

수중 통신에서 전송률 향상을 위한 Faster Than Nyquist 전송기법 연구

백창욱¹ · 정지원^{2*}

Faster Than Nyquist Transmission Method for Throughput Improvement in Underwater Communication

Chang-uk Baek¹ · Ji-won Jung^{2*}

¹Department of Radio Communication Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

^{2*}Department of Radio Communication Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 49112, Korea

요 약

수중에서의 통신은 해수면 및 해저면 등에 의한 신호의 반사를 통해 다중경로 현상이 나타난다. 이러한 다중경로의 영향으로 신호는 왜곡되고 원할한 수신을 방해받게 된다. 또한, 수중 통신은 제한된 주파수를 사용하고 다중 경로로 인한 심볼 내 간섭으로 전송률이 매우 낮고 성능이 저하된다. 따라서 본 논문에서는 수중통신 환경에서 전송률 향상 및 성능 향상을 위해 터보 등화 기법 기반의 Faster Than Nyquist 전송방식을 고려한다. 무선 통신에서 전송률 향상을 위해 적용되고 있는 Nyquist 속도보다 빠르게 전송하는 Faster Than Nyquist 기법에 대해 다중 간섭이 존재하는 수중 환경에서 효율적인 복호 모델을 제시하고 기존의 전송률 향상에 고려되는 천공 부호화 방식과 실제 호수 실험을 통하여 성능을 비교 분석하였으며, 적용 가능성 및 효율성을 확인하였다.

ABSTRACT

Underwater communication has multipath error because of reflection by sea-level and sea-bottom. The multipath of underwater channel causes signal distortion and error floor. The excessive multipath encountered in underwater communication channel creates inter symbol interference, which is a limiting factor to achieve a high data rate and bit error rate performance. Therefore, to increase throughput efficiency and improve performance, this paper consider FTN (Faster-than-Nyquist) signalling based on turbo equalization. FTN signalling is a technique of transmitting information at a rate higher than the allowed Nyquist limit. This paper presented efficient decoder structure of FTN transmission in the environment of multipath underwater channel and we compare the performance between FTN method and conventional punctured method in lake experimentation. As a results of lake experiment, we confirmed FTN method based on turbo equalization is applicable and efficiency in underwater communication.

키워드 : 수중 통신, 다중 채널, 심볼 내 간섭, Faster Than Nyquist, 천공부호

Key word : Underwater communication, Multipath, Inter symbol interference, Faster Than Nyquist, Punctured codes

Received 20 April 2016, Revised 20 April 2016, Accepted 21 April 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/jkice.2016.20.9.1688>

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/licenses/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

수중에서 전파는 급격한 감쇠특성을 갖기 때문에 수중에서의 무선통신에는 음파를 이용하게 된다. 음향 채널의 경우 전달 과정에서 잔향 및 다중경로 등에 의해 크게 왜곡되며, 수중에서 고속 데이터 전송을 위하여 수중 음향 통신 채널 특성을 결정하는 해면, 해저, 수심 등의 시공간 변화에 의한 다중경로 특성이나 도플러 확산이 시스템 설계에 고려되어야 한다. 이러한 음향 채널 특성의 시공간적인 변화는 디지털 수중음향통신에서 심볼 내 간섭(ISI : Inter Symbol Interference)을 야기하여 통신 시스템의 성능을 저하시키게 되며, 음파 통신의 단점인 낮은 대역폭으로 인해 전송률을 증가시킬 수 없다[1, 2]. 전송률을 향상시키는 방법은 여러 가지가 있으나 가장 기본적으로 고차변조 방식의 적용을 들 수 있다. 하지만 고차 변조 방식은 수중 음향 통신에서 정상도의 간격이 좁아져 만족할 만한 성능이 나타나지 않아[3] 본 논문에서는 배제하였다. 또 다른 방안으로는 다수의 송신 센서와 수신 센서를 이용하여 다이버시티 효과를 만족하면서 전송률을 송신 센서의 수 만큼 향상시키는 MIMO (Multiple Input Multiple Output) 통신[4]을 들 수 있으나, 지상과는 달리 수중에서는 다중 경로로 인한 심볼 내 간섭과 각각의 송신 센서에서 전송되는 신호의 간섭으로 인해 정확한 송신 신호를 구하기 어려워 계층적 시공간 부호화 기법을 이용하여 MIMO 시스템을 구성하였으나, 전송률 향상 및 성능이 일반적인 SISO (Single Input Single Output) 통신 보다 열악하다[5]. 이러한 이유로 수중 통신에서는 전송률을 향상시키기 위해 고 부호화율 기법을 적용하여 보내고자 하는 데이터의 전송률을 증가시키는데, 컨볼루션 부호의 부호화율인 1/2을 모 부호화율로 하여 이를 천공시켜 부호화율을 증가하는 천공 부호화 기법을 주로 적용하고 있다[6]. 천공 부호화 기법은 전송되는 신호의 특정한 위치에 데이터를 전송하지 않고 수신측에는 전송되지 않은 특정한 위치에 "0"을 삽입하는 역 천공화(de-puncturing) 과정을 이용하여 복호한다. 비교적 구현이 용이하고 성능이 고차변조 방식이나 MIMO 통신 보다 우수하여 널리 적용되고 있다. 그러나 수신부에서 반복기반의 터보 등화기 구성 시 역 천공 과정 및 천공 과정이 필요하여 이에 대한 복잡도를 줄이는 방안이 필요하다. 따라서 본 논문에서 전송률을 향상시키기 위

해 수중 통신에 적용하는 기법은 무선 통신에서 전송률을 향상시키기 위해 위성이나 지상파 방송 등에서의 표준안인 DVB-S3 (Digital Video Broadcasting - Satellite 3)에서 제안된 FTN (Faster Than Nyquist) 기법으로 이는 $1/T$ bits/s를 전송하였을 때 이를 최적으로 수신하기 위해 $1/2T$ Hz의 기저대역 대역폭이 요구되는 Nyquist 판별법의 한계를 넘어, 동일한 대역폭에서 Nyquist 속도보다 더 빠른 속도로 전송하여 전송효율을 증대시키는 기술로 무선 통신에서는 각광을 받으며 최근에 동일 대역폭에서 Nyquist 속도 기반의 전송 대비 전송률이 30~100% 까지 향상될 수 있음을 제시하고 있다[7, 8]. 이는 기존 모델의 송신부에서만 FTN 처리 과정을 첨가하여 별다른 하드웨어의 비용이 들지 않는 반면 수중에서는 다중 경로로 인한 간섭과 FTN 기법 적용으로 인한 심볼 내 간섭이 첨가되어 성능이 열악할 것으로 예상되어 이의 적용에 관한 논문은 저조한 실정이다. 이에 본 논문에서는 다중 경로 환경에서 원활한 통신과 함께 수신 신호의 성능을 향상시키면서 전송률 향상을 가져올 수 있는 효율적인 복호 모델을 제시하고 경북 문경시 경천호에서 실제 수중 실험을 통하여 천공 부호화 방식과 성능을 비교 분석하였으며, 적용가능성을 확인하였다.

II. 전송률 향상을 위한 신호처리 기법

2.1. 천공 부호화 기법

수중 통신에서 고전송률을 위해 적용되는 방식으로 천공 부호화 기법이 있다. 천공 부호화기법은 구속장수 7을 가지며 생성다항식이 $G_1=171$, $G_2=133$ 을 가지는 (2,1,7) 컨볼루션 부호의 부호화율을 모 부호화율로 정하고 컨볼루션 부호의 출력 비트 일부를 삭제하는 기법이다[9, 10]. 즉, 천공 패턴에 따른 제한된 수의 부호화된 비트들만을 사용한다. 부호화율 1/2을 기반으로 부호화율 2/3는 식 (1)과 같으며, 부호화율 3/4은 식 (2)와 같다.

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

$$P_{3/4} = \begin{bmatrix} 1 & 1 & 0 \\ 1 & 0 & 1 \end{bmatrix}. \quad (2)$$

예를 들어 모 부호화율 1/2인 경우에는 입력 비트가 1비트 일 때 부호화 비트가 2비트 출력을 의미하는데 식 (1)의 천공 패턴에서 “1” 은 전송함을 의미하고, “0” 은 전송하지 않고 삭제함을 의미한다. 천공 패턴에서 “0” 에 해당하는 비트를 삭제함으로써 데이터를 전송할 때 삭제된 비트로 인해 전송률이 증가하게 된다. 그러므로 입력 비트가 2비트 일 때 3비트가 출력됨을 알 수 있어 부호화율 2/3를 생성한다. 부호화율이 3/4 인 경우에는 식 (2)와 같이 천공 패턴을 가지고 있으며, “0” 의 패턴을 많이 가지고 있으므로 성능은 다소 열악하나 전송효율은 높다. 예를 들어 부호화율 1/2 인 경우 150비트가 입력되어 300비트가 부호화 되어 출력되거나 부호화율 2/3인 경우에는 200 비트 까지 입력 가능하며, 부호화율 3/4 인 경우에는 225 비트 까지 부호화 되어 입력이 가능하기 때문에 전송 효율 향상을 가져올 수 있다. 그러나 천공 패턴에서 삭제되는 비트가 많기 때문에 부호화율이 높을수록 성능은 열화 된다.

2.2. FTN 신호 처리 기법

본 논문에서 적용하고자 하는 FTN 전송 방법은 주파수 대역에 의해 주어지는 Nyquist 속도보다 빠르게 신호를 전송하는 방법이다[7, 8]. 예로, 일정 시간동안 Nyquist 속도에 따라 전송하면 10000개의 데이터를 전송한다고 가정 했을 때, FTN 방식을 사용하여 50%로 축소하면 동일한 시간동안 20000개의 데이터를 전송할 수 있다. 그로 인해 필연적으로 ISI가 발생하게 된다. 간섭된 신호의 전송신호 $s(t)$ 는 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$s(t) = \sqrt{E_s} \sum_n a_n h(t - n\tau T), \tau < 1. \quad (3)$$

여기서 a_n 은 n 시점에서 부호화된 비트열을 나타내며, $h(t - n\tau T)$ 는 저대역 필터 응답을 나타낸다. τ 는 FTN으로 인해 Nyquist 속도 보다 얼마큼 빠르게 보내는지에 대한 간섭 시점을 나타낸다. 예를 들어 τ 가 1일 때는 기존의 Nyquist 속도와 동일하게 전송 하는 것을 의미하며, 이의 간섭비율은 0%이다. 간섭 비율 τ' 은 식 (4)와 같이 나타 낼 수 있다.

$$\tau'(\%) = 100 \times (1 - \tau). \quad (4)$$

간섭비율을 다르게 정의하면 τ' 만큼의 전송률 향상을 의미한다. 주기 T 에 할당된 샘플수 N_s 에서 간섭되는 샘플수 τ_{N_s} 는 간섭비율 τ' 과의 관계는 식 (5)와 같다.

$$\tau_{N_s} = \{N_s - (N_s \times \tau' / 100)\}. \quad (5)$$

FTN 전송 신호에 대한 수신신호는 아래 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$y(n\tau T) = \sum_k a_k p((n-k)\tau T) + n'(n\tau T) \quad (6)$$

$p((n-k)\tau T)$ 는 수신신호 $n\tau$ 시점에서의 정합필터 값을 나타내며, $n'(n\tau T)$ 는 $n\tau$ 시점에서의 잡음을 나타낸다. 이러한 간섭 및 잡음으로 왜곡된 신호는 오류정정 부호화 방식을 적용하여 보상할 수 있으나 한계가 있다.

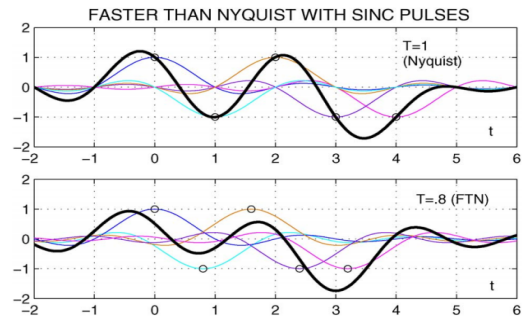


Fig. 1 FTN signal for τ

그림 1 [1, 2] 에서 $\tau = 1$ 인 경우에는 Nyquist 속도에 따라 전송되므로 ISI가 생기지 않는 것을 알 수 있다. 그러나 $\tau = 0.8$ 인 경우에는 FTN으로 인해 인접 심볼들이 서로 영향을 주어 데이터의 결정 시점 마다 원으로 표시된 부분이 원 데이터에 첨가 되게 되어 데이터에 영향을 주므로 간섭으로 인한 파형의 변화가 있음을 알 수 있다. ISI로 인해 신호의 파형이 왜곡 되지만 이를 해결할 수 있다면 동일한 시간에 20%의 전송률을 향상시킬 수 있음을 알 수 있다. 그러나 이러한 FTN 전송 기법을 수중 통신으로 적용하는 시도는 하지 못하는 실정이다. 왜냐하면 수중 환경에서도 다중 경로로 인한 심볼 내 간섭이 발생하며, FTN으로 인한 간섭이 더해져 수신

된 신호는 많은 왜곡을 가지는 신호이기 때문에 만족하는 성능을 요구할 수 없다. 이러한 ISI로 인한 왜곡된 신호를 복호 할 수 있는 효율적인 복호 모델이 중요하며, 이는 3.2절에서 제시한다.

III. 수중통신에서의 FTN 전송기법 복호 모델

3.1. 기존의 천공 기법 복호 모델

본 논문의 2.1절에서 언급한 구속장 수가 7인 컨볼루션 부호화기를 기반으로 부호화율 2/3, 3/4의 천공 패턴을 사용한다.

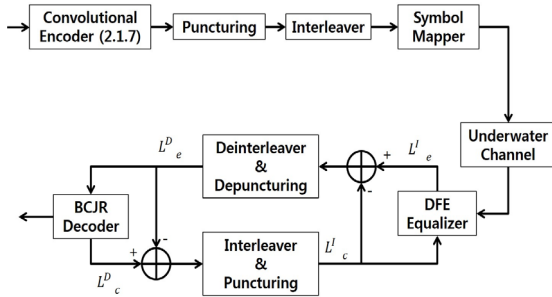


Fig. 2 Turbo equalization model for puncturing code

그림 2는 천공 부호를 적용한 터보 등화기의 송수신 구조이다. 전송 효율 향상은 컨볼루션 부호의 출력 비트 일부를 삭제하는 천공 부호를 사용함으로써 얻어진다. 즉, 천공 패턴에 따른 제한된 수의 부호화된 비트들만을 사용한다. 부호화기의 출력을 천공시켜 출력된 블록 크기에 따라 인터리빙 시킨 후 위상 변조시켜 수중 채널로 전송한다. 수신부의 기본적인 흐름은 반복을 위해 SOVA(Soft Output of Viterbi Algorithm)기반의 BCJR 알고리즘을 이용하여 (2,1,7) 컨볼루션 부호의 출력을 복호하며[11], 이를 결정 궤환 등화기(DFE : Decision Feedback Equalizer)와 연결한 터보 등화기 복호 모델로 구성하였다. 등화기와 복호기는 인터리버, 디인터리버를 통해 연결되어 서로의 정보를 반복해서 갱신한다[12, 13]. 디인터리버는 인터리버의 역 과정을 거쳐 송신신호를 복원한다. 복호기에서 출력한 피드백 정보는 다시 인터리빙 과정을 거쳐 정정된 신호를 등화기에 재입력한다. 천공 부호를 통해 터보 등화기 복호를 함에 있어 입-출력 값의 길이를 맞추주기 위해 터보

등화기 내부에 천공 부호화 과정 및 역 천공 부호화 과정을 추가하여 반복을 진행하게 된다.

3.2. 수중통신에서 FTN 적용 시 복호 모델

FTN 전송 기법 적용 시 복호 모델은 그림 3과 같다. 이는 그림 2와 동일한 구조를 가지며, 차이점은 송신단에 FTN Mapper를 추가하여 τ' 만큼의 Nyquist 속도보다 빠르게 하여 수중채널로 전송된다. 그러므로 적절한 τ 값을 적용하고, 이에 따른 ISI를 수중 다중 경로 채널에 의한 ISI에 추가된 ISI로 생각하여 결정 궤환 등화기를 이용하여 전체적인 ISI를 보상한다.

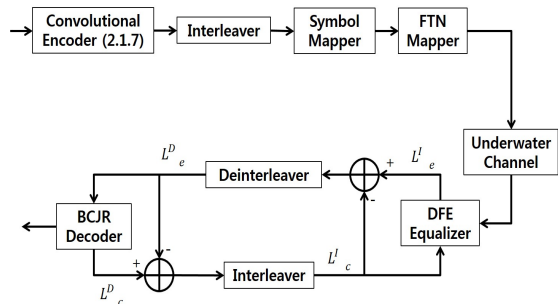


Fig. 3 Turbo equalization model for FTN.

데이터는 (2,1,7) 컨볼루션 부호화기를 거친 뒤 인터리버, 심볼 매핑 후 변조기를 통과한다. 전송된 심볼은 채널을 통과한다. 수신단의 터보 등화기는 등화기와 복호기로 구성되어 있으며, 기저대역으로 변환한 후 L_c^I 는 결정 궤환 등화기의 출력 값으로 수신 신호로부터 등화기에서 추정된 extrinsic 값이다. $y[k]$ 를 k 시점에서의 등화기 입력 값이라 하면, 등화기의 출력은 다음 식 (7)과 같이 정의할 수 있다.

$$L_c^I[k] = \sum_{i=0}^{N_c-1} c_i[k]y[k-i] - \sum_{i=1}^{N_c} b_i[k]\widehat{L}_c^I[k-i] \quad (7)$$

$c_j[k]$, $b_i[k]$ 는 k 시점에서의 포워드 및 백워드 탭 계수이며, $\widehat{L}_c^I[k]$ 는 성상도 상에서 $L_c^I[k]$ 에 가장 가까운 점들인 slicer 출력 값이다 [14]. 결정 궤환 등화기의 출력으로부터 추정된 $L_c^I[k]$ 와 slicer 출력 값인 $\widehat{L}_c^I[k]$ 의 오차를 이용하여 피드백을 통하여 결정 궤환 등화기의 출력 오차를 줄이는 계수 값인 $c_i[k+1]$, $b_j[k+1]$ 을 갱신하

기 위하여 사용된다. 외부정보 값 L_c^D 는 복호기의 출력 값으로써 사후 확률 값을 계산하여 0 또는 1의 오류 값을 보정할 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 업데이트 하는 오류 보정 값이 송신하고자 하는 원 신호에 가깝게 되어 성능이 향상된다.

그림 2와 그림 3을 비교하면 복잡도 측면에서는 천공 과정과 역천공 과정이 필요치 않는 FTN 전송 기법이 하드웨어 측면에서 이점이 있다.

IV. 수중 통신 실험 환경 및 결과

그림 4와 같은 환경에서 실제 수중 실험을 수행하였다. 송신기로는 ITC 1001을 사용하였고 수신기로는 B&K 8106을 사용하였다.

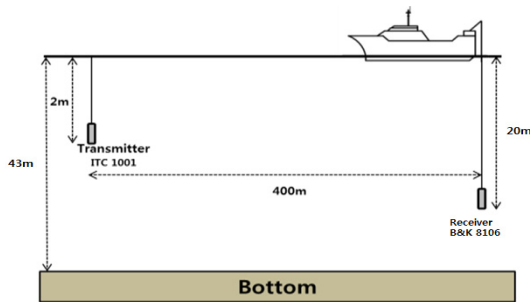


Fig. 4 Environment of oceanic experiment.

실험은 경북 문경시 경천호에서 2015년 5월 수행되었다. 수면상태는 바람에 의한 파도가 있었으며 송수신기 사이의 거리는 최대 400m로 하였다. 반송파 주파수와 샘플링 주파수는 각각 16 kHz 및 192 kHz로 하였으며, 전송률은 1 Kbps로 하였다.

그림 5는 실험 해역에서 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. 그림 5는 송수신된 LFM 신호의 상관관계를 이용하여 모델링 한 것으로 다중경로에 따른 영향을 받는 것을 확인

할 수 있다.

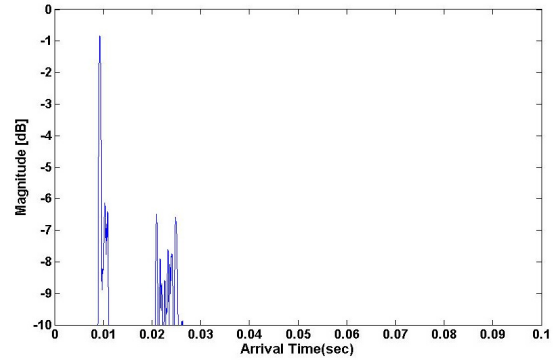


Fig. 5 Delay profile in the distance of 400m.

그림 6은 실제 실험에서 송신한 신호와 최종적으로 수신된 신호의 형태를 나타낸다.

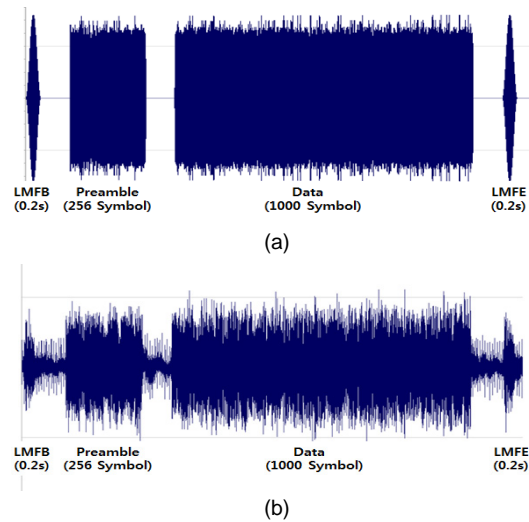


Fig. 6 Waveform (a)Transmitted signal (b)Received signal

그림 6 - (a)의 송신 신호는 신호의 시작을 알기 위한 0.2초의 LFMB(Linear Frequency Modulation Begin) 신호와 사일런스 구간을 둔 뒤 수신되는 신호의 정확한 동기 획득과, 결정 궤환 등화기에서 다중 경로를 추정하기 위한 256 심볼의 preamble 데이터, 그리고 데이터 패킷과 신호의 끝을 알리는 LFME (Linear Frequency Modulation End) 신호로 구성되어져 있고, 이러한 구조가 10회 반복되어 하나의 송신 신호를 구성하였다. 또

한, 수신된 신호를 바탕으로 성능을 분석할 때 데이터의 평균값으로 그 결과를 나타내었다.

그림 7은 수중 실험을 통해 BCJR 알고리즘을 이용한 터보 등화기를 통과한 후의 정상도이다. 등화기는 LMS (Least Mean Squares) 알고리즘 기반의 결정 궤환 등화기를 이용하여 시간에 따라 변화하는 채널의 전달특성을 보상하였다. 결정 궤환 등화기에서 사용된 피드 포워드 및 피드 백워드 탭 수는 각각 2탭으로 고정하였고, 결정 궤환 등화기의 μ 값은 0.009를 사용하였다.

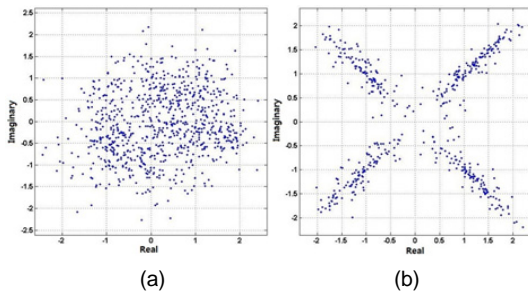


Fig. 7 Constellation (a)Received signal (b)Equalized signal

그림 7 - (a)를 보면, 수신된 신호의 정상도는 QPSK (Quadrature Phase Shift Keying) 정상점에 모이지 않고, 알아볼 수도 없을 정도로 넓게 퍼져있는 것을 알 수 있다. 하지만 그림 7 - (b)에서처럼 다중 경로에 의한 인접 심볼 간의 간섭과 백색 가우시안 잡음을 보상함에 따라 정상도는 QPSK 정상점으로 데이터가 모이는 것을 알 수 있다.

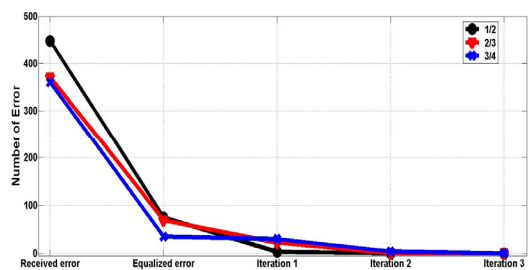


Fig. 8 Number of errors according to punctured codes

그림 8은 천공 부호 기법의 성능 분석 그래프를 나타낸다. 그림 8의 성능에 따르면 수신된 신호의 수중 채널의 시변 특성에 의해 각 부호화별로 수신 신호의 오류는 차이가 나타났다. 먼저 천공 부호를 사용하지 않은

(2,1,7) 컨볼루션 부호의 부호화율 1/2인 경우 수신된 신호는 1000 bit 중 448 bit의 오류가 발생하였고, 등화기를 통해 다중경로에 의한 ISI를 보상하면 75 bit, 그리고 반복 복호를 1회 수행하면 3 bit, 2회 수행 할 때 error free가 됨을 알 수 있었다. 다음으로 부호화율 2/3의 천공 부호 방식을 적용하였을 경우, 수신된 신호는 371 bit, 등화기를 통과 한 후 69 bit, 반복 복호를 1회수행하면 22 bit, 1/2과 마찬가지로 반복 복호를 2회 수행하였을 때 error free가 됨을 알 수 있었다. 마지막으로 부호화율 3/4에 해당하는 천공 부호 방식을 적용하였을 경우, 수신된 신호는 360 bit, 등화기를 통과 후 35 bit, 반복 복호 1회에 30 bit, 반복 복호 2회에 4bit, 그리고 반복 복호를 3회 수행하였을 때 error free가 됨을 알 수 있었다.

또한 수중 통신에 FTN 기법을 적용하였을 때, τ 값으로 10%와 30%을 선택하여 실험을 진행하였다. 이때, τ 값이 30% 일 때는 부호화율 2/3, 3/4의 천공 기법을 적용하였을 경우와 유사한 전송률을 가지게 되므로 실제 실험을 통한 성능을 비교 분석한다. 그림 9는 수중 통신 환경에서 FTN 신호 처리 기법을 사용한 시스템의 성능 그래프를 나타낸다.

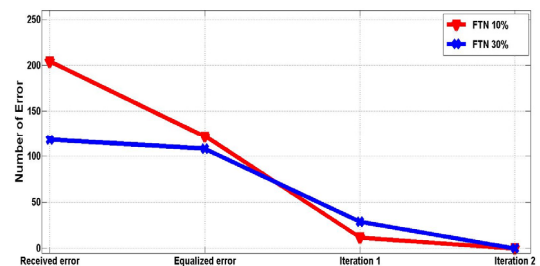


Fig. 9 Number of errors according to FTN method

먼저 $\tau = 10\%$ 인 FTN 기법을 적용하였을 경우, 수신된 신호는 1000 bit 중 204 bit의 오류가 발생하였고, 등화기를 통해 다중경로에 의한 ISI를 보상하면 122 bit, 그리고 iteration 1회에 12 bit, iteration 2회에 error free가 됨을 알 수 있었다. 그리고 $\tau = 30\%$ 인 FTN 기법을 적용하였을 경우, 수신된 신호는 1000 bit 중 118 bit의 오류가 발생하였고, 등화기를 통해 다중경로에 의한 ISI를 보상하면 108 bit, 그리고 iteration에는 29 bit, iteration 2회에 error free가 됨을 알 수 있었다. 이 같은

결과는 FTN 신호처리 기법 또한 고 전송률을 요구하는 수중 통신에 매우 효과적으로 작용함을 알 수 있다.

표 1은 두 가지 방식에 대한 성능 비교 분석표이다. 표 1에서의 전송률 향상도는 기본이 되는 부호화율 1/2의 컨볼루션 부호를 사용하는 신호가 0%로 가정했을 때 상대적인 전송률 향상도를 나타낸다.

표 1에서 수신 오류 개수는 FTN 처리 기법이 적으며, 이는 FTN 처리 기법으로 인해 간섭량이 발생하였지만 등화기에서 효율적으로 보상이 되었음을 의미한다. 수중 채널이 시변하기 때문에 수신 신호에 발생한 오류의 양이 달라서 완벽한 비교는 할 수 없지만, 성능적인 측면에서 천공 부호화 과정의 적용 보다 반복 1회에 모두 오류를 정정하는 FTN 전송 기법 적용이 약간 우수함을 알 수 있으며, 복잡도 측면에서도 수신부에 천공 및 역 천공 과정이 필요 없는 FTN 전송 기법 적용이 복잡도 측면에서 약간 우수함을 알 수 있다. 따라서 향후 수중 통신에서 FTN 전송 기법을 유용하게 사용할 수 있으리라 사료된다.

따라서 향후 수중 통신에서 FTN 전송 기법을 유용하게 사용할 수 있으리라 사료된다.

주로 적용되고 있다. 그러나 최근 Nyquist 속도 보다 빠르게 전송하는 FTN 기법이 지상 무선 통신에서 각종 표준안 등으로 제시될 만큼 각광을 받고 있는 반면 수중에서는 FTN의 인접 채널 간섭과 수중에서의 다중 채널 간섭이 혼합되어 만족할 만한 성능이 제시되지 않아 연구가 미비한 실정이다. 따라서 본 논문에서는 효율적인 터보 등화 모델을 기반으로 한 FTN 전송 기법을 수중 통신에 적용하여 수중환경 실험을 통해 성능을 제시하였으며, 기존의 천공 부호화 기법과 성능을 비교하였다. 수중 채널이 시변하기 때문에 수신 신호에 발생한 오류의 양이 달라서 완벽한 비교는 할 수 없지만, 성능적인 측면에서 천공 부호화 과정의 적용 보다 반복 1회에 모든 오류를 정정하는 FTN 전송 기법의 적용이 약간 우수함을 알 수 있으며, 복잡도 측면에서도 수신부에 천공 및 역 천공 과정이 필요 없는 FTN 전송 기법 적용이 약간 더 우수함을 알 수 있다. 따라서 향후 수중 통신에서 FTN 전송 기법을 유용하게 사용할 수 있으리라 사료되며, FTN 기법과 천공 부호를 결합하여, 전송 효율을 더욱 향상 시킬 수 있을 것으로 기대된다.

Table. 1 The number of errors for puncturing code and FTN signal

	1/2	FTN $\tau' = 10\%$	2/3	FTN $\tau' = 30\%$	3/4
Improve of rate	0%	10%	25%	30%	33%
Received error	448	204	371	118	360
First iteration error	3	12	22	29	30
Second iteration error	0	0	0	0	4
Third iteration error	0	0	0	0	0

V. 결 론

수중 음향 통신에서 전송률을 향상시키기 위해 고차 변조 방식, MIMO 통신, 고 부호화율 기법 등이 연구되고 있으며, 이중 컨볼루션 부호의 부호화율인 1/2을 모 부호화율로 하여 이를 천공시켜 부호화율을 증가하는 천공 부호화 기법이 성능 및 복잡도 측면에서 유리 하여

ACKNOWLEDGMENTS

This research was supported by Basic Science Research Program through the National Research Foundation of Korea (NRF) funded by the Ministry of Education (NRF - 2015R1D1A1A01060931).

REFERENCES

- [1] M. Stojanovic, J. A. Catipovic and J. G. Proakis, "Phase-coherent digital communications for underwater acoustic channels," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 19, no.1, pp. 100-111, Jan. 1994.
- [2] D. B. Kilfoyle and A. B. Baggeroer, "The state of the art in underwater acoustic telemetry," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 25, no.1, pp. 4-27, Jan. 2000.
- [3] J. T. Bae, M. H. Kim, S. S. Choi, J. W. Jung, S. Y. Chun, and K. C. Dho, "The analysis about channel code

- performance of underwater channel,” *J. Acoust. Soc. Kr.*, vol. 27, no.6, pp. 286-295, 2008.
- [4] G. J. Foschini and M. J. Gans, “On Limits of Wireless Communication in a Fading Environment when Using Multiple Antennas,” *Wireless Personal Commun.*, vol. 6, no.3, pp. 311-335, Mar. 1998.
- [5] T. D. Park, M. H. Kim, B. S. Lim, and J. W. Jung, “Performance Analysis of Underwater Communication Channel Using LDPC Codes in the MISO Channel,” *J. KICS*, vol. 36, no. 7B, pp. 878-885, 2011.
- [6] B. Li, S. Zhou, M. Stojanovic, L. Freitag, and P. Willett, “Multicarrier communication over underwater acoustic channels with nonuniform doppler shifts,” *IEEE J. Ocean. Eng.*, vol. 33, no. 2, pp. 198-209, June 2008.
- [7] A. D. Liveris and C. N. Georghiadis, “Exploiting faster-than-Nyquist signaling,” *IEEE Trans. Commun.*, vol. 51, no. 9, pp. 1502-1511, Sep. 2003.
- [8] F. Rusek and J. B. Anderson, “Multistream Faster than Nyquist Signaling,” *IEEE Trans. Communication*, vol. 57, no. 5, pp. 1329-1340, May 2009.
- [9] J. B. Cain, G. C. Clark Jr. and J. M. Geist, “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, Jan. 1979.
- [10] D. Haccoun and G. Begin, “High-rate punctured convolutional codes for Viterbi and sequential decoding,” *IEEE Trans. Communication*, vol. 37, no. 11, pp. 1113-1125, Nov. 1989.
- [11] J. B. Anderson, A. Prlja and F. Rusek, “New reduced state space BCJR algorithms for the ISI channel,” in *Proc. 2009 IEEE Int. Symp. Inform. Theory*, Seoul, Korea, pp. 889-893, 2009.
- [12] M. Tuchler, R. Koetter, and A. C. Singer, “Turbo equalization: Principles and new results,” *IEEE Trans. Communication*, vol. 50, no. 5, pp. 754-767, May 2002.
- [13] R. Koetter, A. C. Singer, and M. Tuechler, “Turbo equalization,” *IEEE Signal Process. Mag.*, vol. 21, no. 1, pp. 67-80, Jan. 2004.
- [14] K. Berberdis, T. Rontogiannis, and S. Theodoridis, “Efficient block implementation of the LMS based DFE,” in *Proc. 13th Digital Signal Processing Int. Conf.*, Santorini, Greece, pp. 143-146, 1997.



백창욱(Chang-Uk Baek)

2012년 2월 한국해양대학교 전자공학과(공학사)
 2014년 2월 (주)KTE 기술연구소 연구원
 2016년 2월 한국해양대학교 전자공학과(공학석사)
 2016년 3월 ~ 현재 한국해양대학교 전자공학과 박사과정
 ※ 관심분야 : 위성통신, 이동통신, 수중 통신, 변 · 복조 기술, 채널코딩, FPGA 기술 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 한국전자통신연구원 초빙연구원
 1996년 9월 ~ 현재 한국해양대학교 전자공학과 정교수
 2001년 8월 ~ 2002년 8월 캐나다 NSERC Fellowship (Communication Research Center 근무)
 ※ 관심분야 : 위성통신, 이동통신, 수중통신, 변 · 복조 기술, 채널코딩, FPGA 기술 등