

동해에서 직접 수열 대역확산 수중음향통신 기법의 해상실험 결과

Sea Trial Results of the Direct Sequence Spread Spectrum Underwater Acoustic Communication in the East Sea

한정우, 김기만, 윤영중*, 문현욱*, 천승용**, 손 권**

(Jeong-Woo Han, Ki-Man Kim, Yeong-Jung Yun*, Hyeon-Uk Mun*,
Seung-Yong Chun**, and Kweon Son**)

한국해양대학교 전파공학과, 연세대학교*, 국방과학연구소**

(접수일자: 2011년 9월 14일; 수정일자: 2012년 1월 3일; 채택일자: 2012년 8월 29일)

초 록: 대역확산 기법은 인접 심벌간의 간섭을 최소화하고, 은밀성(LPI, Low Probability of Intercept)과 다중 접속 기능을 제공할 수 있다. 본 논문에서는 동해에서 직접수열 방식의 대역확산 기법으로 신호를 전송하고, 왜곡된 수신신호를 보상하기 위해 반송파와 시간 동기 복원 및 등화기를 적용한 결과를 나타낸다. 해상실험을 수행한 결과 송수신기 사이의 거리가 3 km이었을 때 일반적인 QPSK(Quadrature Phase Shift Keying) 기법의 경우 1.46×10^{-2} 의 비트 오류율을 보였으며, 대역확산기법이 적용된 경우 5.17×10^{-4} 비트 오류율을 보였다.

핵심용어: QPSK, 수중음향통신, 다중경로, 인접 심벌간 간섭, 직접 수열 대역확산, 은밀성

투고분야: 음향 통신기술 분야(6.3)

ABSTRACT: Spread spectrum provides the minimized inter-symbol interference, the low probability of intercept and the multiple access capability. This paper presents a direct sequence spread spectrum with carrier/timing recovery and equalizer which compensates the delay spread caused by multipath transmission. When the sea trials were performed in Korean East Sea, the bit error rates of QPSK and direct sequence spread spectrum are 1.46×10^{-2} and 5.17×10^{-4} at 3 km source-receiver range, respectively.

Key words: QPSK, Underwater acoustic communication, Multipath, Inter-symbol interference, Direct sequence spread spectrum, Low probability of intercept

ASK subject classification: Acoustic Communications (6.3)

1. 서 론

최근 해양IT 융합기술과 수중 센서 네트워크에 대한 관심 증가와 함께 수중음향통신에 대한 다양한 연구가 진행되고 있다.^[1,2] 수중음향통신 시스템의 성능은 전달 채널의 특성에 의해 크게 좌우되는데 채널 특성을 결정하는 해수면, 해저, 수심 등의 시공간 변화와 수온 분포 등에 좌우되는 다중경로 전달

로 인한 지연 확산, 도플러 확산 및 잡음 등이 고려되어야 한다. 위상 동기식 디지털 변조 기법을 사용하는 경우 이러한 여러 장애 요인들을 극복하기 위하여 반송파 주파수/위상 동기 회복, 시간동기회복 및 등화기 등이 적용된다.^[3] 국내에서도 최근 이와 관련한 해상실험 결과들이 보고되고 있다.^[4,5]

다중경로 전달 특성은 등화기와 함께 대역확산 기법을 이용하여 해결할 수 있으며, 이 경우 은밀한 전송을 요구하는 분야에서 추가적인 장점을 갖게 된다. 대역확산 기술은 초기에 군사적인 목적에 적용되어 왔으며, 현재 이동통신을 비롯한 다양한 분야에서 응용되고 있다. 대역확산 기술을 이용한 통신

*Corresponding author: Ki-Man Kim(kimkim@hhu.ac.kr)
Department of Radio Communication Engineering, Korea Maritime University, 1, Dongsam - dong, Yeongdo - gu, Busan, 606-791, Republic of Korea
(Tel : 82-51-410-4918; Fax : 82-51-404-3986)

방식에는 직접수열(Direct Sequence: DS), 주파수도약(Frequency Hopping: FH), 시간도약(Time Hopping: TH) 등이 있다. 이 가운데 주파수도약방식은FSK(Frequency Shift Keying)와 같은 비동기 위상 전송방식을 사용할 수 있어서 비교적 간단하게 구현할 수 있고, 직접수열 방식은 다중경로 전달에 강인한 특성을 갖는다. Freitag 등은 수중채널에서 직접수열 및 주파수도약 방식의 효과와 채널 추정 기법을 연구하였고, Sozar 등은 유럽의 발트해에서 직접수열 방식으로 확산시킨 데이터를 BPSK(Binary Phase Shift Keying)로 전송한 실험 결과를 제시하였다.^[6-8] 또한 Azou 등은 프랑스 연안에서 송수신기 거리 1 km인 경우 실험결과를 보고하였다.^[9] 이외에 직접수열 방식의 대역확산 통신과 PPC(Passive Phase Conjugation)를 결합한 방법이 제안되거나 AUV(Autonomous Underwater Vehicle) 위치 추적에 적용되기도 하였다.^[10,11] 이와 같이 수중음향통신 분야에서 대역확산 기술을 적용한 연구가 주로 국외 연구자들에 의해 진행되어 왔지만 국내 해양 환경에서 이루어진 연구결과는 부족한 실정이다.

본 논문에서는 동해에서 직접수열 대역 확산 기법을 수중음향통신에 적용한 해상실험을 수행하여 얻어진 결과를 제시하였다. 실험은 직접수열 방식으로 확산시킨 데이터를 QPSK(Quadrature Phase Shift Keying)로 전송하였고, 실험 해역의 채널 특성도 동시에 조사되었다 이를 통해 동해에서 직접수열 대역 확산 기법의 적용성을 고찰하였다. 본 논문의 2장에서는 대역 확산 기술에 대해 설명하고, 3장에서는 해상 실험 결과를 제시하며, 마지막 4장에서는 결론을 서술한다.

II. 대역확산 통신 기법

대역확산 기술은 변조 시 전송하고자 하는 신호가 갖는 대역폭보다 더 넓은 대역폭을 갖도록 신호의 대역폭을 확산하는 방식이다. 대역확산 기술을 이용한 통신 방식에는 직접수열, 주파수도약, 시간도약 및 혼합 방식 등이 있다. 이러한 대역폭 확산은 보통 의사 잡음(Pseudo Noise: PN) 신호를 이용한다. 이 가운데 직접수열 대역확산은 직렬 데이터를 PSK와 같은 병렬신호로 데이터 맵핑 후, 이렇게 맵핑된 신호

에 확산 신호를 적용하여 대역폭을 확산한다. 이 때 확산 신호 안의 기본 펄스를 칩(chip)이라고 하고, 칩의 비트율은 칩율(chip rate)이라고 한다. 이때, 칩의 비트율은 변조된 신호의 비트율 보다 높게 설정되어야 한다.^[12] 본 논문에서는 반송파의 변조기법으로 QPSK 기법을 고려하였다. 그림 1은 QPSK에 직접수열 대역확산 기법을 적용한 시스템(QPSK-DSSS)의 송수신 블록다이어그램이다.

그림 1에서 QPSK로 변조된 신호 $d(t)$ 는 PN 코드 발생기로부터 만들어진 PN 신호 $c(t)$ 와 곱해져 대역확산 된다. 대역확산 된 전송 신호 $x(t)$ 는 아래와 같이 표현할 수 있다.

$$x(t) = Re\{m(t)c(t)\exp(-i2\pi f_c t)\} \quad (1)$$

이때 $d(t)$ 는 전송하고자 하는 이진 메시지 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. 송신부에서 대역확산 후 채널을 통과해 수신부에 수신된 신호는 다음과 같이 표현된다.

$$y(t) = h(t) * x(t) + n(t) = \int_0^t h(\tau)x(t-\tau)\exp(-j2\pi f_c(t-\tau))d\tau + n(t) \quad (2)$$

여기서 $h(t)$ 는 채널 임펄스 함수이며, $n(t)$ 는 부가 백색 가우시안 잡음(Additive White Gaussian Noise: AWGN)이다. 수신부에서는 송신부에서 대역 확산

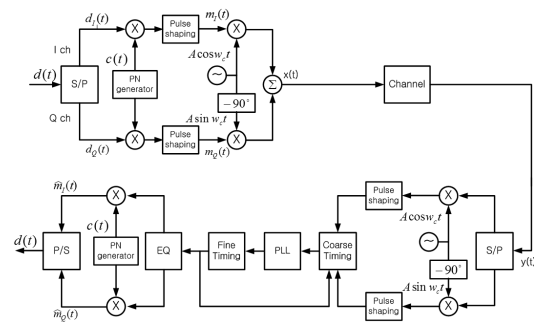


그림 1. QPSK-DSSS 시스템 송수신기 구조
Fig. 1. Transceiver structure of QPSK-DSSS system.

되어 채널을 통해 수신된 신호에 PN 코드를 다시 곱하여 역 확산을 통해 수신신호를 본래의 신호로 전환한다. 동기화가 완벽하다고 가정하면 $c^2(t) = 1$ 이므로 역확산을 하게 되면 원래 신호는 역확산이 되지만 지연 도착된 신호는 역확산되지 않으므로 다중경로 전달로 인한 인접 심벌간의 간섭이 극복된다. 이는 식(3)과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \hat{m}_I(t) &= y_I(t)c(t)\cos(j2\pi f_c t) \\ &= d_I(t-\tau)\cos^2(2\pi f_c t + \theta) + \dots \\ &\quad d_I(t-\tau)c_1(t-\tau)c_2(t-\tau)^* \dots \\ &\quad \cos(2\pi f_c t + \theta)\sin(2\pi f_c t + \theta) \\ &= d_I(t-\tau)\frac{1}{2}[1 + \cos(4\pi f_c t + 2\theta)] + \dots \\ &\quad d_I(t-\tau)c_1(t-\tau)c_2(t-\tau)\frac{1}{2}\sin(4\pi f_c t + 2\theta) \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \hat{m}_Q(t) &= y_Q(t)c(t)\sin(j2\pi f_c t) \\ &= d_Q(t-\tau)\sin^2(2\pi f_c t + \theta) + \dots \\ &\quad d_Q(t-\tau)c_1(t-\tau)c_2(t-\tau)^* \dots \\ &\quad \cos(2\pi f_c t + \theta)\sin(2\pi f_c t + \theta) \\ &= d_Q(t-\tau)\frac{1}{2}[1 - \cos(4\pi f_c t + 2\theta)] + \dots \\ &\quad d_Q(t-\tau)c_1(t-\tau)c_2(t-\tau)\frac{1}{2}\sin(4\pi f_c t + 2\theta) \end{aligned}$$

만일 다중경로로 인해 최소한 한 칩 이상의 시간 지연이 발생하면, 원래 신호의 관점에서 지연신호를 간섭신호로 볼 수 있다. 이때 지연신호와 원래 신호는 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 자기간섭(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 역확산이 이루어진다. 따라서 간접파 신호는 잡음과 같이 SNR을 조금 감소시키는 효과만을 주게 된다.

III. 해상시험 결과

대역확산 기술을 적용한 수중음향통신이 어떠한

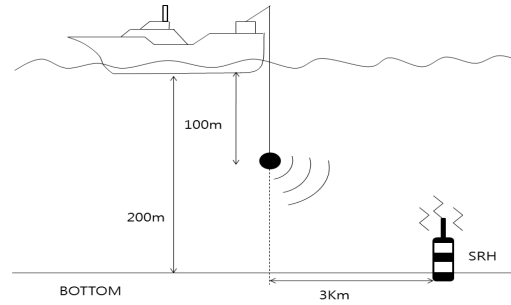
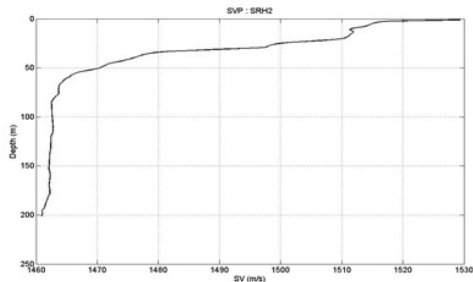


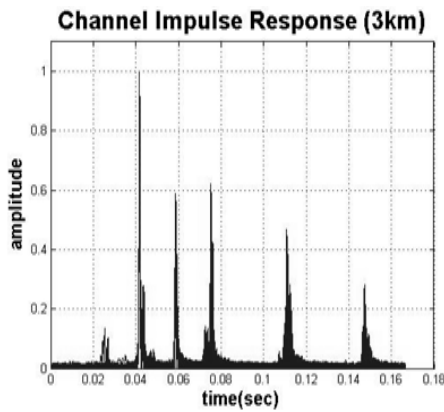
그림 2. 해상 실험 환경
Fig. 2. Sea trial environment.

성능을 갖는지 확인하기 위하여 해상 실험을 수행하였다. 그림 2는 해상 실험 환경을 나타내었다. 반송파와 샘플링 주파수는 각각 6 kHz와 60 kHz로 하였고, 송신기와 수신기 사이의 거리는 3 km로 하였다. 송신기는 수심 약 100 m 지점에 설치하였으며, 수신기는 거의 해저면 가까이인 약 200 m 전후에 설치하였다. 실험은 2011년 6월 동해시 인근 해상에서 수행되었고, 엔진 소음을 최소화하기 위해 배는 표류시켰다. 해상 실험 당시 파도는 비교적 평온한 상태였으며, 평균 수심은 약 200 m였다. 패킷 구조는 프레임 동기화, 시간동기회복 및 등화기의 훈련 모드를 위한 프리앰블로 128 심벌을 사용하였고, 데이터를 위한 Payload로 400 심벌로 구성하였다. BER 성능을 추정하기 위해 신호를 수십 회에 걸쳐 반복 송신하였으며, 원래 메시지 신호 기준으로 전송율은 100 bps 이나 이를 10배 대역 확산하였다. 대역확산으로 인해 대역폭은 약 2 kHz이며, 비교를 위한 QPSK 전송신호 역시 동일한 대역폭으로 하여 실험을 수행하였다.

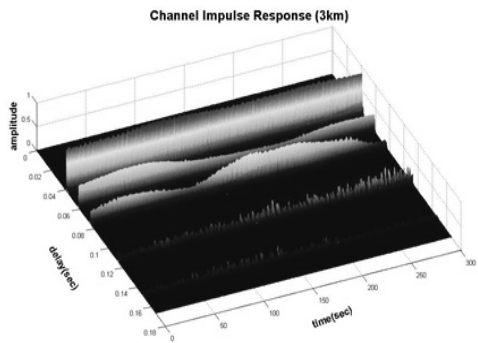
먼저 본격적인 해상 실험에 앞서 실험 해역의 음속구조를 파악하기 위해 30분 주기로 수심에 따른 음속 구조를 파악하였으며, 4 kHz(4-8 kHz) 대역폭을 가지는 LFM 신호를 주기적으로 반복 전송하여 실제 수중채널의 임펄스 응답을 구하였다. 그림 3(a)는 측정된 음속구조로써 이를 살펴보면 해수면으로부터 약 90 m까지는 수온의 변화로 인해 음속이 급격히 변화하는 것을 확인할 수 있으며, 송신기 설치 수심인 100 m 지점과 수신기의 수심인 200 m의 경우 수온의 변화가 거의 없어서 음속이 거의 등속임을 확인할 수 있다. 그림 3(b)와 (c)의 경우 실험 해역의 지연 확산 특성과 이를 5분 동안 시간에 따른 변동을 나타낸



(a)



(b)



(c)

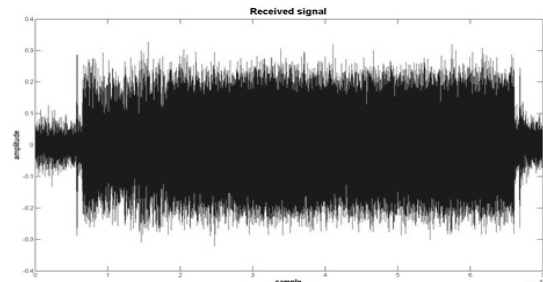
그림 3. 실험 해역 환경 특성

- (a) 음속구조
- (b) 지연확산(2D)
- (c) 지연확산(3D)

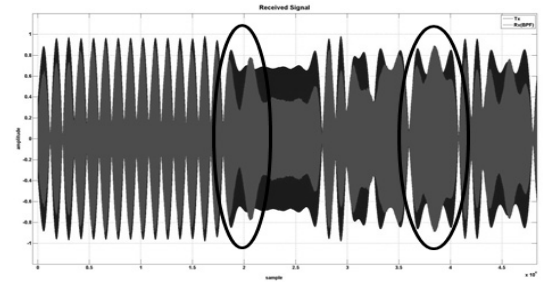
Fig. 3. Channel characteristics of the sea trial area.

- (a) sound velocity profile
- (b) delay spread(2D)
- (c) delay spread(3D).

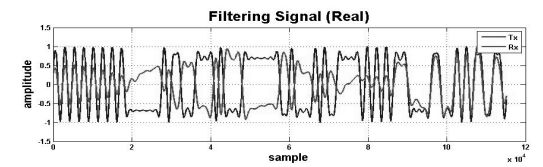
그림이다. 신호 전송 시 송신기의 근처에 소형선박이 지나갔으며, 그림에서 0.025 sec에 수신된 신호의 경우 실험 일지 및 신호를 검토한 결과 소형 선박으로 인해 발생한 신호로 확인 되었다. 최초의 송신 신호가 수신된 0.04 sec 이후 약 20 ms 후 해저면에 반사된 신호가 수신되었으며, 이후 신호가 110ms까지 순



(a)



(b)



(c)

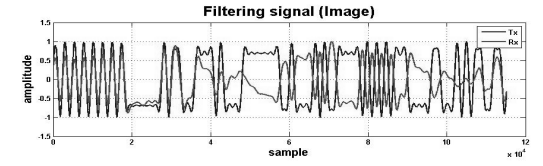


그림 4. 신호 비교

- (a) 수신신호
- (b) 송·수신 신호 비교
- (c) 송·수신 기저대역 신호의 비교

Fig. 4. Compared signal

- (a) Received signal
- (b) 송·수신 신호 비교
- (c) 송·수신 기저대역 신호의 비교

차적으로 수신되는 것을 확인할 수 있다.

수신된 신호는 그림 4(a)와 그림 4(b)에서 보여 지듯이 수중 채널의 다중경로 전달 및 잡음 등의 영향으로 인해 이전 신호의 간섭과 같이 크게 왜곡되는 것을 확인할 수 있었으며, SNR을 추정한 결과 약 20 dB였다.^[13]

이러한 신호의 복원을 위해 프리앰블의 상관성을 이용하여 먼저 프레임 동기화를 수행한 후 반송파 주파수/위상 동기화를 수행하였다. 반송파 동기화

를 위해 decision directed-loop를 사용하였으며, 시간 동기회복을 위해 Gardner 방법을 적용하였다.^[14,15] 마지막으로 등화기에는 심벌 간격으로 데이터가 입력

되는 결정 궤환 등화기를 사용하였으며 순방향 탭은 40개, 역방향 탭은 20개로 하였다. 등화기 내의 계수들은 RLS(Recursive Least Square) 방법을 이용하여 조정하였으며, 초기 채널 추정기는 적용하지 않았다.

그림 5는 각 수신 단계 별로 정상도들을 나타낸 것이다. 그림 5(a)는 수신신호를 아무런 신호처리를 하지 않고 복조한 결과로서 많은 오차가 발생하였으며 BER은 3.83×10^{-1} 이었다. 그림 5(b)는 반송파 동기화만을 적용하여 복조한 결과로서 BER은 1.38×10^{-2} 이었으며, 그림 5(c)는 반송파 동기화로 보상된 신호에 등화기를 이용하여 인접 심벌간의 간섭을 제거한 후 복조한 결과로서 오차율은 5.17×10^{-4} 이었다. 이렇게 대역확산 기법을 적용한 경우 확산 송신 후 역확산하여 복조를 수행하는 과정에서 역확산으로 인해 인접 심벌간의 간섭을 제거하는 효과를 가지고 있다. 그렇기 때문에 일반적인 전송과 비교하였을 때 BER 측면에서 개선된 결과를 보이는데 이는 그림 6에 나타난 일반적인 QPSK 방법으로 수신하여 처리한 결과와 비교해 보면 알 수 있다. 이 그림은 앞의 실험과 모두 같은 조건에서 1 kbps의 전송율로 전송한 경우의 결과이다. DS-SS와 QPSK를 비교한 이유는 동일한 조건에서 단순 변복조 기법을 통한 성능의 향상을 확인하기 위함이며, 수중통신에서 거리에 따른 전송대역폭의 제한이 있으므로 대역폭을 기준으로 각각의 성능을 비교하였다. QPSK로 전송한 경우 그림 6(a)는 반송파 동기화만을 적용하여 복조한 결과로서 BER은 4.43×10^{-1} 이었으며, 그림 6(b)는 반송파 동기화로 보상된 신호에 등화기를 적용한 후의 결과로서 오차율은 1.46×10^{-2} 이었다. 수중채널에서 통신 성능의 유효성을 검증하기 위해 동일한 신호를 일정한 시간을 두고 총 10회를 반복적으로 전송하여 수중음향 통신실험을 수행하였으며, 그 결과는 그림 7과 같다.

QPSK의 경우 총 10회중 8회가 성공하였으며, 이때의 평균 BER은 2.58×10^{-2} 이며, DSSS의 경우 총 10회중 9회가 성공하였으며, 평균 BER은 1.42×10^{-2} 이었다. 그림 7(b)를 보면 7번의 결과에 대해서만 결과 그림이 나타나 있지만 이는 통신을 성공한 9회중 2회는 오차 없이 통신을 하였기 때문에 결과 그림에서 표현의 제한으로 인해 제외되었다. 그림7의 결과

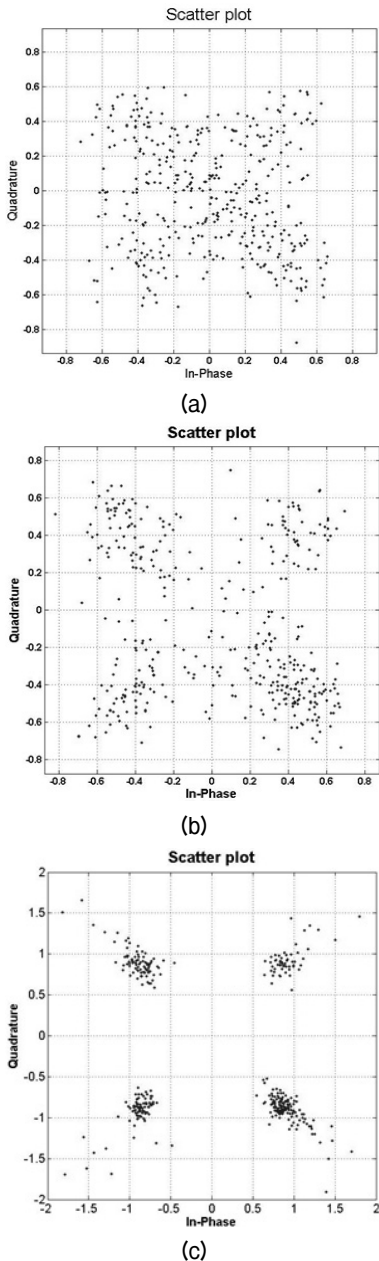


그림 5. 대역확산 기법으로 수신된 신호의 정상도
 (a) 수신신호
 (b) 동기화 적용 후
 (c) 동기화와 등화기 적용 후
 Fig. 5. Constellations of the spread spectrum.
 (a) received signal
 (b) after carrier recovery
 (c) after recovery and equalizer

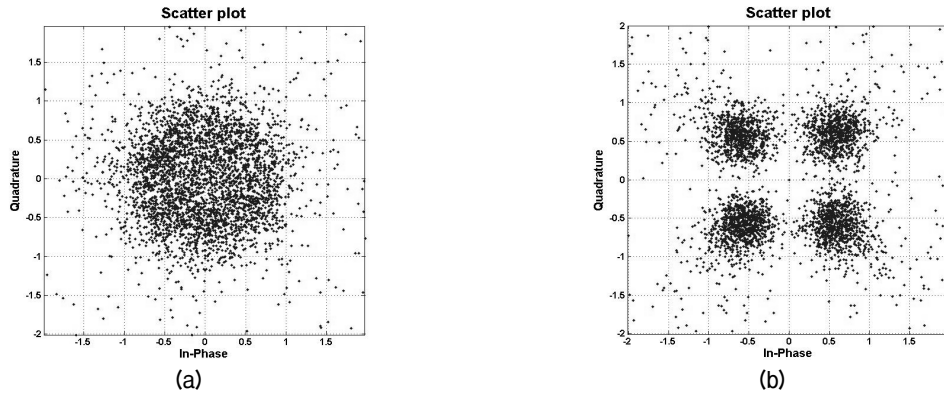


그림 6. QPSK 수신된 신호의 성상도
 (a) 동기화 적용 후
 (b) 동기화와 등화기 적용 후
 Fig. 6. Constellations of the QPSK transmission.
 (a) after carrier recovery
 (b) after recovery and equalizer

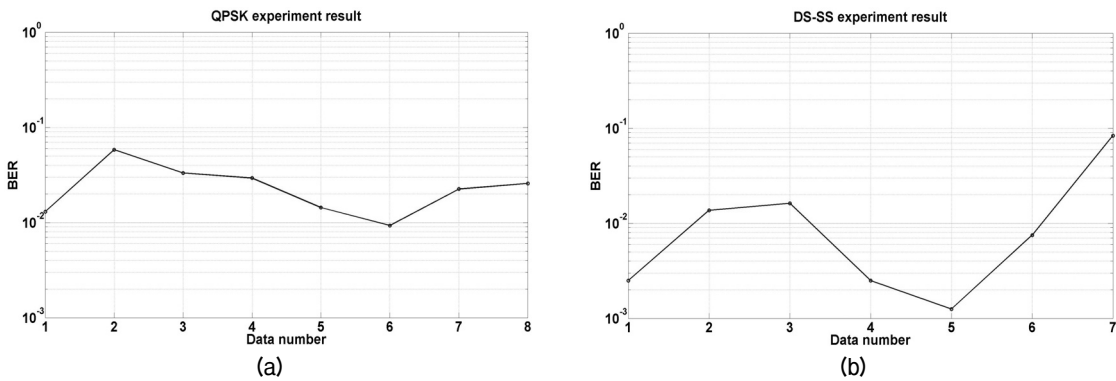


그림 7. 반복실험 결과
 (a) QPSK, (b) DSSS
 Fig. 7. Iterative experiment result.
 (a) QPSK, (b) DSSS

분석을 통해 대역확산 기법을 적용한 경우 확산 송신 후 역확산하여 복조를 수행하는 과정에서 역확산으로 인해 인접 심벌간의 간섭을 제거하는 효과를 가지고 있다는 것을 확인할 수 있지만, 확산하는 과정에서 넓은 대역폭을 필요로 하므로 높은 전송율을 얻기는 어려우며, 이러한 특성으로 인해 수중음향통신에서는 상대적으로 낮은 전송율에서 근거리 보다는 수십 km 이상의 중장거리 은밀 통신에 적합할 것으로 판단된다.

IV. 결 론

본 논문에서는 수중음향통신에서 다중경로 전달

로 인한 인접 심벌간의 간섭 문제를 극복하기 위해 직접 수열 대역확산 기법을 적용하였고, 이의 성능을 평가하기 위해 동해에서 해상 실험을 수행하였다. 실험에 앞선 실험 해역 채널 추정 결과 여러 지연 확산 현상을 확인하였으며, 송수신기 사이 거리 3 km일 때 동기화 및 등화 과정을 거쳐 오차가 거의 발생하지 않은 결과를 얻었다. 이러한 대역확산 기법의 경우 복조 시 역확산 과정에서 자신의 신호는 역확산을 통해 신호를 복원하지만 한 칩 이상 지연된 신호는 역확산 되지 않는다는 특성으로 인해 다중경로 전달로 인한 지연신호에 의해 발생하는 인접심벌간의 간섭이 제거되어 통신성능이 향상된 것으로 볼

수 있다. 하지만 확산하는 과정에서 넓은 대역폭을 필요로 하므로 높은 전송율을 얻기는 어려우므로 상대적으로 낮은 전송율에서 수십 km 이상의 중장거리 은밀 통신에 적합할 것으로 판단된다.

향후 연구 내용으로는 채널 추정을 포함한 등화기의 적용, 운용 환경을 고려하여 전력 소모 효율성을 향상시키고, 채널 부호화를 사용하여 신뢰도를 높이기 위한 연구가 필요하다. 아울러 해상 실험을 통한 통신 거리의 증가 방법도 연구되어야 할 것이다.

감사의 글

본 논문은 방위사업청과 국방과학연구소의 지원(계약번호 UD10002KD) 및 국제공동연구(UD11010IDD)로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Daniel B. Kilfoyle and Arthur B. Baggeroer, "The state of art in underwater acoustic telemetry," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 25, no. 1, pp. 4-27, 2000.
2. 전준호, 조현철, 김창화, 류영선, 박성준, "수중 음향 통신을 위한 초소형 모뎀 설계 및 구현," *한국통신학회논문지*, 36권, 4B호, pp. 405-411, 2011.
3. 조진수, 정승백, 심태보, "PSK 변조방식이 수중통신에 미치는 영향에 관한 연구," *한국음향학회지*, 26권, 7호, pp. 366-374, 2007.
4. 김세영, 한정우, 김기만, "수중 센서네트워크 구현을 위한 단일 반송파 디지털 변조기법의 실험적 고찰," *한국해양정보통신학회논문지*, 15권, 1호, pp. 33-40, 2011.
5. 김현수, 최동현, 서종필, 정재학, 김성일, "동해 연근해에서 위상 추정기를 갖는 적응형 등화기의 실험적 성능 검증," *한국음향학회지*, 29권, 4호, pp. 229-236,

- 2010.
6. L. Freitag, M. Stojanovic, S. Singh, and M. Johnson, "Analysis of channel effects on direct-sequence and frequency-hopped spread spectrum acoustic communication," *IEEE Journal of Oceanic Eng.*, vol. 26, no. 4, pp. 586-593, 2001.
7. M. Stojanovic and L. Freitag, "Acquisition of direct sequence spread spectrum acoustic communication signals," *MTS/IEEE Conf. Oceanic Eng.*, pp. 279-286, Sept. 2003.
8. E. M. Sozar, J. G. Proakis, M. Stojanovic, J. A. Rice, A. Benson, and M. Hatch, "Direct sequence spread spectrum based modem for under water acoustic communication and channel measurements," *MTS/IEEE Conf. Oceanic Eng.*, pp. 228-233, Oct. 1999.
9. S. Azou, G. Burel, L. L. Duff and C. Pistre, "Sea trial results of a chaotic direct sequence spread spectrum underwater communication system," *MTS/IEEE Conf. Oceanic Eng.*, pp. 1539-1546, Sept. 2003.
10. P. Hursky, M. B. Porter, M. Siderius, and V. K. McDonald, "Point-to-point underwater acoustic communications using spread-spectrum passive phase conjugation," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 120, no.1, pp. 247-257, 2006.
11. Y. Watanabe, H. Ochi and T. Shimura, "An experiment of underwater acoustic positioning with data transmission using DSSS," *MTS/IEEE Techno-Ocean Conf.*, pp. 1-6, Apr. 2008.
12. Proakis, J. G. and Salehi, M. (2008), *Digital Communications - Fifth Edition*, McGraw. Hill.
13. A. Wiesel, J. Goldberg and H. Messer-Yaron, "SNR estimation in time-varying fading channels," *IEEE Trans. Communication*, vol. 54, no. 5, pp. 841-848, 2006.
14. R. de Gaudenzi and M. Luise, "Decision-directed coherent delay-lock tracking loop for DS-spread-spectrum signals," *IEEE Trans. Communication*, vol. 39, no. 5, pp. 758-765, 1991.
15. F. M. Gardner, "A BPSK/QPSK Timing-Error Detector for Sampled Receivers," *IEEE Trans. Communication*, vol. 34, pp. 423-429, 1986.

저자 약력

▶ 한 정 우(Jeong-Woo Han)



2007년 2월 : 한국해양대학교 전파공학과 (공학사)
 2009년 2월 : 한국해양대학교 전파공학과 (공학석사)
 2009년 3월 ~ 현재 : 한국해양대학교 전파공학과 박사과정
 <관심분야> 수중통신, DSP, 마이크로프로세서

▶ 문 현 욱(Hyeon-Uk Mun)



2005년 2월: 연세대학교 기계전자 공학부(공학사)
 2007년 2월: 연세대학교 전기전자 공학과(공학석사)
 2007년 3월~현재: 연세대학교 전기전자공학과 박사과정
 <관심분야> 전파 전파, 무선채널

▶ 김 기 만(Ki-Man Kim)



1988년 2월: 연세대학교 전자공학과(공학사)
 1990년 8월: 연세대학교 전자공학과(공학석사)
 1995년 2월: 연세대학교 전자공학과(공학박사)
 1995년 3월 ~ 1996년 8월: 연세대학교 의과대학 의용공학교실(Fellow)
 1996년 9월 ~ 현재 : 한국해양대학교 전파공학과 교수
 <관심분야> 수중통신, 소나 신호처리, 3차원 음향제어, 채널추정, DSP

▶ 천 승 용(Seong-Hyun Lee)

1988년 2월: 경북대학교 전자공학과(공학사)
 1990년 2월: 경북대학교 전자공학과(공학석사)
 1990년 3월 ~ 현재: 국방과학연구소 책임연구원
 <관심분야> 디지털 신호처리, 수중통신, 소나처리

▶ 손 권(Seong-Hyun Lee)

1988년 2월: 경북대학교 전자공학과(공학사)
 1991년 2월: 경북대학교 전자공학과(공학석사)
 1991년 2월 ~ 현재: 국방과학연구소 책임연구원
 <관심분야> 수중음향측정, 수중음향신호처리, 수중 추적

▶ 윤 영 중(Yeong-Jung Yun)



1981년 2월: 연세대학교 전기전자 공학과(공학사)
 1986년 12월: 연세대학교 전기전자 공학과(공학석사)
 1991년 2월: Georgia Institute of Technology (공학 박사)
 1992년 ~ 1993년: 한국전자통신연구원 위성통신기술 연구단
 2011년 ~ 2011년: 한국전자파학회 학회장
 1992년 ~ 현재: 연세대학교 전기전자공학과 교수
 <관심분야> 마이크로파 소자, 안테나, 전파전파, EMI/EMC