

수중음향통신에서 PN 성능 기반의 효율적인 수신 구조

백창욱* · † 정지원

*한국해양대학교 전파공학과 대학원, † 한국해양대학교 전파공학과 교수

An Efficient Receiver Structure Based on PN Performance in Underwater Acoustic Communications

Chang-Uk Baek* · † Ji-Won Jung

*, † Department of Radio Communication Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 606-791, Korea

요 약 : 수중음향통신은 다중경로로 인한 신호간의 간섭으로 성능이 열악하므로 채널 부호화의 적용은 필수적이다. 수중 통신에서 데이터를 전송하기 위한 패킷의 구조는 동기 획득을 위해 데이터 전송 전에 PN 시퀀스를 데이터의 헤드 부분에 첨가하여 전송한다. PN 시퀀스는 송·수신 간에 서로 알고 있는 데이터를 이용하여 동기를 획득하는 기능을 하고 있으므로 PN 시퀀스는 채널 부호화를 하지 않고 전송된다. 이러한 비부호화 된 PN 시퀀스는 대부분의 연구에서는 동기 획득을 위해 활용되지만 본 논문에서는 동기 획득 뿐 아니라 PN 시퀀스의 성능을 이용하여 데이터 필드의 성능 또한 예측할 수 있어 데이터 필드의 복호부에 정보를 제공할 수 있다. 본 논문에서는 다중 경로 전달 환경인 수중음향통신에서 원활한 통신과 함께 수신 신호의 성능을 향상시키기 위하여 낮은 SNR에서도 우수한 성능을 보이는 컨볼루션 부호화 기법과 BCJR 복호 방식을 이용하여 다양한 부호화율에서 비 부호화 된 PN 시퀀스의 오류율과 부호화 된 데이터 필드의 오류율의 상관관계를 시뮬레이션 및 실제 수중 실험을 통해 분석하여 효율적인 수신 구조를 제시하였다.

핵심용어 : 수중음향통신, 다중경로, PN 시퀀스 성능, 오류율, 채널 부호화

Abstract : Underwater communications are degraded as a result of inter symbol interference in multipath channels. Therefore, a channel coding scheme is essential for underwater communications. Packets consist of a PN sequence and a data field, and the uncoded PN sequence is used to estimate the frequency and phase offset using a Doppler and phase estimation algorithm. The estimated frequency and phase offset are fed to a coded data field to compensate for the Doppler and phase offset. The PN sequence is generally utilized to acquire the synchronization information, and the bit error rate of an uncoded PN sequence predicts the performance of the coded data field. To ensure few errors, we resort to powerful BCJR decoding algorithms of convolutional codes with rates of 1/2, 2/3, and 3/4. We use this powerful channel coding algorithm to present an efficient receiver structure based on the relation between the bit error of the uncoded PN sequence and coded data field in computer simulations and lake experiments.

Key words : Underwater Communication, Multipath, PN Code Performance, Error Rate, Channel Coding

1. 서 론

수중통신에서 전파는 급격한 감쇠특성을 가지기 때문에 수중에서의 무선통신은 음파를 이용하여 통신을 하게 된다. 그러나 수중에서는 해양 상태, 온도, 염분도, 수심 등의 다양한 환경 요소에 따라 음파의 전달이 제한되고 육상 통신에 비해 상대적으로 저주파 대역을 사용하기 때문에 대역폭이 크게 줄어들어 수중음향통신 시스템의 성능 역시 제한적일 수밖에 없다. 이러한 음향 채널 특성의 시공간적인 변화는 디지털 수중 음향 통신에서 송신하는 심벌간의 상호간섭(ISI : Inter-Symbol

Interference)을 야기하여 통신 시스템의 성능을 저하시키게 된다. 따라서 이러한 비선형 복합 채널을 가지는 수중통신에서, 시간에 따라 채널의 특성이 매우 빠르게 변하는 시변 특성을 가지는 채널이므로, 이를 신뢰성이 있고 올바르게 복조하기 위해서는 여러 특성을 고려한 채널 부호화 방식이 매우 중요하다 (Kifoye et al, 2000; Stojanovic et al, 1994; Walree, 2011). 또한, 채널 특성이 매우 빠르게 변화하는 시변 특성을 가지는 수중 통신에서 패킷 설계는 매우 중요하다. 주로 패킷의 구성은 수신 되는 신호의 동기를 획득하기 위한 PN(Pseudo Noise) 시퀀스 필드와 채널 부호화 된 데이터 필드로 나누어진다. PN 시퀀스는

† Corresponding author : 비회원, jwjung@kmou.ac.kr 051)410-4424

* 정회원, cubaek@kmou.ac.kr 051)410-4429

송수신간에 서로 알고 있는 데이터를 이용하여 동기를 획득하는 기능을 하고 있으므로 PN 시퀀스는 채널 부호화를 하지 않고 전송된다. 이러한 비 부호화 된 PN 시퀀스는 대부분의 연구에서는 동기 획득을 위해 활용되지만 본 논문에서는 동기 획득 뿐 아니라 PN 시퀀스의 성능을 이용하여 데이터 필드의 성능 또한 예측할 수 있어 데이터 필드의 복호 후에 정보를 제공할 수 있다. 본 논문에서는 다중 경로 전달 환경인 수중음향통신에서 원활한 통신과 함께 수신 신호의 성능을 향상시키기 위하여 낮은 SNR(Signal to Noise Ratio)에서도 우수한 성능을 보이는 컨볼루션 부호화(Convolutional code) 기법과 BCJR 복호 방식을 이용하여 다양한 부호화율에서 비부호화 된 PN 시퀀스의 오류율과 부호화 된 데이터 필드의 오류율의 상관 관계를 시뮬레이션 및 실제 경북 문경시 경천호에서 실제 수중 실험을 통해 분석하여 효율적인 수신기 구조 모델을 제시하였다. 기존의 방식은 PN 시퀀스를 이용하여 데이터 필드에 동기 정보만 제공하며, 데이터 필드의 성능을 예측하는 수신기 구조는 제시되지 않고 있다.

2. 시스템 모델

PN 시퀀스와 데이터 필드의 오류율 상관 관계를 분석하기 위한 시스템 모델은 Fig. 1과 같다. 일반적으로 컨볼루션 부호의 복호방법으로는 경판정(Hard decision) 값을 이용하여 복호를 진행하는 비터비(Viterbi) 알고리즘이 사용되어지고 있다. 하지만 등화기와의 반복을 통하여 성능을 향상시키기 위해서는 경판정 값이 아닌 연판정(Soft decision) 값을 필요로 하게 된다. 이에 연판정을 통하여 등화기에 추정된 값을 업데이트하기 위해서 BCJR (Bahl et al, 1974) 알고리즘을 사용하였다. 터보 등화기는 기존의 등화기보다 좋은 성능을 보이지만 MAP(Maximum a Posteriori) 알고리즘을 사용하기 때문에 복잡도가 채널 길이 등에 대해 지수적으로 증가하는 단점이 있다. 이러한 이유로 인해 터보 등화기의 복잡도를 줄이기 위한 방법으로 MAP 등화기보다 복잡도가 적은 선형 등화기나 결정 궤환 등화기(DFE : Decision Feedback Equalizer) (Salz, 1973; Berberdis et al, 1997)를 사용하는 방법이 있는데 본 연구에서는 Fig.1과 같이 결정 궤환 등화기를 갖는 터보 등화기(Tuchler et al, 2002)를 고려하였다.

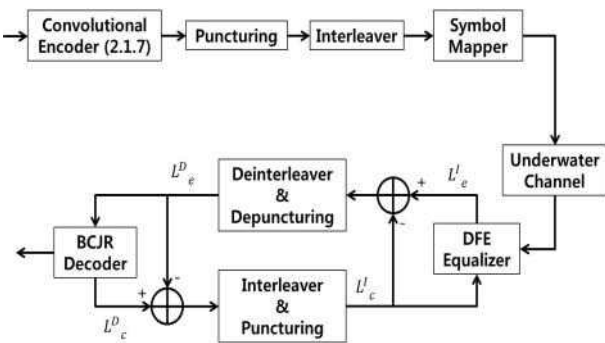


Fig. 1 Model of the BCJR equalization in baseband.

(n,k,m) 컨볼루션 부호는 k 비트가 부호화기로 입력되어 부호화 된 n 비트가 생성되며, 부호화의 구성 시 구성장 수는 m 을 나타낸다. Fig. 1에서 데이터는 (2,1,7) 컨볼루션 부호화기를 거친 뒤 전송 효율을 향상시키기 위한 평처링, 오류를 산발시키는 인터리버, 심벌 매핑 후 전송되어 진다. 전송된 심벌은 채널을 통과한 후 백색 가우시안 잡음이 더해진다. 수신단의 터보 등화기는 등화기와 복호기로 구성되어 있으며, 등화기와 복호기는 평처링 된 부호의 위치에 “0”을 삽입하는 디평처링 과정, 그리고 인터리버, 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. 복호기에서 출력한 피드백 정보는 다시 인터리빙 과정을 거쳐 정정된 신호를 등화기에 재입력한다. 송신된 신호는 수중채널을 거치고 백색 가우시안 잡음이 더해져 수신된다. 기저대역으로 변환한 후 L_c^I 는 결정 궤환 등화기의 출력 값으로 수신 신호로부터 등화기에서 추정되어진 외부정보(extrinsic) 값이다. L_c^D 값은 결정 궤환 등화기의 출력 값 L_c^I 와 L_c^I 의 차를 디인터리빙하여 복호기로 입력한다. 복호기에서 추정되어진 외부정보 값 L_c^D 은 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

$$L_c^D = \log \frac{P(x=+1)}{P(x=-1)} \quad (1)$$

외부정보 값 L_c^D 는 복호기의 출력 값으로써 사후 확률 값을 계산하여 0 또는 1의 오류 값을 보정 할 수 있는 값이다. 이러한 L_c^D 와 L_c^I 의 차이 값을 인터리빙한 L_c^I 가 결정 궤환 등화기에 입력된다. L_c^I 를 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. BCJR 복호는 컨볼루션 부호의 출력 비트 일부를 삭제하는 평처링 컨볼루션 부호(Cain et al, 1979; Haccoun and Begin, 1989)를 사용함으로써 얻어진다. 즉, 식 (2)와 같이 평처링 패턴에 따른 제한된 수의 부호화 된 비트들만을 사용한다. 평처링 부호화 방식은 고속 BCJR 복호기를 단순화 할뿐 아니라 부호화율을 선택할 수 있는 컨볼루션 부호기 및 BCJR 복호기를 구현함에 있어서 유용하다.

$$R_{2/3} = \begin{bmatrix} 1 & 1 \\ & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$R_{3/4} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ & 1 & 0 & 1 \\ & & 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

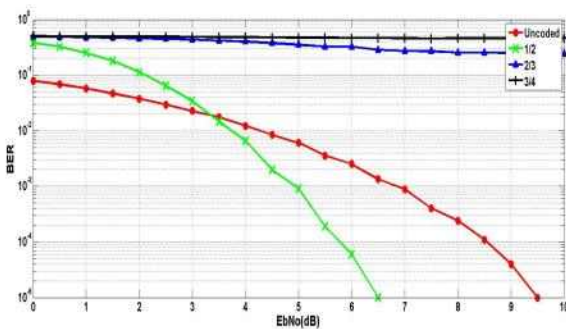
식 (2)는 다양한 부호화율을 제공하기 위한 평처링 패턴이다. 평처링 패턴에서 “1”은 전송함을 의미하고, “0”은 삭제함을 의미한다. 평처링 패턴에서 “0”에 해당하는 비트를 삭제함

으로써 데이터를 전송할 때 삭제된 비트로 인해 전송률이 증가하게 된다. 식 (2)에서 R_x 는 부호화율 x 를 나타낸다. 본 논문에서는 구속장 수가 7인 컨볼루션 부호기에 부호화율 1/2에 평치링시킨 부호화율 2/3, 3/4만을 고려한다.

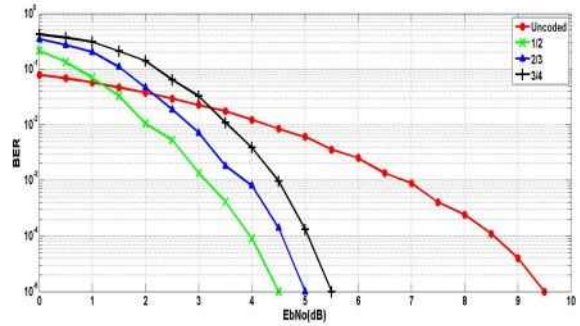
3. PN 시퀀스와 데이터 필드 오류율 상관 관계 분석

3.1 시뮬레이션을 통한 비부호화 오류율과 부호화 오류율 상관 관계 분석

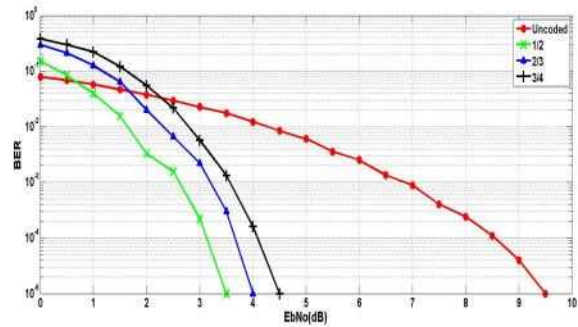
시뮬레이션을 이용하여 비부호 오류율과 부호화 오류율의 상관관계를 알아보기 위해 가우시안 백색 잡음에서 Fig. 1의 모델을 컴퓨터 시뮬레이션을 하였다. 시뮬레이션은 입력 비트를 10^4 개를 전송하여 visual C++ 환경에서 몬테카를로(Monte-Carlo) 시뮬레이션을 진행하였다. Fig. 2 (a)를 통해 경관정을 하게 되면 부호화율 2/3, 3/4의 평치링 패턴으로 인해 오류를 복구하지 못하는 것을 알 수 있다. 이는 모든 데이터를 1을 보낸다고 가정하였을 때, 평치링 패턴에서의 “0”인 삭제된 데이터로 인해 부호화율 2/3은 25%, 3/4는 33.3%의 오류가 발생하게 되어 복호가 제대로 되지 않기 때문이다. 이와 달리 Fig. 2 (b), (c)의 경우 복호를 진행함에 있어서 평치링 패턴의 “0”인 삭제된 데이터를 중간 값으로 지정함으로써 평치링 부호화를 적용하여도 만족할만한 성능이 나타나는 것을 알 수 있다. 10^4 개의 데이터를 시뮬레이션 하였으므로 그의 10배인 10^{-3} 지점을 기준으로 보면 BCJR 복호기가 비터비 연관정보보다 각 부호화율에서 1 [dB]가량 성능이 우수한 것을 알 수 있다.



(a) Viterbi decoder with hard decision



(b) Viterbi decoder with soft decision



(c) BCJR(iteration = 4)

Fig. 2 BER performance for coding rate according to decoding method

Table 1은 Fig. 2 (a)~(c)의 시뮬레이션 결과를 바탕으로 AWGN(Additive White Gaussian Noise) 채널에서 QEF(Quasi Error Free) 영역에서의 비부호(Uncoded) 오류율과 각 성능의 상관성을 나타낸다. QEF 영역이란 오류가 발생하지 않은 지점을 일컫는다. 이는 각 복호 방식별 부호화율에 따른 성능이 QEF가 되는 지점(10^{-3} 지점)의 비부호 오류율을 나타낸다. 예를 들어 Table 1에서 BCJR복호기의 경우 부호화율 3/4인 경우 비부호화 오류율이 10^{-2} 이 되면 부호화율 3/4으로 하였을 경우 오류 없이 복호 가능함을 알 수 있다.

Table 1 Required uncoded error rates of QEF region in the AWGN channel

Decoding Method	Coding rate	Uncoded error rate
Viterbi decoder with hard decision	1/2	$10^{-2.3}$
	2/3	-
	3/4	-
Viterbi decoder with soft decision	1/2	$10^{-1.6}$
	2/3	$10^{-1.8}$
	3/4	10^{-2}
BCJR (itreatment=4)	1/2	$10^{-1.4}$
	2/3	$10^{-1.6}$
	3/4	$10^{-1.7}$

3.2 호수 실험을 통한 PN 시퀀스 오류율과 부호화 오류율 상관 관계 분석

3.2.1 수중 실험 환경 및 파라메타

Fig. 3과 같은 환경에서 실제 수중음향통신 실험을 수행하였다. 송신기로는 Neptune 사의 D/17 모델을 사용하였고, 수신기로는 B&K 8106을 사용하였다. 실험은 경북 문경시 경천호에서 수행되었다. 실험 시기는 2015년 3월과 5월 두 번의 실험을 하였으며, 수면 상태는 바람에 의한 영향이 있었으며 송수신기 사이의 거리는 약 400 m로 하였다. 그리고 송신기는 수면 아래 2 m, 수신기는 20 m 아래 위치하였다. 반송파 주파수와 샘플링 주파수는 각각 16 kHz 및 192 kHz로 하였으며, 전송율은 1 kbps로 하였다. 송·수신기의 위치는 실제 실험에 앞서 송·수신기의 위치를 변경하면서 채널 특성을 분석한 결과 송신기의 음원이 하향 밴딩, 즉 음파가 아래로 전달되는 특성을 보여 송·수신기의 수심을 설정하였다.

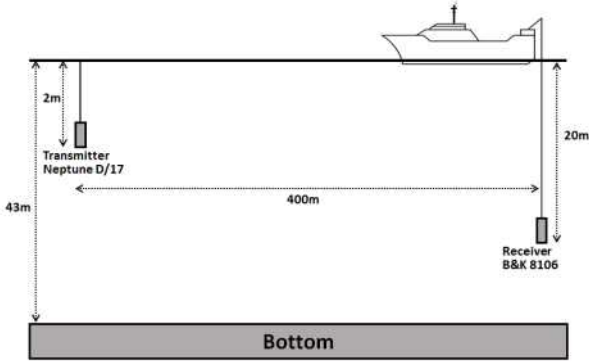


Fig. 3 Illustration of the lake trial.

Table 2 Parameters for experimentation

Source	500bit Text
Channel coding	(2,1,7)Convolutional code coding rate : 1/2, 2/3, 3/4 Decoding method : BCJR
Modulation	QPSK
Packet Size(D_k)	500 symbols
Bit rate	1 Kbps
Center frequency	16 kHz
Sampling frequency	192 kHz
Distance	400 m
Water depth	43m
Transmitter/Receiver Depth	TX : 2 m RX : 20 m

Fig. 4에서의 패킷 구조와 같이 패킷의 처음과 끝의 신호는 LFM(Linear Frequency Modulation)이며, 이는 패킷의 시작과 끝을 알리는 신호이며, 두 번째 신호인 PN 시퀀스는 수신되는 신호의 정확한 타이밍을 잡기 위해 사용되었으며, 또한

결정 궤환 등화기에서 다중 경로를 추정하기 위해 사용되었다.

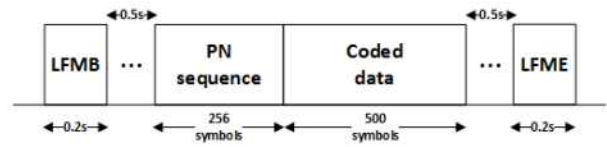


Fig. 4 Packet structure of transmitted signal

Fig. 5는 문경호 호수에서 실제 실험환경에서 측정된 채널 전달 특성을 나타낸 것이다. 측정을 위해 약 2 kHz 대역폭을 갖는 0.2 sec 길이의 LFM(Linear Frequency Modulation)신호를 주기적으로 약 1000회 가량 송신하였다. 그림은 송·수신된 LFM 신호의 상관관계를 이용하여 모델링 한 것으로 다중경로에 따른 영향을 받는 것을 확인할 수 있다. 이는 수면에 반사되어지는 반사파 그리고 바닥에서 반사되어 들어오는 신호들이 있다는 것을 의미한다. 또한, Fig. 5 (a)는 3월 (b)는 5월의 채널 전달 특성으로 수온이 상승한 5월이 3월보다 채널 환경이 안 좋은 것을 확인할 수 있다.

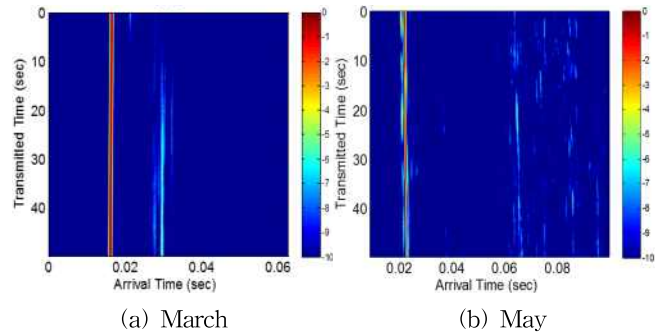


Fig. 5 Underwater channel impulse response

3.2.2 수중 실험 결과

Fig. 6은 실험을 통해 수신된 신호와 제시한 구조를 통해 등화기 출력 신호의 정상도이다. 등화기는 LMS(Least Mean Square) 알고리즘 기반의 결정 궤환 등화기를 이용하여 시간에 따라 변화하는 채널의 전달특성을 보상하였다. 결정 궤환 등화기에서 사용되어진 피드포워드와 피드백워드 탭 수는 각각 2탭으로 고정하였고, 결정 궤환 등화기의 μ 값은 0.009를 사용하였다. Fig. 6 (a)에서 수신된 신호의 정상도는 QPSK(Quadrature Phase Shift Keying) 정상점에 모이지 않고, 알아볼 수 없을 정도로 넓게 퍼져있는 것을 알 수 있다. 하지만 Fig. 6 (b)에서처럼 등화기 출력 후 다중 경로에 의한 인접 심볼 간의 간섭과 백색 가우시안 잡음을 보상함에 따라 정상도는 QPSK 정상점으로 데이터가 모이는 것을 알 수 있다.

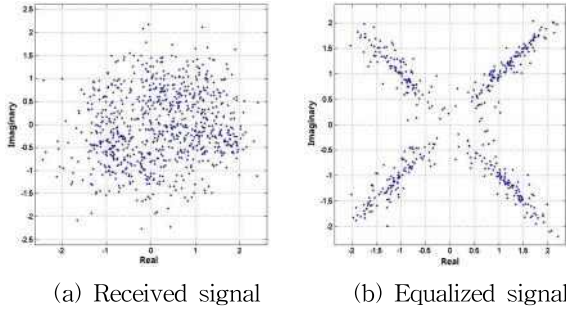


Fig. 6 Constellation

Fig. 7 (a)~(b)는 3월 실험 데이터의 PN 시퀀스를 이용한 training 데이터의 오류율에 따른 성능을 나타낸다. 3월 실험에서는 부호화율 1/2에 대해서만 실험을 하였다. PN 오류율이 10% 미만일 때에는 대부분의 상황에서 완벽하게 복호를 하는 것을 알 수 있고, PN 오류율이 약 20% 이상이 되면 복호하지 못하는 상황이 발생하는 것을 알 수 있다.

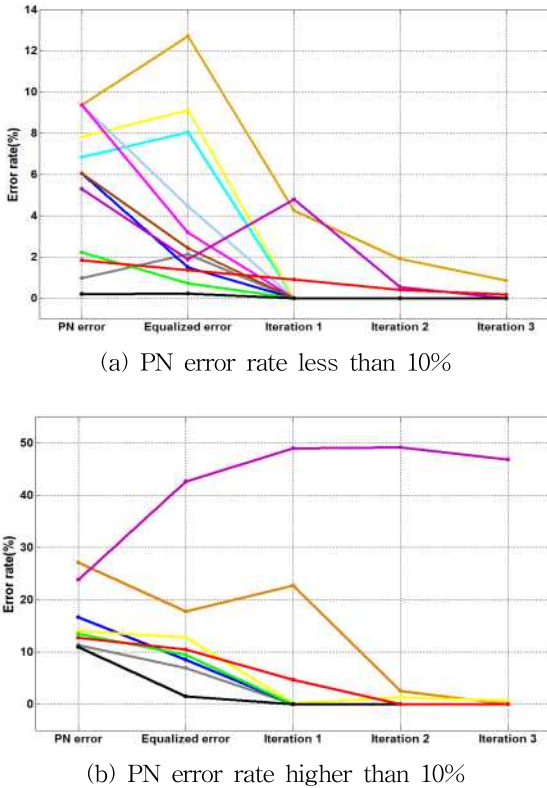
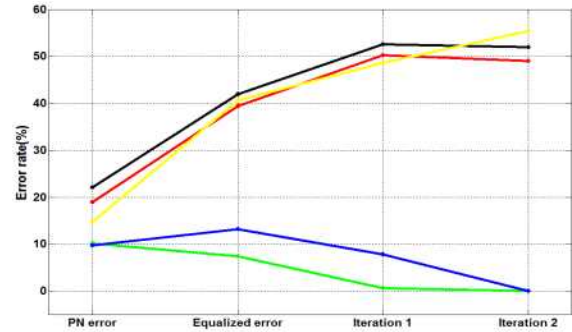
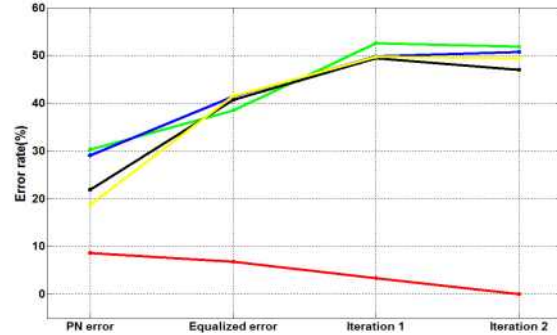


Fig. 7 Relation of error rates of coded data field and PN field (March)

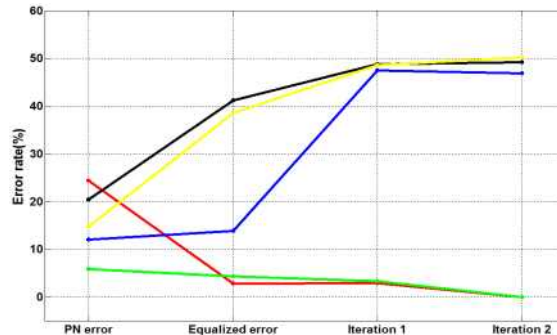
Fig. 8 (a)~(c)는 5월 실험 데이터의 세 가지 부호화율에 따른 PN 시퀀스를 이용한 데이터의 오류 및 성능을 나타낸다. 3월 실험 데이터에서와 마찬가지로 5월 실험 데이터 역시 PN 오류율이 10%이하일 때 모든 상황에서 완벽하게 복호를 하였고, 부호화율 3/4의 예외적인 1번의 경우를 제외하면 PN 오류율이 10% 이상이 되면 제대로 복호를 하지 못함을 알 수 있다.



(a) Coding rate 1/2



(b) Coding rate 2/3



(b) Coding rate 3/4

Fig. 8 Relation of error rates of coded data field and PN field (May)

3월 수신 데이터와 5월 수신 데이터를 종합해보면 PN 시퀀스 오류율이 10% 미만인 15가지 경우 반복 효과를 통해 거의 모든 경우 복호를 할 수 있었다. 또한 PN 시퀀스 오류율이 10%~20%인 12가지 경우 7가지의 상황에서 복호를 할 수 있었고, PN 오류율이 20%이상인 8가지 경우 단 2가지의 상황에서만 복호를 할 수 있었다. 이를 통해 PN 시퀀스의 오류율이 증가할수록 수신 데이터를 복호함에 있어서 어려움이 나타나게 되고 PN 오류율을 통해 데이터를 수신할지를 선택할 수 있을 거라 판단된다. 3월과 5월 데이터를 기준으로 볼 때, 부호화율 1/2 일 때는 10% 이하의 PN 시퀀스의 오류율일 때 데이터 필드의 복호가 성공적이라 판단할 수 있다. 부호화율 2/3 일 때는 PN 시퀀스 오류율이 8% 부호화율이 3/4일 때 5% 미만이어야만 데이터 필드의 오류율이 0이 됨을 통계적으로 알 수 있다. 이와 같은 결과를 바탕으로 Table 3에서와 같이

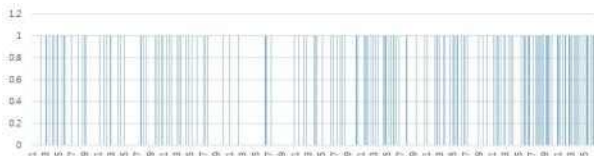
PN 시퀀스 오류율과 부호화 된 데이터 필드의 오류율의 상관 관계를 나타낼 수 있다.

Table 3 Required uncoded PN error rates of QEF region in the underwater channel

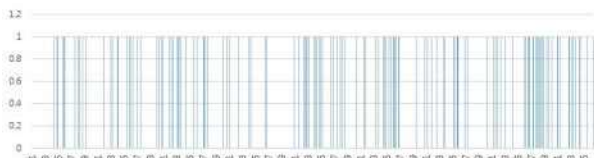
Coding rate	Uncoded PN error rates
1/2	~10%(10 ⁻¹)
2/3	~8%(10 ^{-1.1})
3/4	~5%(10 ^{-1.3})

Table 1과 Table 3을 보면 Table 3인 경우 시뮬레이션 값과 실제 수중 신호의 값을 보면 약간의 차이는 나타나지만 이는 실제 수중 실험 환경과 AWGN 시뮬레이션 환경에서 오는 차이가 될 수 있으며, 또한 실험하는 데이터 개수의 차이 때문에 오차가 발생한다.

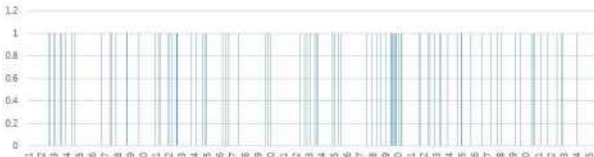
3월 데이터와 5월 데이터를 종합적으로 비교 분석한 결과 등화기의 오류가 많음에도 복호가 이루어지는 반면 등화기의 오류가 적음에도 복호기가 오류를 정정하지 못하는 경우가 있다. 이와 같은 경우의 등화기의 오류가 복호 성능에 미치는 영향을 분석하면 아래 Fig. 9 와 Fig. 10과 같다.



(a) Equalized symbols

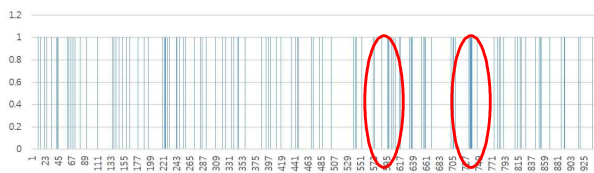


(b) Iteration = 1

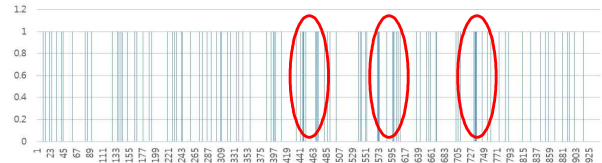


(c) Iteration = 2

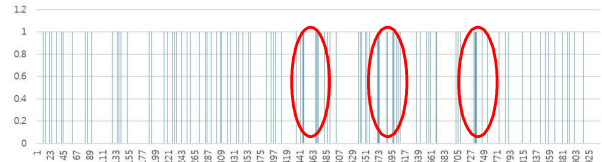
Fig. 9 In the case of perfect error correction



(a) Equalized symbols



(b) Iteration = 1



(c) Iteration = 2

Fig. 10 In the case of decoding error occurrence

Fig. 9 와 Fig. 10에서 (a)는 등화기 출력 심볼에 대한 오류의 개수를 나타낸 것이고, (b)와 (c)는 복호기에서 반복을 통해 오류를 정정한 후의 오류 개수를 나타내고 있다. Fig. 9 (a)의 등화기 출력 심볼에 대한 오류 개수는 비록 Fig. 10 (a)에 비해 많지만 Fig. 9 와 Fig. 10 의 (c)를 비교해보면, Fig. 9 (c)가 오류 개수가 적음을 확인할 수 있다. 이는 Fig. 9의 등화기 출력 심볼에 대한 오류는 군집오류가 반복을 통해 랜덤해지는 현상을 보이며, Fig. 10은 반복을 해도 군집오류가 그대로 존재하여 복호기가 더 이상 오류를 정정하지 못함을 알 수 있다. 따라서 본 연구를 통하여 군집오류를 랜덤화시키는 인터리버의 구조 또한 성능에 영향을 미침을 알 수 있다.

4. 효율적인 수신부 모델 제시

Fig. 11은 본 논문에서 제안하고자 하는 패킷구조에 대한 그림이다.

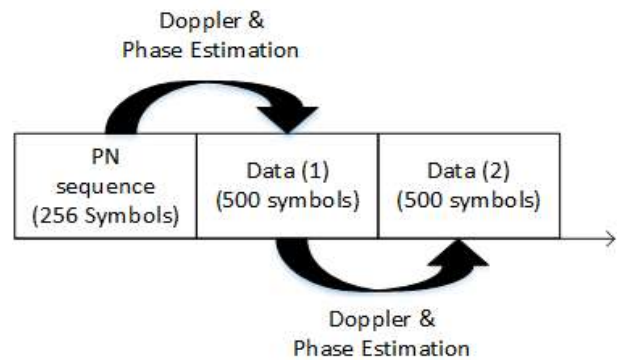


Fig. 11 Proposed packet structure for high throughput

이미 송수신단에서 알고 있는 PN 시퀀스 256 심볼을 위상과 주파수 오차를 보정하고 이의 오류율을 파악한다. Table 3과 같은 데이터 필드의 구간의 복호 후 오류정정을 완벽히 하

는 영역인 QEF의 범위에 들어오게 하는 PN 시퀀스의 오류율이 보장되면 데이터 필드를 복호하고 오류 범위내에 들어오지 못하면 복호후 오류가 더욱더 증가할 수 있으므로 복호하지 않고 버린다. QEF 영역 범위 내에 들어온 데이터 필드는 복호 후 두 번째 데이터 필드를 복호하기 위해 재 부호화 하여 수신된 데이터 필드 1을 이용하여 PN 시퀀스 역할을 하는 위상 및 주파수 오차를 구하여 다음 데이터 필드에 제공한다. 이렇게 함으로써 대역폭이 좁은 수중 음향 통신에서 전송 효율이 높은 수신기 구조를 설계할 수 있다. Fig. 12는 Fig. 11의 수신단 처리 과정을 순서도를 통해 설명한 그림이다. 이는 PN 부호의 오류율을 이용하여 제시한 구조이며, 향후 시뮬레이션 및 수중 실험을 통해 성능을 비교 분석 할 것이다.

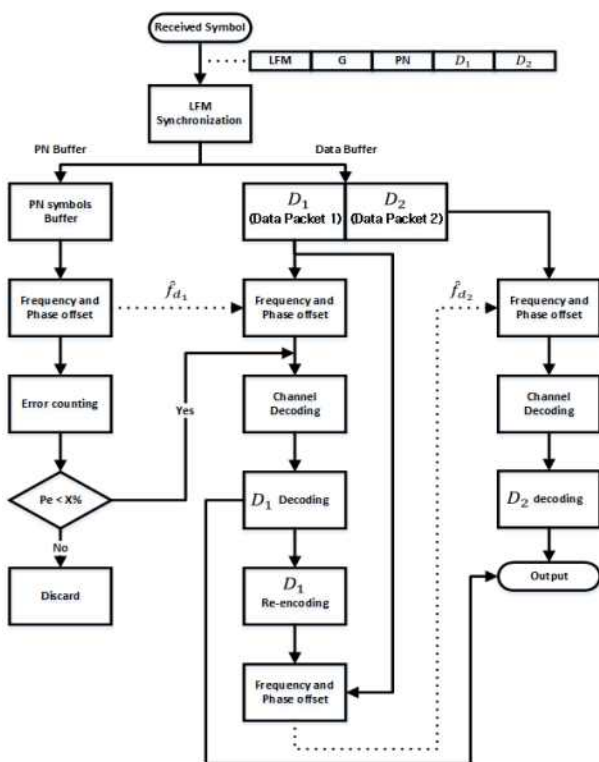


Fig. 12 Flowchart of decoding processing

5. 결 론

수중 음향 통신에서 패키지의 구조는 주파수 및 시간 동기를 위해 송수신간의 서로 알고 있는 비부호화 된 PN 시퀀스와 부호화 된 데이터 필드로 나누어진다. 이러한 비부호화 된 PN 시퀀스는 대부분의 연구에서는 동기를 획득하여 데이터 필드에 제공하는 역할을 하지만 본 논문에서는 동기 획득 뿐 아니라 비부호화 된 PN 시퀀스의 오류율을 이용하여 부호화된 데이터 필드의 오류율을 예상하여 효율적인 수신기 구조를 제시하였다. 데이터 필드의 부호화율이 1/2인 경우 비부호화 된 PN 시퀀스의 오류율이 10^{-1} 이하면 데이터 필드의 복호는 오류 없이 복호할 가능성이 크기 때문에 데이터 필드를 복호 후

이를 다음 데이터 필드의 위상 및 주파수 오프셋 정보를 제공할 수 있어 전송 효율이 높은 신뢰성 있는 수중 통신 모형을 설계할 수 있다.

References

- [1] Bahl, L., Cocke, J., Jelinek, F., and Raviv, J.(1974), "Optimal Decoding of Linear Codes for minimizing symbol error rate.", IEEE Transactions on Information Theory, Vol. IT-20, No. 2, pp. 284-287.
- [2] Berberdis, K., Rontogiannis, T., and Theodoridis, S.(1997), "Efficient block implementation of the LMS-based DFE.", Proceedings 13th Digital Signal Processing International Conference, Vol. 1., pp. 143-146.
- [3] Cain, J. B., Clark Jr, G. C., and Geist, J. M.(1979), "Punctured convolutional codes of rate (n-1)/n and simplified maximum likelihood decoding.", IEEE Trans. Inform. Theory, Vol. IT-25, No. 1, pp. 97-100.
- [4] Haccoun, D. and Begin, G.(1989), "High-rate punctured convolutional codes for Viterbi and sequential decoding.", IEEE Trans. Communication, Vol. 37, No. 11, pp. 1113-1125.
- [5] Kilfoyle, D. B., and Baggeroer, A. B.(2000), "The state of the art in underwater acoustic telemetry." IEEE J. Oceanic Eng. Vol. 25, pp. 4-27.
- [6] Salz, J.(1973), "Optimum Mean-Square Decision Feedback Equalization.", Bell System Technical Journal Vol. 52, No. 8 pp. 1341-1373.
- [7] Stojanovic, M., Catipovic, J., and Proakis, J.(1994), "Phase coherent digital communications for underwater acoustic channels.", IEEE J. Ocean. Eng., Vol. 19, No. 1, pp. 100-111.
- [8] Tuchler, M., Ralf, K., and Andrew, C. S.(2002), "Turbo equalization: principles and new results.", IEEE Trans. Communications, Vol. 50, No. 5, pp. 754-767.
- [9] Walree, P. V.(2011), "Channel sounding for acoustic communications: techniques and shallow-water examples.", Norwegian Defence Research Establishment (FFI), Tech. Rep.

Received 7 March 2017
 Revised 3 August 2017
 Accepted 3 August 2017

