

## 직접 수열 대역확산 방식을 이용한 수중음향통신 연구

한정우\* · † 김기만 · 손윤준\*\*

\*한국해양대학교 대학원, † 한국해양대학교 전파공학과, \*\*국방기술품질원

### A Study on the Underwater Acoustic Communication with Direct Sequence Spread Spectrum

Jeong-Woo Han\* · † Ki-Man Kim · Yoon-Jun Son\*\*

\*, † Dept. of Radio Communication Engineering, Korea Maritime University, Busan, 606-791, Korea

\*\* Defense Agency for Technology and Quality, Geoje, 656-714, Korea

**요 약** : 이 논문에서는 수중음향통신의 성능 저해 요소 가운데 하나인 다중경로로 인한 인접 심벌간의 간섭(Inter-Symbol Interference)을 극복하기 위하여 직접 수열 대역확산(Direct Sequence Spread Spectrum) 기법의 적용성에 관해 연구하였다. 직접 수열 대역확산 방식은 육상 이동통신 분야에서는 이미 널리 적용되고 있으나 수중음향통신에서는 상대적으로 적은 관심을 받았다. 이에 그 적용성을 검증하기 위해 실제 수중 채널에서 수집한 채널 응답 함수를 이용하여 모의실험을 수행한 결과 일반적인 QPSK(Quadrature Phase Shift Keying) 기법의 경우 BER(Bit Error Rate)이  $1.14 \times 10^{-1}$  이었으며, 직접 수열 대역확산기법이 적용된 경우 BER이  $6.73 \times 10^{-3}$  으로 일반적인 QPSK에 비해 향상된 성능을 나타내는 것을 확인할 수 있었다. 근거리 해상 실험을 수행한 결과 일반적인 QPSK 기법의 경우 전송률 1 kbps에서 BER이  $3.19 \times 10^{-1}$  이었으며, 직접 수열 대역확산 기법이 적용된 경우 BER이  $5.17 \times 10^{-4}$  이었다.

**핵심용어** : 수중음향통신, 다중경로, 직접수열 대역 확산, 수중 통신 실험, BER, QPSK

**Abstract** : In this paper, we study the application of DSSS(Direct Sequence Spread Spectrum) in underwater acoustic communication for robust the ISI(Inter-Symbol Interference). We confirm the application of DSSS in underwater acoustic communication in underwater by the simulation with underwater channel impulse response and experiment. As a simulation result, the BER of QPSK technique is  $1.14 \times 10^{-1}$  and the BER of DSSS technique is  $6.73 \times 10^{-3}$ . And we performed the experiment of DSSS technique in underwater. As a experiment result, the BER of QPSK technique is  $3.19 \times 10^{-1}$  and the BER of DSSS technique is  $5.17 \times 10^{-4}$ .

**Key words** : Underwater acoustic communication, Multi-path, DSSS, Underwater communication experiment, BER, QPSK

## 1. 서 론

최근 해양 IT 융합기술과 수중 센서 네트워크에 대한 관심 증가와 더불어 다양한 연구가 진행되고 있다(변 등, 2009). 수중에서 통신 시스템의 성능은 전달손실, 다중경로, 도플러 및 노이즈에 의해 좌우되며, 특히 천해에서의 다중경로는 해수면의 시변 산란에 의해 도플러 확산파가 직접파에 혼입되어 통신 채널의 특성을 좌우한다(A.Baggeroer, 1984; D.B Kifoyle et al, 2000). 그러므로 수중 채널에서 신뢰성을 갖는 데이터 전송을 위하여 수중 채널의 특성을 결정하는 해수면, 해저, 수심 등의 시공간 변화에 의한 다중경로 특성이나 도플러 확산이 시스템의 설계에 고려되어야 한다. 이러한 수중채널의 특성 때문에 과거에는 FSK(Frequency Shift Keying) 등과 같은 비동기 위상변조기법 등을 이용하였으나 최근에는 처리 기법

의 발전으로 PSK(Phase Shift Keying), OFDM(Orthogonal Frequency Division Multiplexing) 등의 다양한 연구가 진행되고 있다(L. Freitag et al, 2002; M. Suzuki et al, 1992; S.Coatelan et al, 1995).

대역확산 통신 기법은 초기에 군용시스템에 적용되어 왔으며, 다양한 분야에서 응용되었고 연구가 활발히 진행 중이다(D.B Kifoyle et al, 2000; L. Freitag et al, 2002). 대역확산 기술을 이용한 통신방식에는 직접수열(Direct Sequence : DS), 주파수도약(Frequency Hopping : FH), 시간도약(Time Hopping : TH) 및 혼합방식 방식 등이 있으며, 응용분야로는 간섭신호 억제(Interference injection), 다중경로 억제(Multipath suppression), 정밀 거리 측정 시스템(High resolution ranging system), CDMA(Code Division Multiple Access) 등이 있다(C.N.Pateros et al, 1996; J.G Proakis et

\*연회원, hjw1002@hhu.ac.kr 051)410-4918

\*\*연회원, syj11030@daq.re.kr 055)680-6394

† 교신저자, 연회원, kimkim@hhu.ac.kr 051)410-4423

all 2008; L.Freitag et all, 2001; U.Madhow et all 1994; Y.Watanabe et all, 2005.)

본 논문에서는 수중통신 채널의 다중경로 전달 특성에 의해 통신 시스템의 성능이 크게 좌우된다는 점을 감안하여 수중음향통신에서 다중 경로로 인해 발생하는 인접 심벌간의 간섭을 극복하기 위하여 대역확산 통신방식 중 하나인 직접수열 대역확산 기법을 수중음향통신에 적용하였다. 모의실험 및 해상실험을 통해 적용성 및 성능을 검증하였다.

## 2. 대역 확산 기법

대역확산통신은 변조 시 임의의 신호를 이용하여 전송하고자 하는 신호가 가지는 대역폭보다 넓은 대역폭을 가지도록 신호의 대역폭을 확산하여 통신을 하는 방식을 말한다. 대역폭의 확산은 데이터와는 무관한 의사 잡음(Pseudo Noise : PN) 부호를 이용하여 신호의 대역폭을 확산시킨다.

직접수열 대역확산은 데이터 신호  $d(t)$ 를 기존의 변조기법으로 변조 신호  $m(t)$ 로 변조한 후, 변조신호  $m(t)$ 를 확산신호  $c(t)$ 를 이용하여 대역폭을 확산하는 방식이다. Fig 1은 직접수열 대역확산의 신호 형태를 보여준다.  $c(t)$  안의 기본 펄스는 칩(chip)이라 하고,  $c(t)$ 의 비트율은 칩율(chip rate)이라고 한다. 이때,  $c(t)$ 의 비트율은  $m(t)$ 의 비트율 보다 높게 설정되어야 한다.

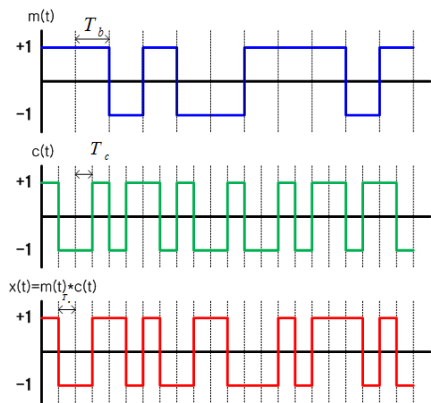


Fig 1. Signal of DS-SS

이때,  $m(t)$ 는 송신신호이며,  $\rho_l$ 은  $l$ 번째 경로 이득 ( $|\rho_l| < 1$ ),  $\tau_l$ 은  $l$ 번째 경로의 시간지연을 나타낸다. 수신기에서 첫 번째 수신되는 신호에 PN 코드를 곱하여 역 확산신호는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \hat{m}(t) &= y(t)c(t) \\ &= Re \left\{ \sum_{l=1}^L \rho_l m(t) c^2(t) \exp(-i2\pi f_c t) \right\} + n(t)c(t) \\ &= Re \left\{ \sum_{l=1}^L \rho_l m(t) \exp(-i2\pi f_c t) \right\} + n(t)c(t) \end{aligned}$$

만일 다중경로로 인해 최소한 한 칩 이상의 시간지연이 발생하면, 원신호의 관점에서 지연신호를 간섭신호로 볼 수 있다. 이때 지연신호와 원신호는 낮은 자기상관(auto correlation)을 가지게 된다. 즉, PN 코드의 자기 상관함수가  $|r| > T_c$  에서 근사적으로 '0'에 가깝다. 따라서 칩 시간  $T_c$ 가 지연시간에 비해 작은 경우 자기 간섭(self-interference)의 영향은 매우 작게 된다. 이를 주파수 영역에서 보게 되면 직접파 신호와 간접파 신호 모두 광대역 신호이지만 수신단의 PN 코드는 직접파 신호의 PN 코드와 동기화 되므로 간접파 신호는 역 확산되지 않고 직접파 신호만 역 확산이 이루어진다. 따라서 간접파 신호는 잡음과 같이 SNR을 조금 감소시키는 효과만을 주게 된다. 이러한 이유로 대역확산 기법은 다중경로를 극복할 수 있다.

본 논문에서는 변조기법으로 QPSK 변·복조를 사용하였으며, 대역확산 기법으로는 직접수열 대역확산 기법을 고려하였다. Fig 2는 QPSK 변·복조 시스템에 직접수열 대역확산 기법을 적용한 시스템(QPSK-DSSS)의 송·수신 블록다이어그램이다. Fig 2(a)는 QPSK-DSSS 시스템의 송신기의 구조를 보여준다. QPSK로 변조된 신호  $m(t)$ 는 PN 코드 발생기로부터 만들어진 PN 신호  $c(t)$ 와 곱해서 대역확산 된다. 대역확산된 전송신호  $x(t)$ 는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$x(t) = Re \{ m(t)c(t)\exp(-i2\pi f_c t) \} \quad (2)$$

이때  $d(t)$ 는 전송하고자 하는 이진 데이터이며,  $m(t)$ 는 QPSK 변조된 신호로서  $m(t) = m_I(t) + jm_Q(t)$  이다.  $c(t)$ 는 PN 코드 발생기에서 만들어진 PN 코드이며,  $f_c$ 는 반송파 주파수이다.

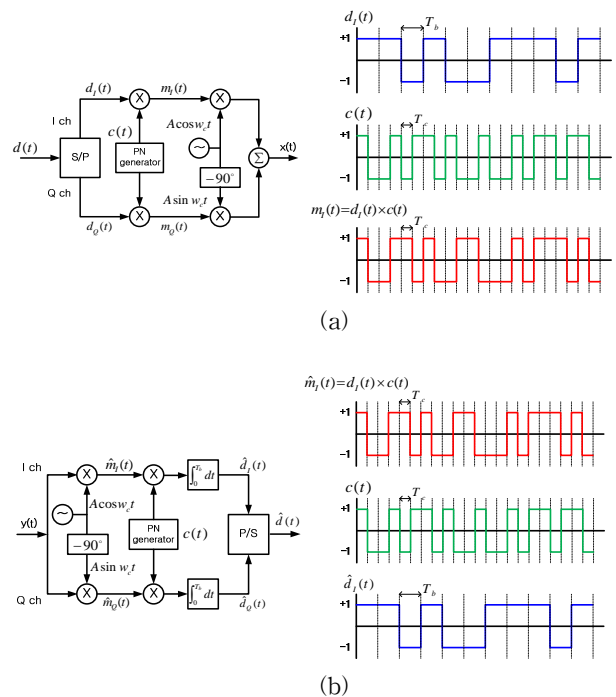


Fig 2. DS-SS system, (a) Transmitter, (b) Receiver.

Fig 2 (b)는 QPSK-DSSS 시스템의 수신기 구조를 보여준다. 송신부에서 대역확산 후 채널을 통과해 수신부에 수신된 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$y(t) = h(t) * x(t) + n(t) \quad (3)$$

$h(t)$ 는 채널 임펄스 함수이며,  $n(t)$ 는 부가성 백색 가우시안 잡음(Additive White Gaussian Noise : AWGN) 이다. 그리고 \*는 convolution을 의미한다. 수신부에서는 송신부에서 대역 확산되어 채널환경을 통해 수신된 신호  $y(t)$ 에 PN 코드  $c(t)$ 를 곱하여 역 확산을 통해 수신신호를 본래의 변조신호로 전환해야 한다. 동기화가 완벽하다 가정하면  $c^2(t) = 1$  이므로 역 확산을 하게 되면 원 신호는 역확산이 되지만 지연신호는 역확산되지 않고 재확산되어 제거되는 효과로 인해 다중경로로 인한 인접심벌간의 간섭이 극복된 일반적인 QPSK 변조신호의 형태가 되며, 이는 식(4)와 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \hat{m}(t) &= y(t)c(t) \\ &= Re\{h(t)m(t)c^2(t)\exp(-i2\pi f_c t)\} + n(t)c(t) \\ &= Re\{h(t)m(t)\exp(-i2\pi f_c t)\} + n(t)c(t) \end{aligned} \quad (4)$$

### 3. 모의실험 및 결과

먼저 수중음향통신에서 가장 큰 장애 요인 가운데 하나인 다중경로 전달로 인한 지연 확산 문제를 극복하기 위해 앞서 언급한 대역확산 기법인 직접수열 대역확산 전송 방식의 성능을 모의실험 통해 고찰하였다.

수중 채널 환경에서 음향 신호는 수심, 수온, 전송거리, 수면의 변화, 해저면의 상태 등과 같은 많은 변수로 인해 다양한 특성을 가진다. 특히 채널의 다중경로로 인한 지연 확산은 수중 통신 채널에서 신호 왜곡의 주요인으로 작용한다. 해저면의 상태에 따른 채널의 지연 특성을 측정된 결과, 음파에 대한 흡수력이 뛰어난 진흙의 경우 10 ms 이내로 신호의 지연이 나타났으며, 반사와 굴절이 많이 발생하는 암반이나 모래의 경우 30 ms까지 신호의 지연이 나타나기도 한다(S.Coatelan et al, 1995). 이외에도 해수면의 반사, 전송거리 및 해저면의 구조에 따라서도 신호의 지연 시간이 다르게 나타난다. 특히 천해의 경우 음파의 속도가 수압의 영향 보다는 수온에 영향을 받는다.

본 논문에서는 부산 연안 바다에서의 잔향음 및 다중경로의 특성을 파악하기 위해 아주 짧은 short pulse인 burst 신호를 송신한 뒤 수신한 신호를 이용하여 수중 채널 특성을 분석하였으며, 여기서 얻어진 수중 채널 임펄스 응답을 이용하여 모의실험을 수행하였다.

모의실험을 위한 수중 채널 임펄스 응답을 얻기 위해 수중 채널의 환경은 Fig 3과 같이 수심 5 m, 송신기 수심 2.5 m, 수신기 수심 1.5 m, 그리고 송신기와 수신기 사이의 거리는 12 m로 하였다. Fig 4는 burst 신호를 수중채널을 통해 수신한

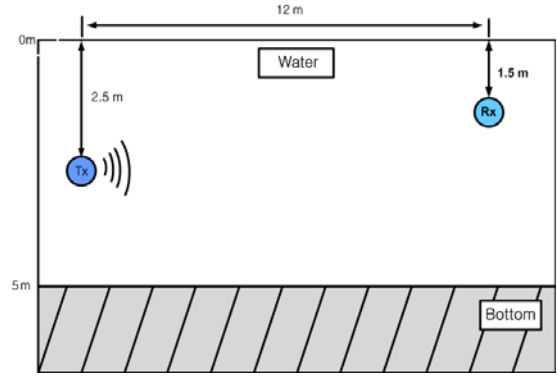


Fig 3. Underwater channel model

결과로써 일정시간동안 10여회의 burst signal을 수집하여 이를 평균한 결과이다. Fig 4를 보면 직접파가 들어오고 약 8 ms를 전후로 하여 간접파가 수신되는 것을 확인할 수 있다. 이러한 파라미터들을 기초로 얻어진 수중 채널 임펄스 응답을 이용하여 수중채널에서 협대역 통신 기법인 QPSK 변·복조 기법과 대역확산 기법을 적용시킨 QPSK-DSSS의 성능을 평가하였다.

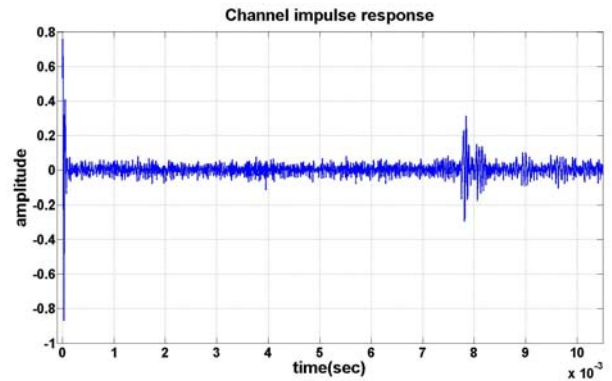


Fig 4. Analysis of Underwater Channel Impulse Response

성능을 비교·평가하기 위해 동일한 조건에서 QPSK 변·복조 시스템과 QPSK-DSSS 기법을 모의실험을 통해 각각의 성능을 비교하였다. 반송 주파수  $f_c$ 는 24 kHz, 샘플링 주파수  $f_s$ 는 192 kHz, 대역확산률은 3배, 데이터 전송속도는 4 kbps로 설정하였으며, SNR은 10 dB로 설정하였다.

Fig 5 (a)는 전송된 영상으로 100×70 크기를 갖는 그레이 영상이며, 각 픽셀은 8 비트로 양자화 되었다. Fig 5 (b)는 앞서 설명된 실제 수중 채널의 임펄스 응답을 가지고 QPSK 변·복조 기법만을 사용한 경우의 정상도와 복원된 영상이며, Fig 5 (c)는 QPSK-DSSS 기법을 사용한 통신의 결과이다. 이때 채널 코딩이나 등화기(equalizer)와 같은 기법들은 적용하지 않았으며, 심벌 타이밍은 완벽하다고 가정하였다. 통신 방식별 모의실험 결과를 비교하였을 때, QPSK 변·복조 기법의 경우 예러 데이터는 총 56,000개의 데이터 중 6,479개로 BER이 약  $1.14 \times 10^{-1}$  이었으며, QPSK-DSSS 변·복조 기법의

경우에는 382개로 약  $6.73 \times 10^{-3}$  이었다.

이러한 결과가 나온 이유는 QPSK 변조의 경우 다중경로로 인한 인접 심벌간 간섭의 영향으로 인해 전송 성능이 저하되었으나 QPSK-DSSS의 경우 채널을 통과한 수신신호의 역확산이 이루어질 때 다중경로로 인해 이 한 칩 이상의 지연이 발생하면서 지연된 신호는 역확산 시 PN 코드와는 동기화가 되지 않아 간섭신호로 판단하기 때문에 역확산이 이루어지지 않고 잡음으로의 효과만 나타내게 된다. 이러한 특성으로 인해 QPSK-DSSS 기법이 QPSK 변·복조 기법보다 향상된 결과를 나타내었다. 이는 대역확산 기법인 직접수열 대역확산 기법으로 인접 심벌간의 간섭으로 인한 통신 성능의 저하를 극복했다고 볼 수 있다.

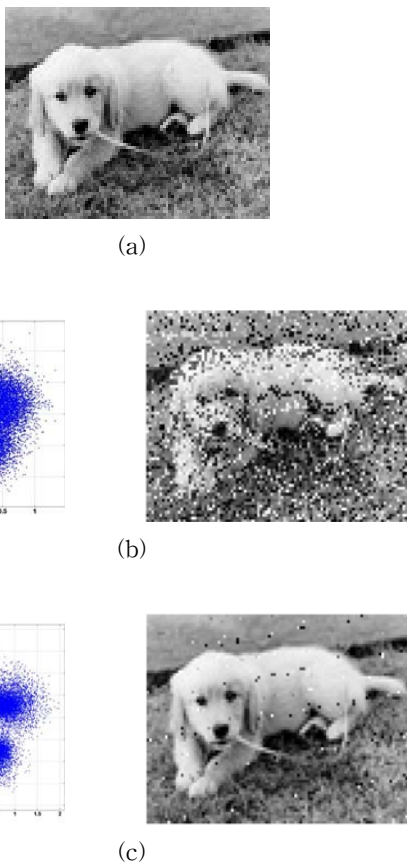


Fig 5. Simulation Result, (a) Source Image, (b) Result of QPSK MODEM, (c) Result of QPSK-DSSS MODEM

#### 4. 해상실험 및 결과

수중 채널에서 QPSK-DSSS의 적용성 및 성능을 검증하기 위하여 부산 앞 바다에서 실험을 수행하였다. 실험 환경은 Fig 6과 같이 수심 5 m, 송·수신기 수심은 각각 2 m, 그리고 송·수신기 사이의 거리는 30 m로 설정하였다. 또한 송·수신기와 방파제 사이의 거리는 15 m로 하였다. 실험을 실시한 날에는 파도가 어느 정도 잔재하였으며, 풍속은 기상청 기준

으로 약 3.4~3.6 m/s 정도였다. 또한 반송 주파수  $f_c$ 는 24 kHz, 샘플링 주파수  $f_s$ 는 192 kHz, 대역확산률은 3배, 데이터 전송속도는 1 kbps로 설정하였다. Fig 7은 실험 과정의 블록 다이어그램을 나타내었는데 신호의 변·복조는 PC를 통해 오프라인으로 수행하였다. 송신부 PC에서 대역확산되어 생성된 송신신호는 DAC(Digital to Analog Converter)와 Power amplifier를 통해 증폭되어 전송되며, 수신부에서는 아날로그 필터와 ADC(Analog to Digital Converter)를 거쳐 PC에 저장된다. 저장된 신호는 기저대역으로 변환 후 역확산 및 복조를 통해 영상 데이터로 변환된다.



Fig 6. Experiment Environment

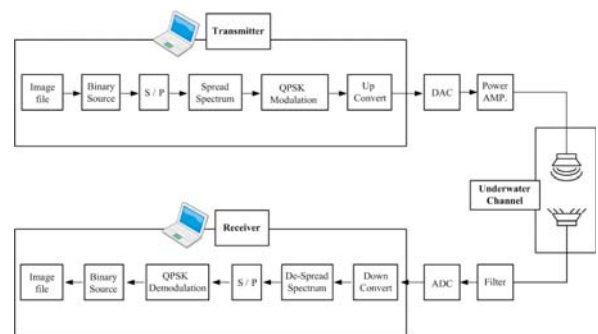


Fig 7. Block diagram of experiment

Fig 8은 각 실험에 대한 결과를 나타낸다. 이때 각각 변조 기법만의 비교를 위해 반송파 오프셋 보상, 시간 오차 추정 및 동기화는 사용하지 않았다. Fig 8의 (a)와 (b)는 1 kbps의 전송률에서 QPSK와 QPSK-DSSS 기법의 정상도와 결과 영상을 비교한 것이다. 해상 실험 결과, 총 56,000 bit의 전송 데이터 비트 중에서 QPSK 변조기법을 사용했을 경우 17,840 bit의 에러 비트가 발생하였으며, BER은  $3.19 \times 10^{-1}$  이었다. QPSK-DSSS 기법의 경우 29 bit의 에러 비트가 발생하였으며, BER은  $5.17 \times 10^{-4}$  이었다. Fig 8의 결과를 보면 기존의 QPSK 변조기법에 비해 QPSK-DSSS 기법의 성능이 월등히 향상된 결과를 나타내는 것을 확인할 수 있다. 이러한 결과가 나온 이유는 QPSK-DSSS 기법의 경우 복조 시 역확산 과정에서 자신의 신호는 역확산을 통해 신호를 복원하지만 한 칩

이상 지연된 신호는 역확산 하지 않는다. 이러한 특성으로 인해 다중경로로 인한 지연신호에 의해 발생하는 인접 심벌간의 간섭이 제거되어 통신성능이 향상된 것으로 볼 수 있다.

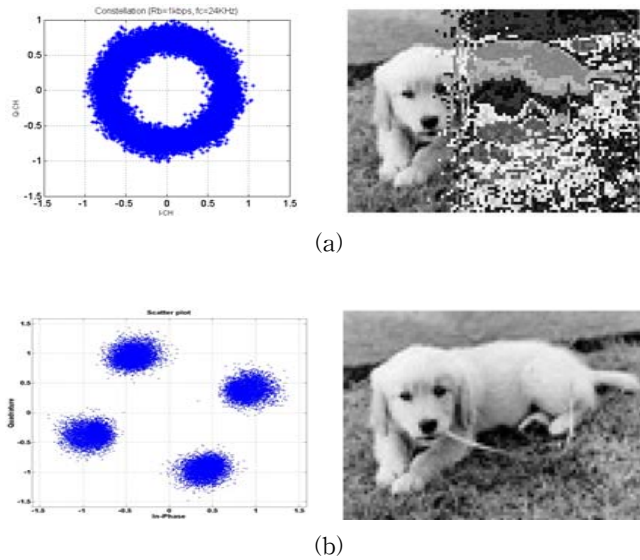


Fig 8. Experiment result, (a) Result of QPSK MODEM, (b) Result of QPSK-DSSS MODEM

### 5. 결 론

수중음향통신에서 다중경로로 인한 인접 심벌간의 간섭으로 인한 문제를 극복하기 위해 현재까지 다양한 연구가 진행되고 있을 만큼 인접 심벌간의 간섭의 극복은 수중통신에 있어서 극복되어야 할 문제이다. 본 논문에서는 수중 채널에서의 통신 실험을 통하여 수중통신의 성능을 저하시키는 오차 유발 요인인 다중경로로 인한 인접 심벌간의 간섭을 극복하기 위해 직접 수열 대역 확산 변·복조 기법을 사용하였다. 모의실험과 해상 실험을 통해 인접 심벌간의 간섭을 극복하는 것을 확인하였으며, 오차가 감소하면서 신뢰성이 증가하는 것을 입증하였다.

향후 연구 내용으로는 주파수 오프셋 보상과 채널 추정 및 등화기의 적용, 그리고 시간 오프셋 보상에 관한 연구가 필요하다. 아울러 통신거리의 증가를 위한 방법도 연구가 되어야 할 것이다.

### 후 기

이 논문은 방위사업청과 국방과학연구소의 지원(계약번호 UD100002KD) 및 지식경제부 및 정보통신산업진흥원의 대학 IT연구센터 지원사업의 연구결과로 (NIPA-2011-C1090-1121-0001)으로 수행되었습니다.

### 참 고 문 헌

- [1] 변무광, 박성준(2009), "수중 센서네트워크를 위한 초음파 통신 모델 설계 및 구현," 한국통신학회논문지 vol.34, no.6.
- [2] Baggeroer(1984). A, "Acoustic telemetry - an overview," IEEE J. Oceanic Eng., vol.9, no.4, pp.229-235.
- [3] Coatelan. S and Glavieux. A(1995), "Design and test of a coding OFDM system on the shallow water acoustic channel," OCEANS'95. MTS/IEEE Challenges of Our Changing Global Environment Conference Proceedings, Vol.3, pp.2065-2070, 9-12.
- [4] Freitag. L, Stojanovic. M, Grund. M and Singh. S(2002), "Acoustic Communications for Regional Undersea Observatories," in Proceedings of Oceanology International.
- [5] Freitag. L, Stojanovic. M, Singh. S and Johnson. M(2001), "Analysis of Channel Effects on Direct-Sequence and Frequency-Hopped Spread Spectrum Acoustic Communication," IEEE J Ocean. Eng., Vol.26, No.4, pp.589-593.
- [6] Kilfoyle. D.B. and Baggeroer. A(2000), "The state of art in underwater acoustic telemetry," IEEE J. Oceanic Eng., vol.25, no.1, pp.4-27.
- [7] Madhoo. U and Honig. M.L(1994), "MSSE Interference Suppression for Direct-Sequence Spread-Spectrum CDMA," IEEE Trans. Comm., Vol.42, No. 12, pp.3178-3188.
- [8] Pateros. C.N. and Saulnier.G.J(1996), "An Adaptive Correlator Receiver for Direct-Sequence Spread-Spectrum Communication," IEEE Trans. Comm, Vol.COM-44, No.11, pp.1543-1552.
- [9] Proakis. J.G. and Salehi. M.(2008), Digital Communications - Fifth Edition, McGraw.Hill.
- [10] Suzuki. M and Sasaki. T(1992), "Digital acoustic image transmission system for deep sea research submersible," IEEE Oceanic Eng. Conf., pp.567-570, Newport.
- [11] Watanabe. Y, Ochi. H and Shimura. T(2005), "Basic Study on Acoustic Communication Using Direct-Sequence Spread Spectrum for Underwater Acoustic Positioning," Japanese J Appl. Phys., Vol.44, No.6B, pp4689-4693

원고접수일 : 2011년 8월 30일  
 심사완료일 : 2011년 10월 13일  
 원고채택일 : 2011년 10월 20일