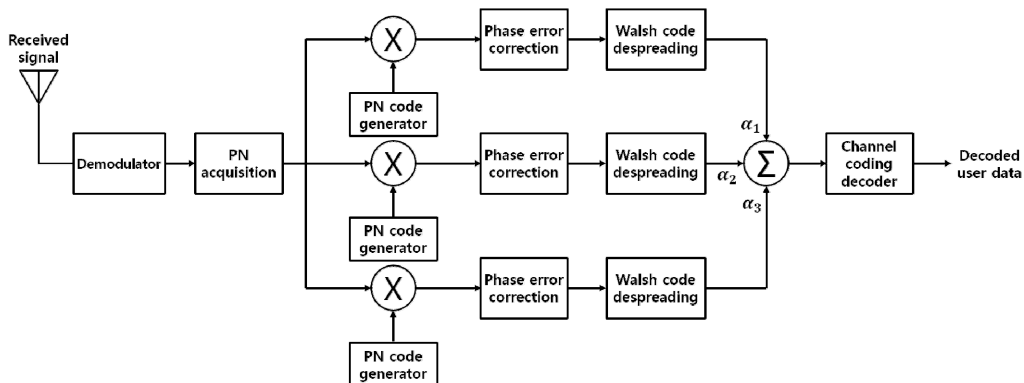


Fig. 4. Diversity receiver structure.

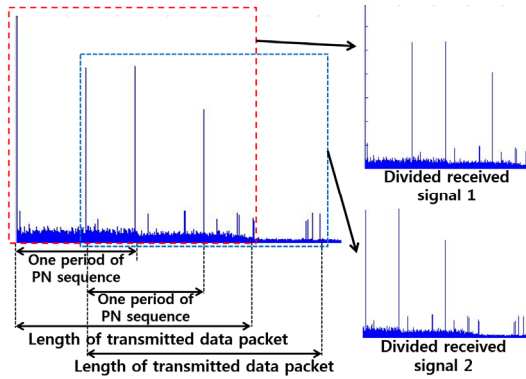


Fig. 5. Example of PN acquisition for the reverse link (two users).

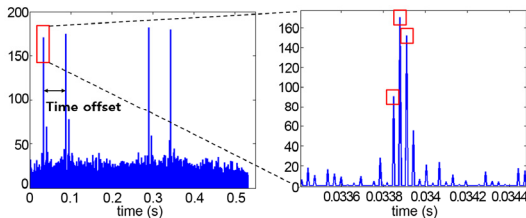


Fig. 6. Example of PN acquisition for diversity scheme (two users, reverse link).

3.2 다이버시티 기법

Fig 6은 다이버시티 기법 활용을 위한 PN 획득 기법의 예시를 나타낸다. 큰 상관값을 가지는 시점을 시간축으로 확장하여 살펴보면 가장 큰 상관값을 가지는 시점 주변으로 다수의 큰 상관값을 가지는 시점이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 수신기는 가장 큰 상관값을 가지는 시점과 큰 상관값을 가지는 몇 개의 시점을 선택하여 각각의 시점에 대해 PN 부호 역확산, 위상 오류 정정, 월시 부호 역확산 과정을 병렬적으로 수행한 후 각 결과를 선형적으로 결합한다. 선형 결합에 사용되는 계수($\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$)는 사용하는 다이버시티 기법에 의해 결정된다. 동일 이득 합성 기법의 경우 모든 계수는 1의 값을 가지며, 최대비 합성 기법의 경우 계수의 값은 PN 획득에서의 상관값에 비례하여 결정된다.^[17]

IV. 저수지 실험 결과

저수지 실험은 2015년 3월 6일 경상북도 문경시 경천호에서 수행되었으며, 순방향 링크와 역방향 링크

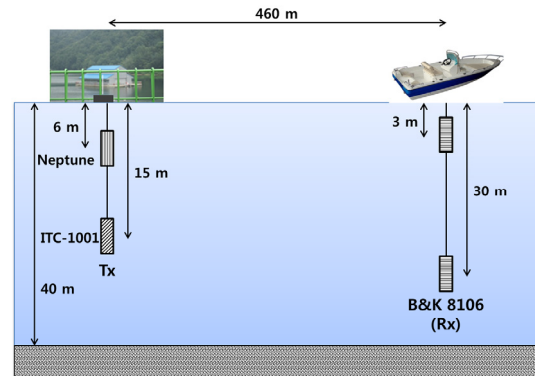


Fig. 7. Layout of the lake experiment.

모두 동일한 파라미터를 사용하여 실험을 수행하였다. 사용자 데이터로는 105 bit의 문자형 데이터에 1/5 부호율의 길쌈 부호(convolutional coding)를 적용하여 전체 525 bit 길이의 데이터가 사용되었다. 데이터 전송률은 500, 1000 bps의 두 가지가 사용되었으며, 8칩(9 dB 확산 이득), 16칩(12 dB 확산 이득)의 월시 부호가 사용되었다. 따라서 송신 신호의 전송률(chip per second, cps)은 최소 4 Kcps(= 500 × 8)에서 최대 16 Kcps(= 1000 × 16)로 설정되었다. PN 부호는 월시 부호와 동일한 부호율을 사용하며 송신 패킷에 두 주기의 PN 부호가 포함될 수 있도록 PN 부호의 길이가 설정되었다. 변조 기법으로는 비트 오류율 측면에서 상대적으로 우수한 성능을 나타내는 BPSK 기법이 사용되었다. 반송파 주파수와 샘플링 주파수는 각각 16 kHz와 192 kHz로 설정되었다. 다이버시티 기법을 위해 수신기는 PN 획득 이후 가장 큰 상관값을 가지는 세 시점을 선택하여 각 시점에 대해 다이버시티 기법을 사용한다.

Fig. 7은 저수지 실험 구성을 나타낸다. 송신기는 ITC-1001 트랜스듀서^[18]와 Neptune 트랜스듀서^[19]가 사용되었으며, 동일한 위치의 15 m와 6 m 수심에 배치되었다. 수신기는 두 개의 B&K-8106^[20]이 사용되었으며, 동일 위치의 3 m, 30 m 수심에 배치되었다. 송신기와 수신기 사이의 거리는 460 m이며, 저수지의 평균 수심은 약 40 m이다.

Fig 8은 ITC-1001 트랜스듀서와 두 수신기 사이의 채널 응답을 나타낸다. ITC-1001 트랜스듀서와 3 m 수심에 배치된 수신기 사이의 채널 응답은 직경로 신호가 수신된 이후 각각 약 3 ms, 10 ms 이후에 반사

신호가 수신되었다. 30m 수심에 배치된 수신기의 채널 응답의 경우 직경로 신호가 수신된 이후 8 ms 이후에 반사 신호가 수신되었다. 이러한 반사 신호는 수신기에서의 PN 획득의 성능을 저하시키는 요인이 되며, 따라서 ITC-1001과 수심 3m에 배치된 수신기 사이의 채널 응답이 상대적으로 낮은 품질의 채널 상태를 의미한다.

4.1 순방향 링크 실험 결과

순방향 링크 실험에는 2, 3, 4개의 사용자 데이터가

다중화되어 있는 송신 신호를 사용하였다. 다중화된 사용자 데이터의 수가 두 개인 경우 서로 다른 수신기에서 사용자 데이터를 따로 복원하였으나, 수신기의 부족으로 인해 다중화된 사용자 데이터의 수가 세 개, 네 개인 경우 수심 30m에 배치되어 있는 수신기에서 모든 사용자 데이터를 복호하였다.

Fig. 9는 두 개의 사용자 데이터가 다중화되어 있는 순방향 링크 실험의 수신 신호 결과를 나타낸다. Fig. 9(a)와 (b)는 확산 이득이 9 dB, 데이터 전송률이 500 bps 인 경우의 수신 신호이며, 이는 가장 낮은 확

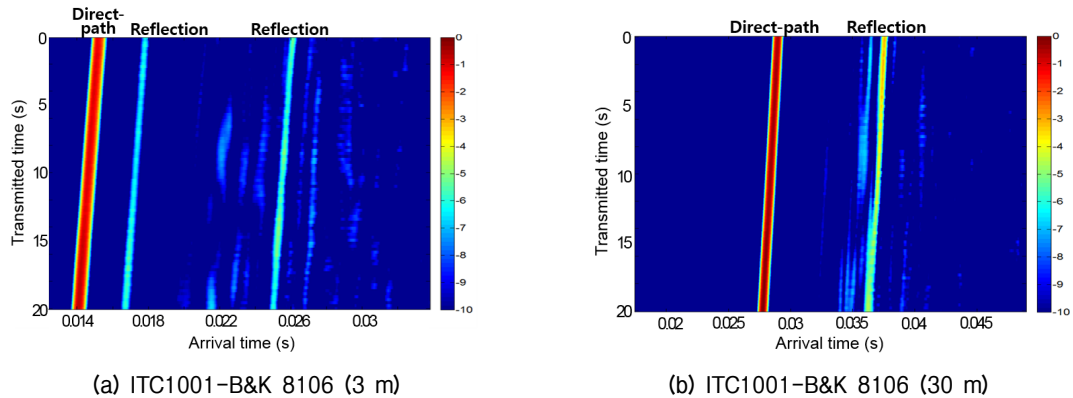


Fig. 8. Channel impulse response.

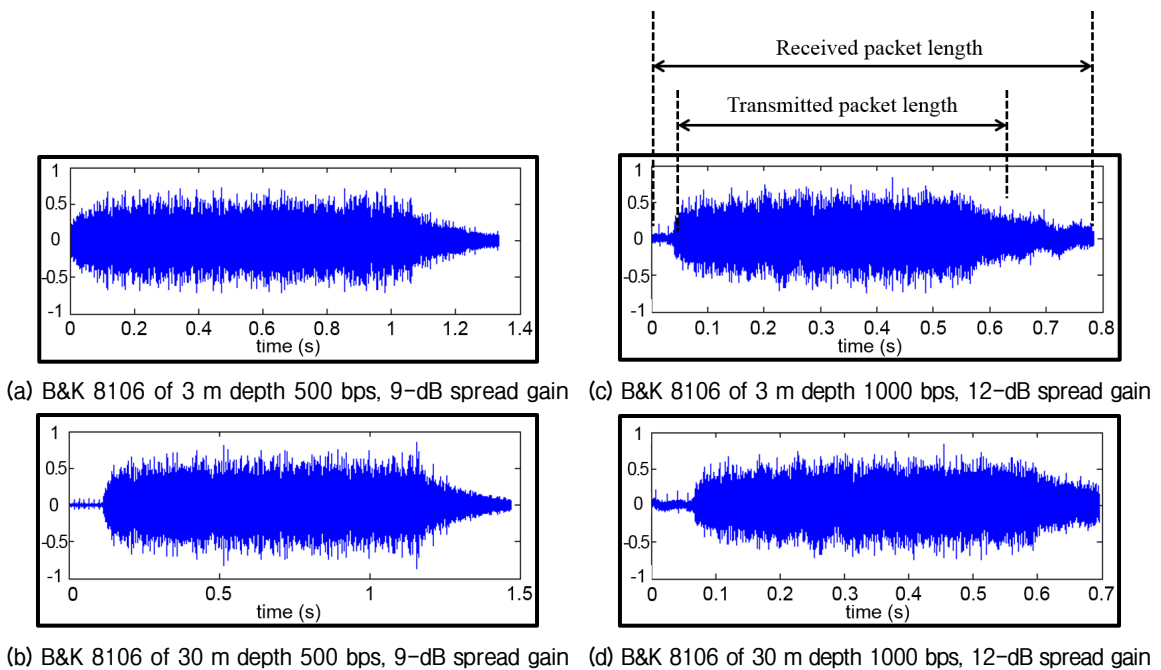


Fig. 9. Received signals in the forward link (two-user multiplexing).

산 이득 및 전송률에 대한 실험이다. Fig. 9(c)와 (d)는 확산 이득이 12dB, 데이터 전송률이 1000 bps 인 경우의 수신 신호를 나타내며, 가장 높은 확산 이득 및 전송률에 대한 실험이다. Fig. 9의 모든 경우에 대해서 Fig. 9(c)에 나타낸 것과 같이 수신 패킷의 길이는 다중 경로 페이딩으로 인해 송신 패킷의 길이보다 길어진다. 또한 Fig. 9(a)와 (b), Fig. 9(c)와 9(d)를 각각 비

교했을 때, 똑같은 송신 패킷을 수신했다 하더라도 송신기와 수신기 사이의 채널이 서로 다르므로 수신 신호의 형태가 다름을 확인할 수 있다.

Fig. 10은 Fig. 9의 수신 신호에 대한 PN 획득 결과를 나타낸다. 일반적으로 확산 이득이 높아질수록 비트 오류율 측면에서 보다 좋은 성능을 나타내며, PN 획득 결과에서도 보다 좋은 성능을 나타낸다. 따

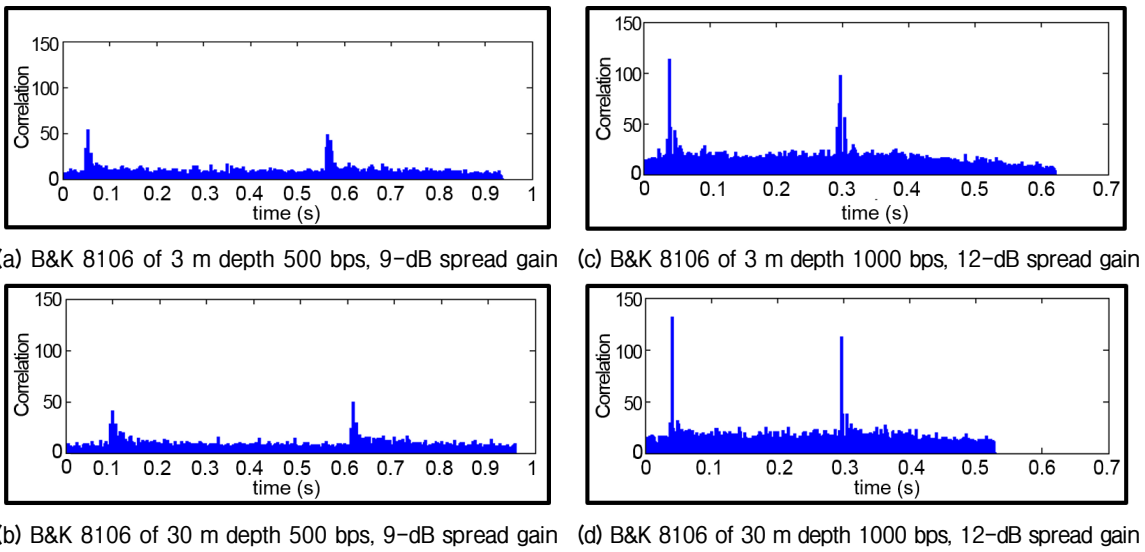


Fig. 10. PN acquisition results in the forward link (two-user multiplexing).

Table 1. Numerical results of the forward link experiment.

Bit rate (bps)	Diversity scheme	# of multiplexed user data	9-dB spread gain				12-dB spread gain			
			Bit error rate (%)				Bit error rate (%)			
			(without channel coding / with channel coding)				(without channel coding / with channel coding)			
			user 1	user 2	user 3	user 4	user 1	user 2	user 3	user 4
500	non	2	16.3 / 4.2	17.3 / 5.0	-	-	15.3 / 1.3	15.9 / 1.9	-	-
		3	18.4 / 5.7	17.3 / 5.0	18.4 / 5.7	-	17.7 / 4.6	16.3 / 4.2	15.4 / 3.5	-
		4	20.3 / 7.4	18.4 / 5.7	19.6 / 6.5	20.3 / 7.4	18.4 / 5.7	17.7 / 4.6	19.6 / 6.5	17.3 / 4.0
	EGC	2	10.6 / 0	9.3 / 0	-	-	8.4 / 0	6.5 / 0	-	-
		3	12.7 / 0	11.4 / 0	12.1 / 0	-	10.3 / 0	9.7 / 0	10.3 / 0	-
		4	13.7 / 0	13.3 / 0	14.0 / 0	12.9 / 0	11.3 / 0	10.7 / 0	12.4 / 0	12.4 / 0
	MRC	2	7.4 / 0	6.5 / 0	-	-	4.3 / 0	3.1 / 0	-	-
		3	9.3 / 0	10.1 / 0	9.7 / 0	-	7.4 / 0	6.5 / 0	6.9 / 0	-
		4	11.3 / 0	10.7 / 0	10.1 / 0	11.7 / 0	9.7 / 0	10.7 / 0	9.2 / 0	10.0 / 0
1000	non	2	18.2 / 5.0	19.6 / 6.5	-	-	17.7 / 4.6	16.9 / 4.3	-	-
		3	20.4 / 7.3	19.6 / 6.5	21.3 / 8.4	-	19.0 / 5.6	18.7 / 5.0	18.4 / 4.5	-
		4	22.3 / 8.4	24.3 / 10.2	20.9 / 7.3	22.7 / 9.1	20.4 / 7.0	19.3 / 6.0	19.6 / 6.5	19.3 / 6.0
	EGC	2	11.7 / 0	12.2 / 0	-	-	10.3 / 0	10.8 / 0	-	-
		3	13.3 / 0	13.3 / 0	12.7 / 0	-	12.3 / 0	11.7 / 0	11.1 / 0	-
		4	14.2 / 0	13.7 / 0	13.7 / 0	13.7 / 0	12.7 / 0	13.0 / 0	13.4 / 0	12.7 / 0
	MRC	2	8.4 / 0	7.9 / 0	-	-	5.4 / 0	6.5 / 0	-	-
		3	11.2 / 0	10.7 / 0	12.1 / 0	-	8.7 / 0	8.4 / 0	7.8 / 0	-
		4	13.2 / 0	12.4 / 0	12.7 / 0	13.4 / 0	11.2 / 0	10.7 / 0	11.3 / 0	12.1 / 0

라서 Fig. 10(a), (b)와 Fig. 10(c), (d)를 비교했을 때 상관값이 최대가 되지 않는 시점에서의 값들이 보다 0에 가까운 값을 가지며 상관값이 최대가 되는 시점에서의 값 또한 큰 것을 확인할 수 있다.

Table 1은 순방향 링크 실험의 결과를 비트 오류율 측면에서 분석하여 수치적으로 나타낸 것이다. 일반적으로 전송률이 낮을수록, 확산 이득이 높을수록 낮은 비트 오류율 특성을 나타낸다. 다이버시티 기법을 적용하지 않았을 경우에는 채널 코딩의 디코딩 이후에도 약간의 비트 오류가 나타남을 확인할 수 있지만 다이버시티 기법을 적용한 경우 모든 경우에서 사용자 데이터가 오류 없이 복호된다. 또한 동일 이득 합성 기법에 비해 최대비 합성 기법의 비트 오류율이 낮게 나타남을 확인할 수 있다.

4.2 역방향 링크 실험 결과

역방향 링크 실험에서 두 개의 송신기는 하나의 컴퓨터를 통해 제어되므로 전송 시점이 동기화된다.

또한 저수지의 크기가 크지 않아 두 개의 송신기와 수신기 사이의 거리가 동일하기 때문에 수신기에 두 개의 데이터 패킷이 거의 동시에 수신된다. 그러나 PN 획득 과정을 통해 두 개의 수신 신호를 구분해낼 수 있으며 구분한 신호에 대한 복호가 독립적으로 수행된다. 역방향 링크 실험에서는 채널의 상태가 상대적으로 양호한 30m 수심에 배치된 B&K-8106을 수신기로 사용하였다.

Fig. 11은 역방향 링크 실험의 수신 신호 결과를 나타낸다. 위에 설명한 것과 같이 두 개의 송신 신호가 거의 동시에 수신되어 하나의 신호가 수신된 것처럼 보이지만, PN 획득 과정을 통해서 서로 다른 두 개의 신호로 구분해낼 수 있다.

Fig. 12는 역방향 링크 실험의 PN 획득 결과를 나타낸다. 순방향 링크와 마찬가지로 확산 이득이 큰 경우 확산 이득이 작은 경우보다 상관값이 최대가 되지 않는 시점에서 0과 가까운 값을 가지며 최대 상관값 또한 더 큰 것을 확인할 수 있다.

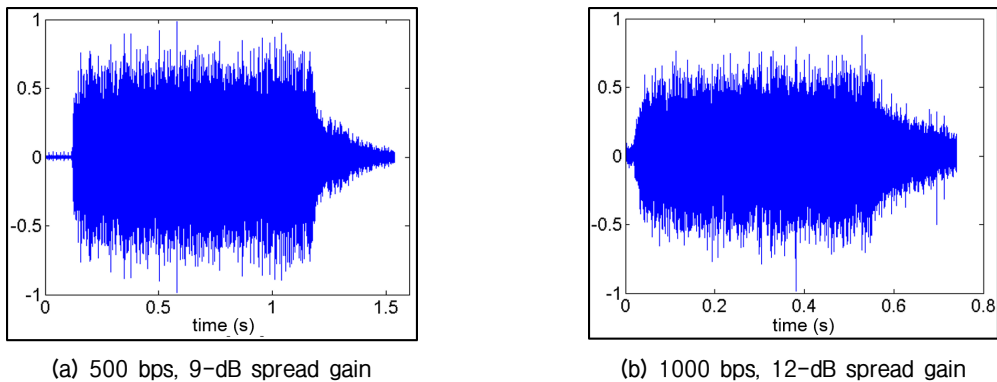


Fig. 11. Received signals in the reverse link.

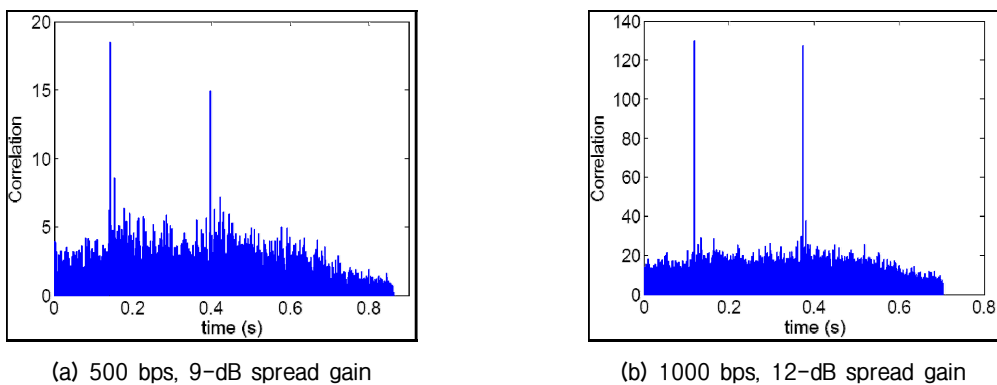


Fig. 12. PN acquisition results in the reverse link.

Table 2. Numerical results of the reverse link experiment.

Bit rate (bps)	Diversity scheme	9-dB spread gain		12-dB spread gain	
		Bit error rate (%) (without channel coding / with channel coding)		Bit error rate (%) (without channel coding / with channel coding)	
		user 1	user 2	user 1	user 2
500	non	18.7 / 5.4	16.4 / 4.3	15.5 / 2.7	15.9 / 3.1
	EGC	12.3 / 0	11.3 / 0	10.6 / 0	10.2 / 0
	MRC	10.4 / 0	9.8 / 0	8.1 / 0	8.1 / 0
1000	non	20.3 / 6.5	20.8 / 7.0	18.9 / 5.5	19.0 / 6.0
	EGC	13.9 / 0	14.2 / 0	11.3 / 0	12.3 / 0
	MRC	11.3 / 0	11.9 / 0	10.6 / 0	11.3 / 0

Table 2는 역방향 링크 실험 결과를 비트 오류율 측면에서 분석하여 수치적으로 나타낸 것이다. 순방향 링크 실험 결과와 비슷하게 데이터 전송률이 낮을수록, 확산 이득이 높을수록 낮은 비트 오류율을 나타낸다. 다이버시티 기법을 적용하지 않았을 경우 채널 코딩의 디코딩 이후에도 사용자 데이터에 약간의 오류가 나타나지만 다이버시티 기법을 적용한 경우에는 사용자 데이터가 완벽하게 복호됨을 확인할 수 있다. 다이버시티 기법 간의 성능 비교에서도 동일 이득 합성 기법의 결과에 비해 최대비 합성 기법의 비트 오류율이 낮다. 또한 순방향 링크 실험 결과 (Table 1)와 비교했을 때 보다 높은 비트 오류율을 나타낸다. 이는 서로 다른 채널을 통과한 두 개의 송신 신호가 동시에 수신되어 PN 획득 및 위상 오류 정정이 복잡하기 때문이다.

V. 결론

본 논문에서는 다이버시티 기법이 적용된 순방향 및 역방향 링크의 수중 CDMA 트랜스시버를 설계하고 저수지 실험을 통해 트랜스시버의 성능을 분석하였다. 순방향 및 역방향 링크 모두 사용자 데이터의 다중화를 위해 월시 부호를 사용하였으며, PN 획득 및 위상 오류 정정을 위해 PN 부호를 활용하였다. PN 획득을 통해 수신 신호와 송신기에서 사용한 PN 부호 사이의 상관값이 최대가 되는 시점을 찾음으로써 수신기는 수신 신호의 시작점과 수신 신호의 위상 오류 정보를 얻을 수 있다. 또한 수중 채널의 열악한 다중 경로 페이딩을 극복하고 트랜스시버의 성능을

개선하기 위해 동일 이득 합성 및 최대비 합성의 다이버시티 기법이 수신기에 적용되었다. 저수지 실험 결과 다이버시티 기법을 적용하지 않았을 경우 채널 코딩의 디코딩 이후에도 사용자 데이터가 완벽히 복호되지 않았지만 다이버시티 기법을 적용한 경우 사용자 데이터가 오류 없이 복호됨을 확인할 수 있었다. 또한 최대비 합성 기법이 동일 이득 합성 기법에 비해 보다 우수한 비트 오류율 특성을 나타냈다.

추후 수중 CDMA 시스템의 광해역 적용 가능성을 확인하기 위해 해상 실험을 수행할 계획이다. 해상 실험에서는 송신기와 수신기 사이의 거리 및 사용자 데이터의 크기, PN 부호 주기, 확산 이득, 데이터 전송률과 같은 파라미터를 다양하게 적용하여 실험함으로써 광해역 환경에 최적화된 수중 CDMA 시스템을 구현할 예정이다.

감사의 글

이 논문은 2016년 해양수산부 재원으로 한국해양과학기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임(분산형 수중 관측 제어망 개발).

References

1. I. F. Akyildiz, D. Pompili, and T. Melodia, "Underwater acoustic sensor networks: research challenges," *Ad Hoc Netw.* (Elsevier), **3**, 257-259 (2005).
2. L. Xavier, *An Introduction to Underwater Acoustics - Principles and Applications* (Springer Praxis, New York, 2002), pp. 295-302.

3. M. Stojanovic and C. J. Preisig, "Underwater acoustic communication channels: propagation models and statistical characterization," *IEEE Comm. Mag.* **47**, 84-89 (2009).
4. M. Stojanovic, "On the relationship between capacity and distance in an underwater acoustic communication channel," in *Proc. ACM SIGMOBILE Mobile Comput. and Comm. Rev.* 34-43 (2007).
5. J.-H. Cui, J. Kong, M. Gerla, and S. Zhou, "Challenges: building scalable mobile underwater wireless sensor networks for aquatic applications," *IEEE Network, Special Issue on Wireless Sensor Networking 2006*, **20**, 12-18 (2006).
6. 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*, 228-233 (1999).
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*, **26**, 586-593 (2001).
8. E. Cheng, Z. Zhuang, K. Zeng, Y. Qi, and J. Deng, "Performance analysis of underwater acoustic FH-CDMA network," in *Proc. ASID, 2008*, 101-104 (2008).
9. J. Yan, R. Xu, D. Wang, H. Chen, and X. Hu, "Study on MC-CDMA for underwater acoustic networks," in *Proc. Computer Sci. and Software Eng. 2008*, 614-617 (2008).
10. D. Pompili, T. Melodia, and I. F. Akyildiz, "A CDMA-based medium access control for underwater acoustic sensor networks," *IEEE Trans. Wireless Commun.* **8**, 1899-1909 (2009).
11. J.-P. Kim, J.-W. Lee, Y.-S. Jang, K. Son, and H.-S. Cho, "A CDMA-Based MAC protocol in tree-topology for underwater acoustic sensor networks," in *Proc. WAINA'09*, 1166-1171 (2009).
12. H. Chen, G. Fan, L. Xie, and J.-H. Cui, "A hybrid path-oriented code assignment CDMA-Based MAC protocol for underwater acoustic sensor networks," *Sensors*, **13**, 15006-15025 (2013).
13. M. Stojanovic, and L. Freitag, "Wideband underwater acoustic CDMA: adaptive multichannel receiver design," in *Proc. MTS/IEEE OCEANS 2005*, 1508-1513 (2005).
14. S. Guo, Z. Zhao, and Q. Pan, "A CDMA acoustic communication system for multiple underwater robots," in *Proc. ROBOT 2008*, 1522-1526 (2009).
15. S. Guo and Z. Zhao, "Design of a QPSK-CDMA acoustic communication system for multiple underwater vehicles," in *Proc. ICMA 2009*, 3568-3572 (2009).
16. B.-M. Seo, J. Cho, K. Son, and H.-S. Cho, "Design for

underwater code division multiple access transceiver," in *Proc. Oceans' 13*, 1-5 (2013).

17. M.-S. Alouini, S. W. Kim, and A. Goldsmith, "Rake reception with maximal-ratio and equal-gain combining for DS-SS systems in nakagami fading," *Universal Personal Comm. record 1997*, **2**, 708-712 (1997).
18. *Channel Technologies Group Ltd.*, <http://www.channeltechgroup.com/publication/model-itc-1001-spherical-omnidirectional-transducer/>, 2016.
19. *Neptune Sonar*, <http://www.neptune-sonar.co.uk/>, 2016.
20. *Brüel & Kjaer*, <http://www.bksv.com/>, 2016.

저자 약력

▶ 서 보 민 (Bo-Min Seo)



2009년 2월: 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 공학사
 2011년 8월: 경북대학교 IT대학 전자전기컴퓨터학부 공학석사
 2011년 8월 ~ 2013년 2월: 국방 수중 통신/탐지 특화 연구 센터 전문연구요원
 2013년 3월 ~ 현재: 경북대학교 대학원 전자공학부 박사과정

▶ 조 호 신 (Ho-Shin Cho)



1992년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학사
 1994년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학석사
 1999년 2월: 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 공학(박사)
 1999년 3월 ~ 2001년 2월: 한국전자통신연구원 선임연구원
 2001년 3월 ~ 2003년 2월: 한국항공대학교 전자정보통신컴퓨터공학부 전임 강사
 2003년 3월 ~ 2012년 3월: 경북대학교 전자전기컴퓨터학부 부교수
 2010년 1월 ~ 2011년 1월: 미국 커네티컷 대학 방문교수
 2012년 4월 ~ 현재: 경북대학교 IT대학 전자공학부 교수