

터보 부호 기반의 터보 등화기 실험 성능 분석

박건웅¹ · 정지원^{2*}

Experiment performance analysis of turbo code based turbo equalizer

Gun-woong Park¹ · Ji-won Jung^{2*}

¹Department of Radio Communication Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 606-791, Korea

^{2*}Department of Radio Communication Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Busan 606-791, Korea

요 약

본 논문에서는 성능을 향상시키기 위해 터보부호화기를 이용한 터보등화기법의 성능을 수중 실험의 데이터를 이용하여 분석하였다. 다중 경로전달로 인해 왜곡된 데이터를 보상하기 위해 LMS-DFE 등화기와 터보 채널 부호기를 연결하여 서로간의 반복적인 연산을 통하여 성능을 개선하는 반복 기반의 터보 등화기 구조를 적용하였다. 문경시 경천호에서의 실제 수중 실험을 통하여 터보부호 기반의 터보등화기의 오류확률이 93%를 나타내었다.

ABSTRACT

In this paper, We analyzed the performance of turbo equalizer using turbo codes through the under water experiment. To compensate the distorted signal induced by multipath effect, we apply the iterative turbo codes that iteratively exchange probabilistic information between LMS-DFE and turbo decoder, thereby reducing the error rates significantly. We showed the successful of turbo decoding of iterative turbo equalizer is 93%.

키워드 : 터보 부호, 터보 등화기, 수중통신

Key word : Turbo code, Turbo Equalization, Underwater communication

Received 04 April 2015, Revised 16 April 2015, Accepted 30 April 2015

* Corresponding Author Ji-won Jung(E-mail:jwjung@kmou.ac.kr, Tel:+82-42-520-5123)

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

Open Access <http://dx.doi.org/10.6109/jkiice.2015.19.7.1525>

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 통신은 음파를 이용하여 통신을 하게 된다[1]. 음향채널의 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 다중 경로 특성이나 도플러 확산이 시스템의 설계에 고려되어야 한다. 특히 천해에서의 다중경로는 해면의 시변 산란에 의해 도플러 확산파가 직접파에 혼입되어 통신 채널의 특성을 좌우하게 된다[2]. 이러한 음향 채널 특성의 시공간적인 변화는 디지털 수중음향 통신에서 송신하는 심벌간의 상호간섭(Inter-Symbol Interference : ISI)을 야기하여 통신 시스템의 성능을 저하시키게 되며, 음파 통신의 저 대역폭으로 인한 데이터 전송효율을 감소시킨다.

따라서 현재 열악한 채널 환경을 극복하고 전송효율을 향상시키기 위하여 여러 가지 채널부호화 기술과 등화기 기법들이 함께 연구되고 있다. 이러한 수중통신 채널에서 성능을 향상시키기 위해서는 여러 부호화기 기법들이 제시되고 있다. 기존의 수중실험은 주로 컨벌루션 부호화 비터비 복호 방식에 기초를 하여 행해지고 있으며, 최근에는 반복구조의 적용이 활발히 진행 중이다. 반복부호중 본 논문에서는 작은 패킷사이즈, 등화기와의 결합용이성, 성능 관점에서 터보 부호화기를 선정하였다. 터보 부호화기와 함께 다중경로에 의한 효과를 해결하기 위한 터보 등화기법을 연결한 시스템을 제안하고 경북 문경시 경천호에서 실제 수중 실험을 통해 성능을 분석하였다.

II. 시스템 모델 요소 분석

수중에서도 다중 경로로 인한 심벌 간 간섭으로 인해 성능이 감소된다. 이러한 성능 감소를 보상해주는 채널 부호화 기법 중 본 논문에서는 반복기법의 터보부호화 기법을 적용하였다.

그림 1은 LMS-DFE 등화기와 터보 채널 부호기를 연결하여 서로간의 반복적인 연산을 통하여 성능을 개선하는 반복 기반의 터보 등화기 구조를 나타낸다.

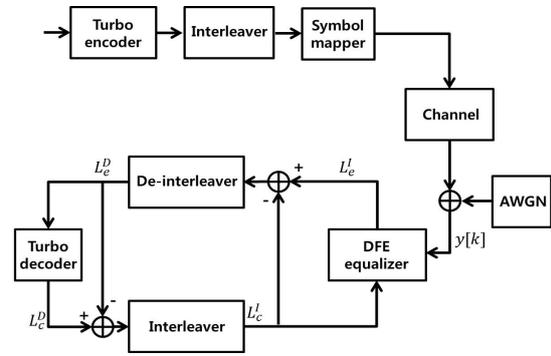


그림 1. 반복 기반의 터보 등화기 구조
Fig. 1 The structure of turbo equalizer based on iteration

데이터는 채널 부호화기를 거치고 난 뒤 인터리버, 심벌 매핑 후 변조기를 통과한다. 전송된 심벌은 채널을 통과한 후 백색 가우시안 잡음이 더해진다. 수신단의 터보 등화기는 등화기와 복호기로 구성되어 있으며, 등화기와 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 송신 신호를 복원한다. 복호기에서 출력한 피드백 정보는 다시 인터리빙 과정을 거쳐 정정된 신호를 등화기에 재 입력한다. 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 extrinsic 값이다. L_c^I 와 L_c^D 의 차를 역-인터리빙 하여 계산되어져 터보 Pi 복호기로 입력되어 진다. 터보 Pi 복호기에서 추정되어진 외부입력 값 L_c^D 은 식 (1)과 같이 구할 수 있다.

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

외부입력 값 L_c^D 는 터보 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 다시 인터리빙 하여 L_c^I 를 계산하여 LMS-DFE 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 BER 성능이 향상된다.

2.1. 터보 Pi 부호

기존의 DVB-RCS에서 표준으로 사용되는 터보 부호화기는 3개의 S_1, S_2, S_3 메모리를 가지며 8-상태로 구성 되어 있다. 이러한 DVB-RCS 기반 터보 부호화기[3, 4]는 오류 마루 현상이라는 단점을 가지고 있으며 다중 경로가 존재하는 수중통신에 있어 이는 치명적이다. 하지만 터보 Pi 부호화기[5]는 4개의 메모리를 가지며 16개의 상태를 이용하여 각각의 상태가 가지는 해밍거리 차이를 더 크게 만들어 오류 마루 현상을 제거하며 성능을 향상시킬 수 있는 구조이다. DVB-RCS 기반으로 한 RCS NG 터보 Pi 부호에서는 CRSC 부호를 사용한다. DVB-RCS의 Double binary 터보 부호를 기반으로 하는 터보 Pi 부호는 두 비트를 입력하고 세 비트를 출력하는 부호이며 CRSC의 구조는 그림 2와 같다.

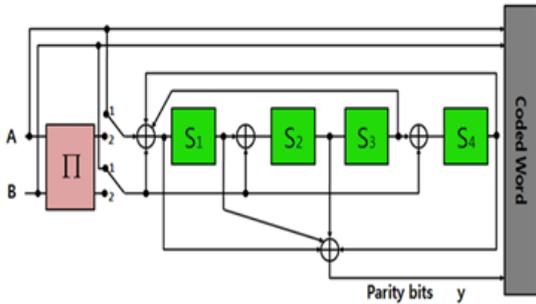


그림 2. CRSC의 구조
Fig. 2 The structure of CRSC

이 방법은 부호화를 할 때 마지막 시점에서 초기의 상태를 보상해줌으로써 트렐리스의 상태는 순환하고 복호할 때 어떤 곳에서든지 초기화 될 수 있다는 것이다. 위 방법을 적용한 circular 부호화 방식은 tail 비트를 첨가함으로써 감소되었던 spectral efficiency를 피할 수 있다. Circular states(Tail-biting) 원리를 좀 더 자세히 살펴보자면, Circular 부호화 방식은 부호화 마지막 단계에서 부호기의 초기 상태를 보상할 수 있고 그래서 circular trellis에 의해 데이터 부호화가 나타난다.

그림 3은 입력 비트(m)가 2개일 때의 DVB-RCS NG 터보 Pi 부호화기의 전체 구조를 나타낸다.

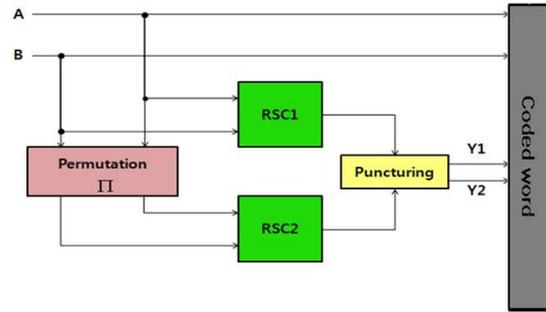


그림 3. RCS-NG 터보 Pi 인코더
Fig. 3 RCS-NG turbo Pi Encoder(m=2)

A, B에 비트가 입력되면, 그림 3의 CRSC 부호화기를 거쳐 출력된 비트를 permutation을 한 후 비트를 다시 CRSC 부호화 하여 각 부호화율에 적합하게 puncturing 한다. Permutation은 수신단에서 버스트 에러를 방지하고 error floor를 방지하기 위한 인터리버 효과를 나타낸다.

따라서 기존의 Turbo부호에서 발생하는 오류 마루 현상이 터보 Pi 부호에서는 개선됨과 동시에 해밍거리의 증가로 인하여 성능이 향상됨을 따라 수중 통신 환경에서의 효율적인 반복 기반의 채널 부호화 기법으로 터보 Pi 부호가 가장 적합하다.

2.2. LMS-DFE 등화기와 결합된 터보등화

$y[k]$ 를 k 시점에서의 등화기 입력 값이라 하면, 등화기의 출력은 다음 식 (2)과 같이 정의할 수 있다.

$$L_e^T[k] = \sum_{i=0}^{N_b-1} c_i[k]y[k-i] - \sum_{j=1}^{N_c} b_j[k]\widehat{L}_e^T[k-j] \quad (2)$$

$c_i[k](i=0,1,\dots,N_{c-1})$ 는 k 시점에서의 피드포워드 탭 계수이며 $\widehat{L}_e^T[k]$ 는 정상도 상에서 $L_e^T[k]$ 에 가장 가까운 점들인 slicer 출력 값이다. 일반적으로 결정 궤환 등화기에서 피드포워드와 피드백 계수들을 갱신하는 알고리즘은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} c_j[k+1] &= c_j[k] - \mu e_D[k]y[k-i], \\ b_j[k+1] &= b_j[k] + \mu e_D[k]\widehat{L}_e^T[k-i], \end{aligned} \quad (3)$$

μ 는 수렴상수이고 $e_D[k] = L_c^I[k] - \widehat{L}_c^I[k]$ 는 DD (Decision-directed) 오차로써 결정 궤환 등화기의 출력으로부터 추정되어진 $L_c^I[k]$ 와 slicer 출력 값인 $\widehat{L}_c^I[k]$ 의 오차를 이용하여 피드백을 통하여 결정 궤환 등화기의 출력 오차를 줄이는 계수 값인 $c_i[k+1], b_j[k+1]$ 를 갱신하기 위하여 사용된다. SAG(Stop And Go) 알고리즘을 사용하는 경우에 필터 탭 계수는 아래 식 (4)을 통해 갱신되며, 여기서 $f[k]$ 는 식 (5)와 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} c_j[k+1] &= c_j[k] - \mu f[k] e_D[k] y[k-i], \\ b_j[k+1] &= b_j[k] + \mu f[k] e_D[k] \widehat{L}_c^I[k-i], \end{aligned} \quad (4)$$

$$f[k] = \begin{cases} 1 & \text{if } \text{sgn}\{e_D[k]\} = \text{sgn}\{e_s[k]\} \\ 0 & \text{if } \text{sgn}\{e_D[k]\} \neq \text{sgn}\{e_s[k]\}, \end{cases} \quad (5)$$

$\text{sgn}\{\cdot\}$ 은 아래와 같이 정의되는 시그넘 함수이며, $e_s[k]$ 는 식 (7)과 같은 Sato 에러이다.

$$\text{sgn}\{x\} = \begin{cases} -1 & \text{when } x < 0 \\ 0 & \text{when } x = 0 \\ +1 & \text{when } x > 0, \end{cases} \quad (6)$$

$$e_s[k] = L_c^I[k] y[k] - \gamma \text{sgn}\{L_c^I[k]\} \quad (7)$$

여기서 γ 는 적절한 상수 값이다. L_c^D 값은 결정 궤환 등화기의 출력 값 L_c^I 와 L_c^I 의 차를 디인터리빙하여 계산되어져 반복 복호기로 입력되어 진다. 반복 복호기에서 추정되어진 extrinsic 값 L_c^D 은 식 (8)과 같이 구할 수 있다.

$$L_c^D = \log \frac{P(x=+1)}{P(x=-1)} \quad (8)$$

식 (8)의 결과식이 다시 식(2)의 $y[k]$ 와 더해져서 등화기로 입력된다.

III. 수중 실험 환경 및 패키지구조

송신기로는 Neptune 사의 D/17 모델을 사용하였고, 수신기로는 B&K 8106을 사용하였다. 실험은 경북 문경시 경천호에서 수행 되었다. 실험 시기는 2014년 3월 초로 수면 상태는 약 초속 3m/s의 바람에 의해 약한 물결이 일을 정도였으며 송수신기 사이의 거리는 약 400 m로 하였다. 그리고 송신기는 수면 아래 2 m, 수신기는 30 m 아래 위치하였다. 반송파 주파수와 샘플링 주파수는 각각 16 kHz 및 192 kHz로 하였으며, 비트당 샘플수를 192 개를 할당하였으므로 전송율은 1 kbps로 하였다.

표 1. 실험 파라미터

Table. 1 Experimental parameter

Chanel coding	Turbo pi	r=1/2, k=472, N=944, 16 state
modulation (QPSK)	Bit rate	1kbps
	f_c	16kHz
	f_s	192kHz
Distance	400m	
Depth	Tx : 30m Rx : 2m	

표 1을 바탕으로 한 실제 수중실험 모식도는 그림 4와 같다.

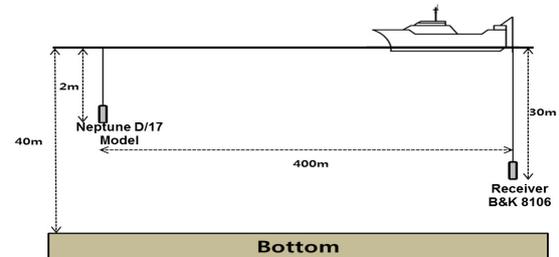


그림 4. 실험 환경

Fig. 4 The experimental environment

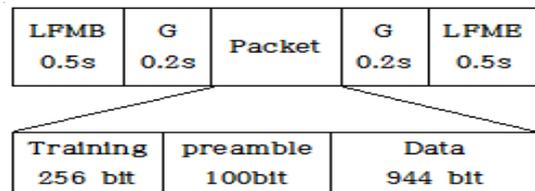


그림 5. 패키지 구조

Fig. 5 Packet structure

실험을 위한 패킷구조는 그림 5와 같다.

패킷의 총 시간은 2.7초이며 가장 먼저 0.2초 동안 신호의 전송 시작을 알기 위한 LFMB (Linear Frequency Modulation Begin) 신호를 보내고 0.5초 동안의 사일런스 구간을 둔 뒤, 전송 데이터 패킷, 다시 0.5초 동안의 사일런스 구간, 마지막으로 신호의 끝을 나타내는 0.2초 동안의 LFME (Linear Frequency Modulation End) 신호가 한 패킷으로 구성되어 있다.

IV. 실험 결과

표 2. Turbo 복호기 실험 결과
Table. 2 Experimental results of Turbo equalizer

Number of packet	LMS-DFE	TEQ	iteration
1	0.33×10^{-1}	0	1
2	0.14×10^{-1}	0	1
3	0.13×10^{-1}	0	1
4	1.01×10^{-1}	0	1
5	0.28×10^{-1}	0	1
6	0.15×10^{-1}	0	1
7	0.31×10^{-1}	0	1
8	5.01×10^{-1}	4.78×10^{-1}	3
9	0.23×10^{-1}	0	1
10	0.27×10^{-1}	0	1
11	0.27×10^{-1}	0	1
12	1.60×10^{-1}	0	3
13	0.03×10^{-1}	0	1
14	0.06×10^{-1}	0	1
15	0.95×10^{-1}	0	1
16	1.00×10^{-1}	0	1

일반적으로 반복부호의 경우 복호기 입력의 오류율이 10^{-1} 이하이면 복호기 출력은 오류가 정정됨을 알 수 있다[6].

본 논문에서는 그림 5와 같은 패킷 구조로 총 16번의 동일한 데이터를 반복으로 전송하였다. 표 2은 터보 Pi 부호기 기반의 터보 등화 기법의 성능이다. 터보 등화 복호 이전의 오류율은 LMS-DFE 출력 단계에서 오류를 측정하였으며, 일정한 반복횟수에서 각각의 부호화 방

식에 따른 오류율을 나타낸다. 총 16번의 실험 중 15번의 실험이 오류를 완벽히 정정함을 알 수 있으며 복호기의 입력단의 오류율이 10^{-1} 이하이면 모두 복호 가능함을 알 수 있다. 따라서 터보 Pi 부호 기반의 터보 등화기는 93%의 성공률을 나타내는 것으로 볼 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 수중통신에서 고려되어 지는 반복 기반의 채널 부호화 기법의 성능을 분석 하였다. 채널 부호로 터보 부호를 사용하여 반복적인 연산을 통하여 성능을 개선 할 수 있는 반복 기반의 터보 등화기 구조를 적용하였고 시변 채널에서 좋은 성능을 나타내는 LMS-DFE 등화기를 고려하였다. 그 결과 문경시 경천호에서의 실제 수중 실험에서 16번의 실험 중 15번의 실험에서 오류를 정정을 보였고 복호기의 입력단의 오류율이 10^{-1} 이하이면 모두 복호가 가능함을 보였으며 터보Pi 부호기 기반의 터보 등화기의 성능이 93%의 성공률을 나타냄을 알 수 있었다.

REFERENCES

- [1] M. Stojanovic, J. Catipovic, and J. Proakis, "Phase coherent digital communications for underwater acoustic channels," *IEEE J. Ocean. Eng.*, vol.19, no.1, pp.100-111, Jan. 1994.
- [2] R. J. Urick, "Principles of underwater sound 3d ed," McGraw-Hill, pp. 99-201, 1983.
- [3] C. Berrou, and A. Glavieux, "Near Optimum Error-Correcting Coding and Decoding : Turbo-Codes," *IEEE Trans. Communication*, vol. 44, no 10, pp.1261-1271, Oct. 1996.
- [4] European Telecommunications Standards Institute. "Digital Video Broadcasting Second generation framing structure for broadband satellite application," EN 302 307 V1.1.1, 2005.
- [5] C. Douillard, and C. Berrou, "Turbo Code With Rate-m/(m+1) Constituent Convolutional Codes," *IEEE Trans. Communication*, vol. 53, no 10, pp.1630-1638, Oct. 2005.
- [6] B. Sklar, *Digital Communications Fundamentals and Applications*, 2nd ed. New Jersey , Prentice Hall PTR, 2001.



박건웅(Gun-Woong Park)

2015년 2월 : 한국해양대학교 전파공학과 (공학사)
2015년 3월 ~ 현재 : 한국해양대학교 전파공학과 석사과정
※관심분야 : 위성통신, 이동통신, 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 전파공학과 정교수
2001년 8월 ~ 2002년 8월 : 캐나다 NSERC Fellowship (Communication Research Center 근무)
※관심분야 : 위성통신, 이동통신, 변 · 복조 기술, 채널코딩, FPGA 기술 등