JKIICE Journal of the Korea Institute of Information and Communication Engineering

한국정보통신학회논문지(J. Korea Inst. Inf. Commun. Eng.) Vol. 20, No. 8 : 1422~1430 Aug. 2016

터보등화를 이용한 직접대역확산통신 기반의 은밀 수중통신 성능분석

안태석[1] · 정지원[1*] · 박태두[2] · 이동원[2]

Turbo Equalization for Covert communication in Underwater Channel

Tae-Seok Ahn[1] · Ji-Won Jung[1*] · Tae-Doo Park[2] · Dong-Won Lee[2]

[1*]Department of Radio Communication Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea
[2]Hanwha Corporation Gumi Plant (Development Team3), Gumi 39370, Korea

요 약

전송되는 정보들의 가로채기 확률을 감소시키기 위한 피감청 기술 중 대표적인 대역확산통신 기법을 적용함으로써 통신 성능에 미치는 영향을 분석하고, 이를 통해 최적의 은밀 수중음향통신 시스템의 모델을 제안한다. 대역확산통신 된 신호의 레벨이 낮아져 주변의 배경소음과 같은 레벨로 전송하기 때문에 피탐지 확률이 감소하고 은밀성의 특징을 갖게 된다. 본 논문에서는 BCJR(Bahl, Cocke, Jelinek, Raviv) 복호방법과 대역 확산 기법 중 직접 수열 대역확산 기법을 적용하였으며, 은밀 수중 통신에서 고려되는 송수신 모델은 크게 두 가지로 나뉘는데, 경판정 기반의 송수신 모델과 반복기반의 터보 등화 모델의 성능을 시뮬레이션과 호수 실험을 통해 성능을 비교 분석하였다.

ABSTRACT

Researches for oceans are limited to military purpose such as underwater sound detection and tracking system. Underwater acoustic communications with low-probability-of-interception (LPI) covert characteristics were received much attention recently. Covert communications are conducted at a low received signal-to-noise ratio to prevent interception or detection by an eavesdropper. This paper proposed optimal covert communication model based on direct sequence spread spectrum for underwater environments. Spread spectrum signals may be used for data transmission on underwater acoustic channels to achieve reliable transmission by suppressing the detrimental effect of interference and self-interference due to jamming and multipath propagation. The characteristics of the underwater acoustic channel present special problems in the design of covert communication systems. To improve performance and probability of interception, we applied BCJR(Bahl, Cocke, Jelinek, Raviv) decoding method and the direct sequence spread spectrum technology in low SNR. Also, we compared the performance between conventional model and proposed model based on turbo equalization by simulation and lake experiment.

키워드 : 피감청, 대역확산, BCJR(Bahl,Cocke,Jelinek,Raviv) 복호, 터보 등화기법

Key word : Low probability of interception, Spread spectrum, BCJR(Bahl, Cocke, Jelinek, Raviv), Turbo equalization

Received 30 March 2016, **Revised** 04 April 2016, **Accepted** 03 May 2016

* **Corresponding Author** Ji-Won Jung(E-mail:jwjung@kmou.ac.kr Tel:+82-51-410-4424)
Department of Radio Communication Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

Open Access http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2016.20.8.1422 print ISSN: 2234-4772 online ISSN: 2288-4165

ⓒThis is an Open Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(http://creativecommons.org/li-censes/by-nc/3.0/) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium, provided the original work is properly cited.
Copyright Ⓒ The Korea Institute of Information and Communication Engineering.

Ⅰ. 서 론

과거 해양에 관한 연구는 군사적인 목적에 국한되어 주로 수중음원 탐지 및 추적에 관한 연구가 이루어졌다. 하지만 최근 해양 자원 개발이 활발해지면서 해양에 대한 관심이 고조되고, 다양한 분야에서의 연구가 진행되고 있다. 특히 해양에서의 수중음향통신은 해양 연구의 필수적인 기술로써 응용분야가 확대되고 있는 추세이다. 최근에는 개인의 보안 또는 군사적 목적으로 피감청(low probability of interception, LPI)[1-3] 특성을 가진 수중음향통신에 대하여 활발히 연구가 진행 중이다. 은밀 수중음향통신 시스템은 송신 신호가 의도된 수신기 외에는 다른 수신기에 의해 감청되지 않기 위해 설계된 통신 시스템으로 은밀성을 유지하기 위해 수신기 주변 위치에서의 송신음향 준위를 주변 배경소음 이하로 낮추어 피탐지 확률을 감소시키고, 외부로부터의 간섭을 최소화하는데 목적이 있다. 은밀 통신 시스템의 특징은 낮은 SNR(signal-to-noise ratio) 영역에서 동작이 되어야 하는데 대표적인 통신 방식으로 대역확산 통신기법이 있다[4,5].

기존 대부분이 연구는 시변동성을 갖는 수중 채널에서 전송율 향상이나 송수신 거리 증대 관점에서만 이루어졌으며, 실제 은밀성이 강조되는 환경에서의 전송 성능에 대한 언급은 거의 없는 실정이다. 따라서 실제 은밀 수중음향통신 시스템을 설계하고자 하는 경우 이에 적합한 시스템 설계와 전송 성능이 어떻게 나타나는지에 대한 정보가 필수적이다. 즉, 전송되는 정보들의 가로채기 확률을 감소시키기 위한 LPI 기술을 적용함으로써 통신 성능에 미치는 영향을 분석하고, 이를 통해 최적의 LPI 은밀 수중음향통신 시스템의 설계가 필요하다. 또는 낮은 SNR에서 성능이 열화되며, 즉 피탐지 확률이 낮을수록 성능은 열화되기 마련인데 본 논문에서는 낮은 SNR에서도 성능의 열화를 감소시키기 위해 대역확산 통신 기반의 터보 등화기법[6,7]을 이용한 송수신 구조를 제안하고자 한다. 터보 등화 기법은 복호기에 연판정 값을 입력이 되고 복호기를 반복하여 반복 횟수가 늘어남에 따라 업데이트하는 오류 보정 값이 송신하고자 하는 원 신호에 가깝게 되어 성능이 향상되게 된다.

따라서 본 논문에서는 수중채널을 고려한 낮은 SNR을 갖는 환경에서 은밀 통신 기법 중 대표적인 기법인 대역확산통신기법을 이용한 최적의 은밀 수중음향통신 시스템 구조를 제안하고 제안한 은밀 수중음향통신 시스템 구조를 이용하여 실제 호수 실험을 통하여 성능을 분석하였다.

Ⅱ. 은밀 수중 음향 통신 송수신 구조

2.1. 대역확산기법

은밀 수중 통신을 위한 대표적인 통신 방식으로는 대역확산 통신 기법이 있다. 대역확산 통신 기법에는 직접 수열 대역 확산(Direct Sequence Spread Spectrum, DSSS), 주파수 도약 대역 확산(Frequency-Hopping Spread Spectrum, FHSS) 등이 대표적인 방식이라 할 수 있다. 본 논문에서는 다양한 대역확산 통신 기법 중 직접 수열 대역 확산 통신 기법을 적용하였다.

직접 수열 대역 확산 방식은 보내고자 하는 송신 신호에 직접 PN sequence를 곱해 줌으로써 은밀성이 보장되는 것으로 널리 연구되는 방식이다. 송신 데이터에 대역 확산을 위하여 PN sequence를 곱해주며 대역 확산된 신호는 주파수 영역에서 관찰을 하게 되면 기존의 데이터보다 넓은 대역폭을 가진 것을 관찰할 수 있다. 대역 확산 된 신호의 레벨이 매우 낮아져 주변의 배경소음과 같은 레벨로 전송하기 때문에 피탐지 확률이 감소하게 은밀성의 특징을 갖게 된다. 수신측에서는 전송에 사용된 PN sequence와 같은 PN sequence를 다시 곱하여 원래의 신호로 복조 시킬 수 있다. 따라서 송신기에서 대역 확산으로 사용된 PN sequence를 이용하여 확산 시키면 수신기에서는 동일한 PN sequence를 곱하여 역 확산된 파형으로 신호를 복원 할 수 있다.

2.2. 기존의 경판정 기반의 송수신 모델

직접 수열 대역 확산 기법을 이용한 은밀 수중 통신에서 고려되는 송수신 모델은 크게 두 가지로 나뉠 수 있다. 그중 첫 번째로 기존의 방식인 경판정 기반의 송수신 모델이 있다. 그림 1은 기존의 방식인 경판정 기반의 송수신 모델을 나타내는 블록도이다. 다중 경로 환경에서 원활한 통신과 함께 수신 신호의 성능을 향상시키기 위하여 낮은 SNR에서 우수한 성능을 보이는 부호화 기법인 BCJR(Bahl,Cocke,Jelinek,Raviv)기반[8] 컨볼루션 부호를 사용하였다.

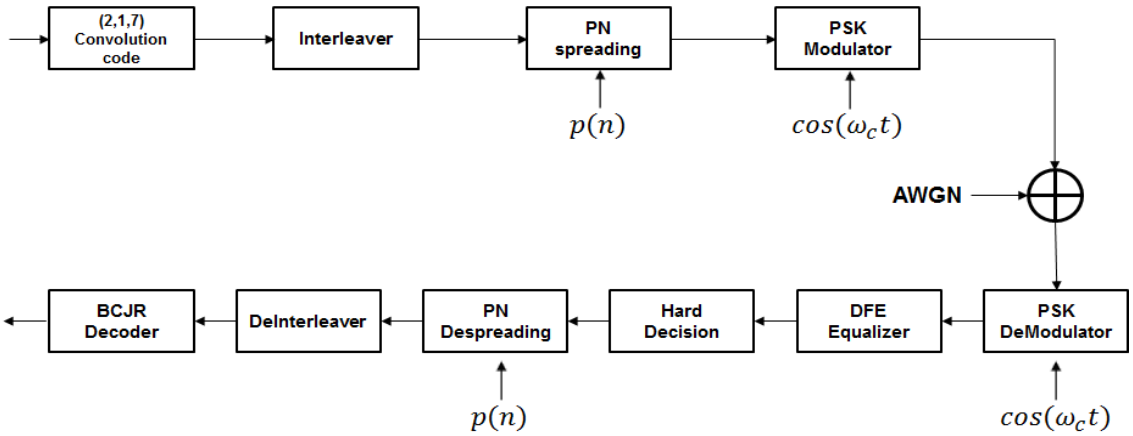

Fig. 1 Transceiver based on hard decision

송신부에서 (2,1,7) 컨볼루션 부호화기를 통과한 신호는 군집 오류(burst error)를 산발 오류(random error)로 바꾸기 위한 인터리버를 거친다. 인터리버 후, 대역확산을 시키기 위하여 부호화 된 데이터에 PN sequence를 곱하는 PN spreading 과정을 거친다. 대역확산 된 신호는 신호 매핑을 통한 변조를 하여 전송하게 된다. 수신부에서는 수신된 신호를 복조 후 등화기를 통해 다중경로 효과를 제거하고 PN de-spreading 과정을 수행하기 위해 등화기의 출력 값을 경판정을 하게 된다. 그리고 PN 성분을 제거하기 위하여 송신부에서 사용한 PN sequence를 다시 곱하여 PN de-spreading 과정을 거친다. PN 성분이 제거 된 신호는 디인터리버를 거친 후 BCJR 복호기에 입력된다. 이러한 기존의 경판정 기반의 송수신 모델은 수신부에서 PN de-spreading을 하는 과정에서 등화기의 출력 값이 연판정 값이 아니라 경판정 값이어야 한다는 것이 성능을 저하시키는 단점이다. 경판정 값으로 인하여 반복구조를 사용하여도 성능이 향상되지 않는다. 그리고 (n, k) 복호기의 성능은 경판정 값이 입력되는 것에 비해 연판정 값이 입력되어야 우수한 성능을 가져올 수 있다. 따라서 PN de-spreading 과정의 위치를 바꾸어 연판정 값을 복호기에 입력되도록 하여 성능 저하를 초래하지 않도록 한다. 또한 수신된 신호는 수중통신이라는 관점에서 볼 때 해저면 등의 음파 산란 및 송수신부의 이동에 따라 주파수와 위상이 변하는데 이러한 도플러 및 위상의 추정이 행해져야 한다.

2.3. 제안하는 반복기반의 터보 등화 모델

은밀 수중 통신에서 고려되는 두 번째 방식으로 제안하는 반복기반의 터보 등화 모델이 있다. 반복기반 터보 등화 모델은 경판정 기반의 송수신 모델과 달리 PN de-spreading 과정을 따로 행하지 않고 복조과정에서 송신부에서 사용한 PN sequence를 함께 곱해줌으로써 복조과정과 PN de-spreading과정을 동시에 한다. 그리고 복호기에 연판정 값을 입력 할 수 있게 되고 복호기를 반복함으로써 성능을 향상 시킨다. 수신신호를 r_n이라 하였을 때 식 (1)로 나타낼 수 있다.

$$r_n = d(n)p(n)\cos(w_c t) + w(n). \tag{1}$$

여기서 $d(n)$은 채널 부호화를 거친 데이터, $p(n)$은 PN sequence, $w(n)$은 가우시안 잡음을 나타낸다. 복조와 PN-despreading 후, LPF 출력 값을 식(2)와 같은 과정으로 나타 낼 수 있다.

$$\begin{aligned} x(n) &= r(n) \times p(n)\cos(w_c t) \\ &= r(n)p^2(n)\cos^2(w_c t) + w(n)p(n)\cos(w_c t) \\ &= d(n) + \tilde{w}(n) \end{aligned} \tag{2}$$

$\tilde{w}(n)$ 또한 복조 후 가우시안 잡음을 나타낸다. $p(n)$은 '-1','1'로 되어 있으므로 제곱이 되어 제거되어진다. PN de-spreading의 위치를 바꾸어도 기존의 경판정 기

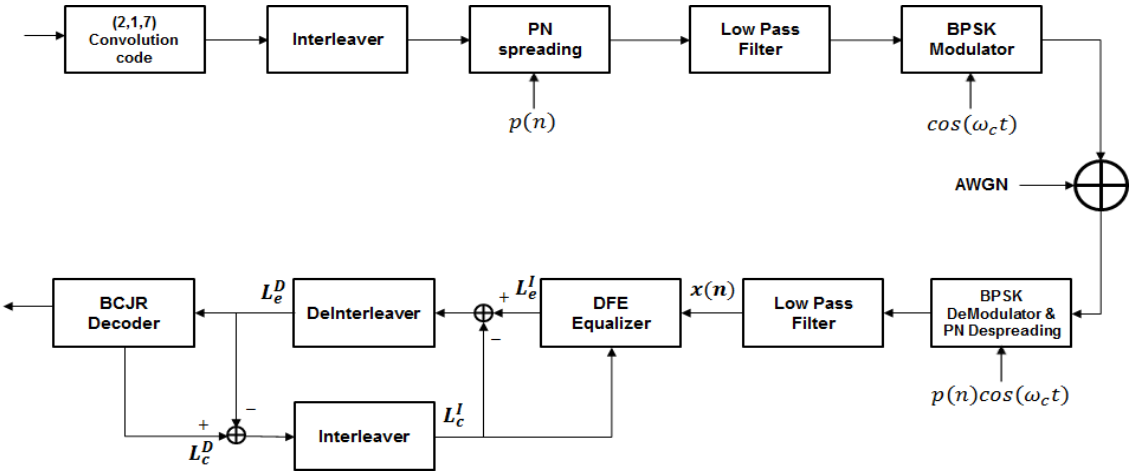

Fig. 2 Transceiver based on turbo equalization

반의 송수신 모델과 같은 결과를 가져 올 수 있지만 연판정 값을 이용할 수 있으므로 반복을 통하여 성능이 향상 된다.

그림 2는 기존의 경판정 기반의 송수신 모델에서 PN de-spreading의 위치와 도플러 추정을 고려하여 반복기반 터보 등화 모델의 송수신부를 제안하는 블록도이다. Source 데이터는 채널 부호화기를 거치고 난 뒤 인터리버 과정을 거친다. 그리고 PN sequence를 곱한 대역확산 된 신호는 심벌 매핑 후 변조되어 수중채널로 전송된다. 다중경로 채널에 의해 왜곡되어진 수신 심벌은 복조과정에서 PN 성분을 제거하기 위해 송신부에서 사용한 PN sequence를 $\cos(w_c t)$와 함께 곱해준다. 기존의 경판정 기반의 모델과 달리 복조과정과 PN de-spreading 과정을 함께 함으로써 연판정 값을 이용할 수 있도록 한다. training 데이터와 도플러 보상 알고리즘을 이용하여 도플러 오프셋 값을 구하여 주파수를 보상한다. 그리고 도플러 추정 과정을 거친 수신 신호는 터보 등화기로 입력된다. 터보 등화기는 등화기와 BCJR 복호기로 구성되어 있다. BCJR 복호기에서는 BM(Branch Matrix), FSM(Forward State Matrix), BSM(Backward State Matrix)를 구하기 위하여 입력 값에 따른 출력 값과 함께 변화하는 상태를 나타내는 격자도를 이용하여 복호한다. BCJR 복호기를 통하여 수신 비트 스트림 크기만큼의 LLR 값이 출력된다. BCJR의 복호 방식[8]은 터보 부화의 복호 방식과 동일하며, 각 상태에서 '0'의 확률과 '1'의 확률을 계산하여 FSM, BSM을 계산하여 최종적으로 $LLR = \log\frac{p(x=+1)}{p(x=-1)}$ 값을 계산한다. 등화기와 BCJR 복호기는 인터리버와 디인터리버를 통해 연결되어 서로의 정보를 반복해서 갱신한다. 인터리버는 송신 측에서 한 개 블록 크기의 부호기 출력 값을 재배치시키고, 디인터리버는 인터리버의 역 과정을 거쳐 송신신호를 복원한다. BCJR 복호기에서 출력한 피드백 정보는 다시 인터리빙 과정을 거쳐 정정된 신호를 등화기에 재입력된다. 송신된 신호는 수중채널을 거치고 백색 가우시안 잡음이 더해져 수신된다. 기저대역으로 변환한 후 L_e^I는 결정 궤환 등화기의 출력 값으로 수신 신호로부터 등화기에서 추정되어진 부가정보(extrinsic) 값이다. 수신신호 $y[k]$를 k시점에서의 등화기 입력 값이라 하면, 등화기의 출력은 식 (3)과 같이 정의 할 수 있다.

$$L_e^I[k] = \sum_{i=0}^{N_b-1} c_i[k]y[k-i] - \sum_{j=1}^{N_a} b_j[k]\widehat{L_e^I}[k-j]. \qquad (3)$$

$c_i[k]$, $b_j[k]$는 k시점에서의 포워드 및 백워드 탭 계수이며, $\widehat{L_e^I}[k]$는 성상도 상에서 $L_e^I[k]$에 가장 가까운 점들인 slicer 출력 값이다[9]. 결정 궤환 등화기의 출력으로부터 추정된 $L_e^I[k]$와 slicer 출력 값이 $\widehat{L_e^I}[k]$의 오차를 이용하여 피드백을 통하여 결정 궤환 등화기의 출력 오차를 줄이는 계수 값인 $c_i[k+1]$, $b_j[k+1]$을 갱신하기

위하여 사용된다. 부가정보(extrinsic)값 L_c^D는 복호기의 출력 값으로써 사후 확률 값을 계산하여 0 또는 1의 오류 값을 보정 할 수 있는 값이다. 이러한 L_c^D와 L_e^D의 차이 값을 인터리빙한 L_c^I가 결정 궤환 등화기에 입력된다. L_c^I를 업데이트 하여 오류 값을 보정하는 방법을 취하게 되는데, 반복횟수가 늘어남에 따라 업데이트하는 오류 보정 값이 송신하고자 하는 원 신호에 가깝게 되어 BER(Bit Error Ratio) 성능이 향상된다.

Ⅲ. 시뮬레이션 및 호수 실험 결과

3.1. 시뮬레이션 결과

낮은 SNR 환경에서도 동작이 되는 대역확산의 특징을 알아보기 위하여 대역확산 유무에 따른 다양한 SNR 환경에서의 BER성능 분석에 대한 모의실험과 경판정 기반의 송수신 모델과 반복기반의 터보 등화 모델의 성능 차이를 알아보기 위한 모의실험을 수행하였다. 모의실험은 Microsoft visual c++의 프로그램과 표 1를 이용하여 두 가지 시뮬레이션을 하였다. 호수 실험과 동일한 환경을 제공하기 위해 모의실험에서 데이터 비트수를 1000 bit로 하고 대역확산을 위한 PN sequence 비트수를 16 bit로 하였고 (2,1,7) 컨볼루션 부호화기를 사용하였고, 변조방식으로는 BPSK를 사용하였으며 복호기는 BCJR을 사용하였다. 중심 주파수는 16 kHz, 샘플링 주파수는 192 kHz로 하였고, 데이터 속도는 187.5 bps로 하였다.

Table. 1 Parameters of simulation

Data	1000 bit
PN code	16 bit
Channel coding	(2,1,7) convolution
Modulation	BPSK
Decoding	BCJR
Bit rate	187.5 bps
Center frequency	16 kHz
Sampling frequency	192 kHz

표 2는 EbNo값을 3dB 간격으로 직접 수열 대역 확산 유무에 따른 BER을 나타내었다. EbNo가 높을수록 잡음에 대한 비트의 에너지 높아짐으로써 높은 SNR 환경을 가질 수 있다. 대역확산 통신 기법을 적용하지 않았을 경우, EbNo 값이 18 dB 일 때 모든 데이터를 복호하였다. 반면에 대역확산 통신 기법을 적용 하였을 경우, 6 dB에서 모든 데이터를 복호하였다. 시뮬레이션 결과 대역확산 통신 기법을 적용 하였을 경우가 더 낮은 EbNo에서, 즉 낮은 SNR 환경에서 작동이 되는 특징을 알 수 있었다.

Table. 2 Comparison of BER

EbNo	Non DSSS	DSSS
0 dB	4.88×10^{-1}	3.37×10^{-1}
3 dB	4.97×10^{-1}	0.44×10^{-1}
6 dB	5.26×10^{-1}	0
9 dB	4.63×10^{-1}	0
12 dB	2.17×10^{-1}	0
15 dB	0.18×10^{-1}	0
18 dB	0	0

그림 3은 경판정 기반의 송수신 모델과 반복기반의 터보 등화 모델의 성능 비교를 위한 모의실험 결과를 나타낸 그림이다. 기존의 경판정 기반의 송수신 모델은 EbNo값이 4.5 dB일 때 모든 데이터를 복호하였다. 반복기반 터보 등화 모델은 반복횟수를 5회로 하였을 경우 2.5 dB에서 모든 데이터를 복호하였다. 시뮬레이션 결과 제안하는 반복기반 터보 등화 모델이 기존의 경판정 기반의 송수신 모델보다 반복 5회시 2 dB의 성능 향상을 가져옴을 알 수 있다.

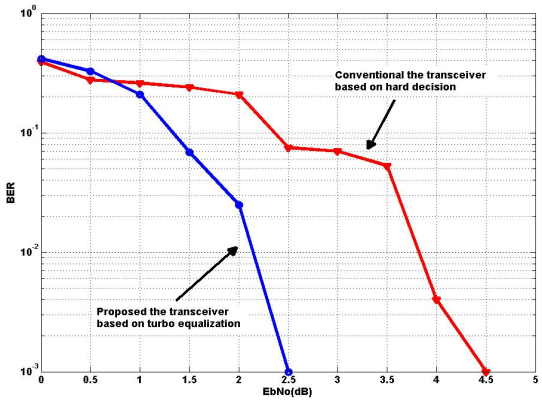

Fig. 3 Results of simulation

3.2. 호수 실험 환경

그림 4와 같은 환경에서 실제 호수 실험을 2015년 6월 17일 경북 문경시 경천호에서 수행하였다. 실험에서 사용된 송신기는 Neptune D/17/BB를 사용하였고, 수신기는 B&K 8106을 사용하였다. 송신기와 수신기 사이의 거리는 213 m로 하였고 송신기는 수면 아래 5 m, 수신기는 15 m 아래 위치하였다. 반송파 주파수와 샘플링 주파수는 각각 16 kHz 및 192 kHz로 하였으며 데이터 속도는 187.5 bps로 하였다.

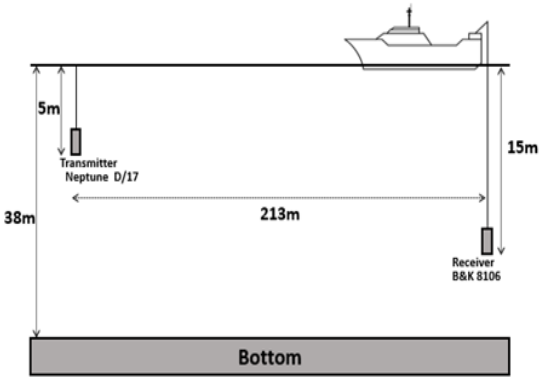

Fig. 4 Environment of experimentation

본 논문에서는 표 3와 같은 파라메타를 이용하여 실제 호수 실험을 하였다. 채널 코딩 방식으로는 (2,1,7) 컨볼루션 부호화 방식을 적용하였으며, 변조방식은 BPSK 변조방식을 적용하였다. PN sequence의 길이는 16 bit로 하였다.

Table. 3 Parameters of experimentation

Data	506 bit text
PN code	16 bit
Channel coding	(2,1,7) convolution
Modulation	BPSK
Decoding	BCJR
Bit rate	187.5 bps
Center frequency	16 kHz
Sampling frequency	192 kHz
Distance	213 m
Water depth	38 m
Depth	Tx : 5 m, Rx : 15 m

그림 5와 같은 패킷 구조를 이용하여 호수 실험을 진행하였다. 패킷 구조는 신호의 전송 시작을 알기 위한 0.02초의 LFMB(Linear Frequency Modulation Begin) 신호를 보내고, 0.1초 동안 사일런스 구간을 둔 뒤, 정확한 타이밍을 잡고 주파수 보상을 위해 256 bit의 training 데이터, 100 bit의 사일런스 구간, 1012 bit의 데이터, 마지막으로 신호의 끝을 나타내는 0.02초의 LFME(Linear Frequency Modulation End) 신호가 한 패킷을 이루도록 구성하였다.

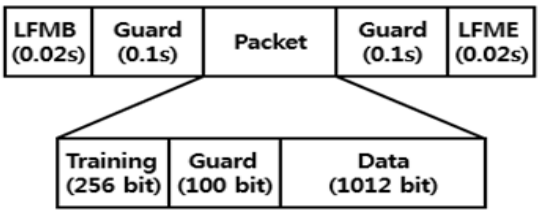

Fig. 5 Packet structure

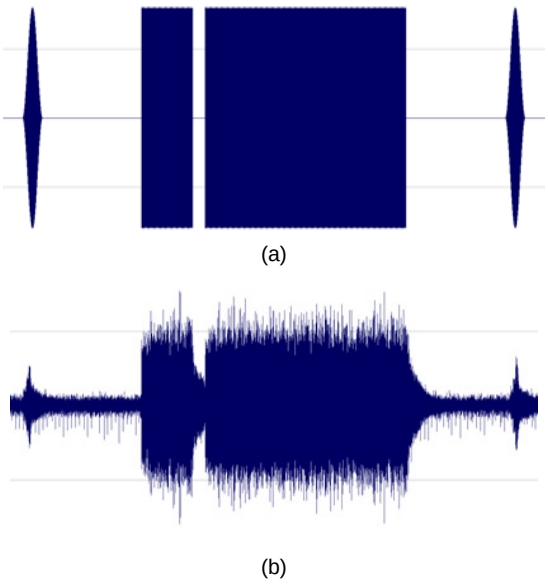

Fig. 6 Transmitted and received signal

실제 실험에서 송신한 신호와 최종적으로 수신된 신호의 형태는 그림 6의 (a), (b)와 같다. 신호의 전송은 각 패킷 사이에 딜레이를 두고 연속적으로 5회 반복하여 전송하였다. 수신 신호의 파형은 Sound forge tool를 이

용하여 정규화와 대역 통과 필터를 통과 시킨 후의 파형이다.

신호는 506 bit의 text를 (2,1,7) 컨볼루션 부호화기를 거쳐 1012 bit의 데이터를 전송하였다. 표 4와 표 5에는 신호의 전송 시 각 데이터 패킷 사이에 딜레이를 두고 5번 반복하여 전송하였으며 시간상의 구분으로 Interval #1부터 Interval #5로 표현하고 각각의 Interval 신호들을 수신 후 복조 과정을 거친 뒤 송신신호와의 비교한 수신 오류 개수, 등화기 통과 후 오류 개수, 그리고 마지막으로 복호 후의 오류 개수를 나타내었다. 표 4는 기존의 방식인 경판정 기반의 송수신 모델을 적용한 호수 실험 결과이고 표 5는 제안하는 반복기반의 터보 등화 모델에 대한 호수 실험 결과이다. 수신 오류의 개수는 수중 환경이 시간에 따라 일정치 않기 때문에 오류의 개수는 차이가 난다. 등화기 후의 오류 개수는 전송 부에 발생하는 다중 경로로 인한 간섭이 제거되었기 때문에 수신 오류를 정정하는 기능을 가지고 있다.

표 4에서 알 수 있듯이 경판정 기반의 송수신 모델은 5개의 Interval 중 Interval #2에서만 모든 데이터가 복호 가능함을 확인하였다. 동일한 송신신호를 이용한 반복기반 터보 등화모델에서는 표 5를 보게 되면 등화기 통과 후 오류개수가 Interval #5를 제외하고 많이 줄어든 것을 확인 할 수 있었고, Interval #5를 제외한 다른 Interval에서 모든 데이터가 복호 가능함을 확인 하였다.

Table. 4 Error number of transceiver based on hard decision

Interval #	1	2	3	4	5
Received error	509	508	503	504	506
Equalizer error	97	8	101	76	495
Decoded error	57	0	35	67	264

Table. 5 Error number of transceiver based on turbo equalization

Interval #	1	2	3	4	5
Received error	526	504	484	501	504
Equalizer error	87	3	92	75	493
Decoded error	0	0	0	0	245

표 4과 5에서 알 수 있듯이 5번의 데이터를 반복적으로 전송하여 수신된 신호를 두 가지 모델을 이용하여 복호 한 결과, 기존의 방식은 다섯 번의 시도 중 한 번만 모든 데이터를 복호하였지만 반복기반의 터보 등화 모델은 네번의 모든 데이터를 복호하는데 성공하였다.

Ⅳ. 결 론

기존 수중음향통신에 대한 연구는 시변동성을 갖는 수중 채널에서 전송율 향상이나 송수신 거리 증대 관점에서만 이루어졌으며, 실제 은밀성이 강조되는 환경에서의 전송성능에 대한 언급은 거의 없는 실정이다. 따라서 실제 은밀 수중 통신 시스템을 설계하고자 하는 경우 이제 적합한 시스템 설계와 전송 성능이 어떻게 나타나는지에 대한 분석이 필수적이다.

즉, LPI 기술을 적용함으로써 통신 성능에 미치는 영향을 분석하고, 이를 통해 최적의 은밀 수중 통신 시스템의 설계가 필요하다. 본 연구에서는 은밀 수중 통신을 위하여 은밀 통신에 사용하는 기법 중 대표적인 기법인 직접수열 대역확산 방식을 적용하였고, 송수신 모델을 제안하였다. 은밀 수중 통신에서 고려되는 송수신 모델은 크게 두 가지로 나뉠 수 있으며, 기존의 방식인 경판정 기반의 송수신 모델과 반복기반의 터보 등화 모델이다. 두 가지의 모델을 시뮬레이션과 호수실험을 통하여 성능을 비교하였다. 시뮬레이션 결과, 대역확산 통신 기법을 적용하였을 경우 낮은 SNR 환경에서 성능이 더 우수함을 알 수 있었고 기존 방식보다 제안하는 반복기반의 터보 등화 모델의 성능이 2 dB의 성능이 향상되었다. 호수 실험에서는 5번의 데이터를 반복적으로 전송하여 수신된 신호를 두 가지 모델을 이용하여 복호 한 결과, 기본 방식은 한번의 성공 확률을 보인 반면 반복기반의 터보 등화 모델에서는 네번의 복호 성공확률을 보였다.

실험을 통해 복호기 입력 값이 연판정인 반복기반의 터보 등화 모델이 기존의 방식인 경판정 기반의 모델보다 성능이 우수함을 알 수 있었다. 따라서 제안하는 반복기반의 터보 등화 모델이 대역확산 통신을 이용한 은밀 수중 통신에서 더 적합한 송수신 모델이다.

ACKNOWLEDGMENTS

The research was financially supported by Hanwha, Korea.

REFERENCES

[1] J. H. Park Jr, "LPI TECHNIQUES IN THE UNDERWATER ACOUSTIC CHANNEL," *IEEE Military Communication conference*, vol. 1, pp. 10.5.1-10.5.5, Oct. 1986.

[2] E. M. Sozer, 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," *IEEE. Oceans'99 MTS*, vol. 1, pp. 228-233, Sep. 1999.

[3] G. D. Weeks, J. K. Townsend and J. A. Freebersyser, "A Method and Metric for Quantitatively Defining Low Probability of Detection," *Proceeding of IEEE Military Communication Conference*, vol. 3, pp. 812-826, Oct. 1998.

[4] T. C. Yang and W. B. Yang, "Low signal-to-noise-ratio underwater acoustic communication using direct-sequence spread spectrum signals," *IEEE Oceans 2007*, pp. 821-826, Jun. 2007.

[5] M. Stojanovic, J. G. Proakis, J. A. Rice and M. D. Green, "Spread Spectrum Underwater Acoustic Telemetry," *IEEE OCEANS '98 Conference Proceedings*, vol. 50, pp. 650-654, Oct. 1988.

[6] M. Tuchler, R. Koetter, and A. C. Singer, "Turbo Equalization: principles and new results," *IEEE Trans CommunicationsIEEE*, vol. 2, pp. 754-767, Oct. 2002.

[7] R. Koetter, A. C. Singer and M. Tuchler, "Turbo Equalization," *IEEE Signal Processing Magazine*, pp. 67-80, Oct. 2004.

[8] L. R. Bahl, J. Cocke, F. Jelinek and J. Raviv, "Optimal decoding of linear codes for minimizing sysbol error rate," *IEEE Transactions on Information Theory*, vol. 20, pp. 284-287, Mar. 1974.

[9] K. Berberdis, T. Rontogiannis and S. Theodoridis, "Efficient block implementation of the LMS based DFE," *Proc. 13th Digital Signal Processing Int. Conf.*, vol. 1, pp. 284-287, Mar. 1974.

안태석(Tae-Seok Ahn)

2015년 2월 : 한국해양대학교 전파공학과 (공학사)
2015년 3월 ~ 현재 : 한국해양대학교 전파공학과 석사과정
※관심분야 : 위성통신, 이동통신, 수중통신, 변 · 복조 기술, 채널 코딩 등

정지원(Ji-Won Jung)

1989년 2월 : 성균관대학교 전자공학과 (공학사)
1991년 2월 : 성균관대학교 전자공학과 (공학석사)
1995년 2월 : 성균관대학교 전자공학과 (공학박사)
1991년 2월 ~ 1992년 2월 : LG 정보통신연구소 연구원
1995년 9월 ~ 1996년 8월 : 한국통신 위성통신연구실 선임연구원
1997년 3월 ~ 1998년 12월 : 한국전잘오신연구원 초빙연구원
1996년 9월 ~ 현재 : 한국해양대학교 전파공학과 정교수
2001년 8월 ~ 2002년 8월 : 캐나다 NSERC Fellowship (Communication Research Center 근무)
※관심분야 : 위성통신, 이동통신, 수중통신, 변 · 복조 기술, 채널 코딩, FPGA 기술 등

박태두(Tae-Doo Park)

2008년 2월 : 한국해양대학교 전파공학과 (공학사)
2010년 2월 : 한국해양대학교 전파공학과 (공학석사)
2014년 2월 : 한국해양대학교 전파공학과 (공학박사)
2014년 ~ 현재 : (주)한화 구미사업장 개발 3팀 선임연구원
※관심분야 : 수중통신, 임베디드시스템, 변・복조 기술, 채널 코딩, FPGA 기술 등

이동원(Dong-Won Lee)

2004년 2월 : 동명정보대학교 정보통신공학과 (공학사)
2008년 2월 : 국립금오공과대학교 소프트웨어공학과 (공학석사)
2012년 2월 : 국립금오공과대학교 소프트웨어공학과 (공학박사)
2013년 ~ 현재 : (주)한화 구미사업장 개발 3팀 선임연구원
※관심분야 : 수중통신, 모뎀설계, 임베디드시스템