

수중 통신 채널에서 오류정정부호 성능분석

김민혁* · 박태두* · 김남수* · 김철승* · 정지원* · 김성연**

*한국해양대학교 전파공학과 대학원, **한국해양대학교 산업기술연구소

The Performance of Channel Coding in Underwater Communication

Min-Hyuk Kim · Tae-Doo Park* · Nam-Soo Kim* · Chul-Seung Kim* · Ji-Won Jung*,
Seong-Yeon Kim***

**Division of Control and Instrumentation Engineering, National Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea*

***Research Institute of Industrial Technology, National Korea Maritime University, Busan 606-791, Korea*

요 약 : 수중에서의 통신은 해수면과 해저면 등에 의한 신호의 반사에 의해 발생한 다중경로 현상으로 신호가 왜곡되어 원활한 통신이 어렵다. 이에 본 논문에서는 다중경로에 의해 발생한 오류를 정정하고자, 지상의 통신시스템에서 적용되고 있는 여러 가지 채널 부호 방법을 모델링된 수중통신채널에 적용하여 그 성능을 확인하였다. 시뮬레이션 결과 다중경로에 의해 발생한 오류는 랜덤오류의 특성을 가지기 때문에 인터리버의 효과는 거의 볼 수가 없으며, 수중채널에서 다중경로에 의해 발생한 오류마쿠 현상을 극복하기 위해서는 LDPC 부호와 같은 강력한 오류 정정 부호가 요구된다. 그리고 RS 부호등을 연접하여 사용할 경우 더욱 우수한 성능을 보인다.

핵심용어 : 터보 부호, LDPC 부호, Cross Layer 부호화, 연접부호

ABSTRACT : Underwater acoustic communication has multipath error because of reflection by sea-level and sea-bottom. The multipath of underwater channel causes signal distortion and error floor. In this paper, we consider the use of various channel coding schemes such as RS code, convolutional code, cross-layer code and LDPC code in order to compensate the multipath effect in underwater channel. As shown in simulation results, characteristic of multipath error is similar to that of random error, so interleaver has little effect for error correcting. For correcting of error floor by multipath error, it is necessary strong channel codes like LDPC code that is similar to Shannon's limit. And the performance of concatenated codes including RS codes has better performance than using singular channel codes.

KEY WORDS : Turbo code, LDPC code, Cross Layer coding, Concatnation code

1. 서 론

수중 음향 통신 시스템은 과거 군사적 목적을 위해 제한적으로 사용되었다. 수중 음원 탐지나 수중 운동체 추적, 잠수함 등과의 통신을 위해 주로 연구되었으나 해양에 관한 관심이 고조되고, 해양 탐사나 해저 자원 탐사가 활발해지면서 그 활용분야가 확대되었다. 하지만 국내의 기술 수준은 해양산업기술의

수요 부족으로 인하여 수중통신 시스템의 개발은 미미한 수준이다. 수중에서 전파는 급격한 감쇠특성을 갖기 때문에 수중에서의 무선통신에는 음파를 이용하여 통신을 하게 된다. 이러한 이유로 수중에서의 무선통신 시스템 연구는 수중음향학과 통신기술의 복합기술로 연구가 이루어지는 분야이다. 음성 채널의 경우 전달 과정에서 잔향 및 다중경로 등에 의해 크게 왜곡되며, 수중에서 고속 데이터 전송을 위하여 수중 음향 통신 채널

* squru@hotmail.com 051)410-4920

특성을 결정하는 해면, 해저, 수심 등의 시공간 변화에 의한 다중경로 특성이나 도플러 확산이 시스템의 설계에 고려되어야 한다. 특히 천해에서의 다중경로는 해면의 시변 산란에 의해 도플러 확산과가 직접파에 혼입되어 통신 채널의 특성을 좌우하게 된다. 이러한 음향 채널 특성의 시공간적인 변화는 디지털 수중음향 통신에서 송신하는 심벌간의 상호간섭(Inter-Symbol Interference : ISI)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, 신뢰성이 강한 오류 정정 방식의 적용이 필수적이다[1][2][3]. 이에 본 논문에서는 무선통신시스템에서 사용되고 있는 여러 가지 채널 부호를 적용하여 일반 지상 무선 통신 환경과는 다른 수중채널환경에서 채널부호의 효과를 시뮬레이션을 통해 그 결과를 분석하였으며, 최적의 채널 부호화 방식을 선정하였다. 본 논문에서 고려되어지는 채널 부호화 알고리즘으로는 기존 수중통신에서 고려되는 convolutional 부호 및 RS(Reed-Solomon) 부호, RS 부호와 convolutional 부호를 연결시킨 연결부호를 기본으로 성능 분석하였다. 또한 기존의 성능과 비교분석하기 위해 향후 고려되는 반복부호인 turbo 부호, LDPC(Low Density Parity Check) 부호, cross layer 부호를 적용하여 성능 분석하였다.

2. 수중채널에 고려되어지는 채널코딩

2.1 Turbo 부호[4]

1993년 Berrou등에 의해 제안된 turbo 부호는 E_b/N_0 가 0.7dB, 부호율 1/2에서 비트오류확률 10^{-5} 의 성능을 보였다. 초기에는 긴 프레임에 따른 복호지연 등으로 인한 실시간 처리의 어려움으로 우주통신용으로 연구되었으나 최근에는 IMT-2000에서 높은 데이터율 전송의 채널코딩으로 ITU(International Telecommunication Union)에 의해 제안되고 있다. Turbo 부호의 기본개념은 선행하는 구성코드의 복호기 soft decision output을 다시 나머지 복호기에 입력하고 이러한 과정을 반복함으로써 향상된 decision을 가능하게 하는 것이다. Fig. 1과 2는 각각 turbo 부호의 부호기와 복호기를 나타내었다.

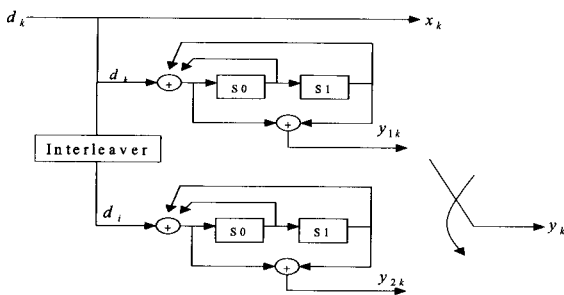


Fig. 1 Encoder structure of turbo code

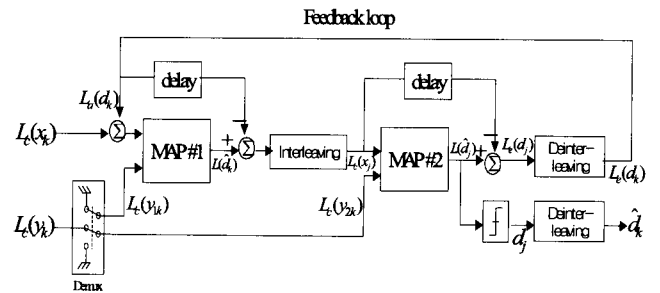


Fig. 2 Decoder structure of turbo code

2.2 N=16200을 가지는 LDPC 부호[5]

최근 모든 무선 통신 분야에서 관심이 되고 있는 채널 부호화 방식인 LDPC 부호화 방식은 turbo 부호에 비해 복호화의 복잡도가 낮을 뿐 아니라 좋은 거리 특성으로 오류마루 현상이 나타나지 않고, 완전 병렬 처리로 고속 처리가 가능한 장점이 있다. 실제로 위성 고선명 TV(HDTV) 표준안인 DVB-S2(Digital Video Broadcasting - Satellite - Second generation) 시스템은 LDPC 부호를 오류정정부호화 방식으로 권고하고 있다. 반면에 부호화의 높은 복잡도가 LDPC 부호의 중요한 문제점이었으나 DVB-S2에서

는 parity 부분을 address를 지정하여 쉽게 부호화하고 있다. LDPC 복호기는 전송된 심볼을 비트 노드와 체크 노드에서 각각의 확률 값을 구하여 반복을 통해 전송된 비트를 결정하는 것이다. LDPC 부호의 복호 순서는 Fig. 3과 같다.

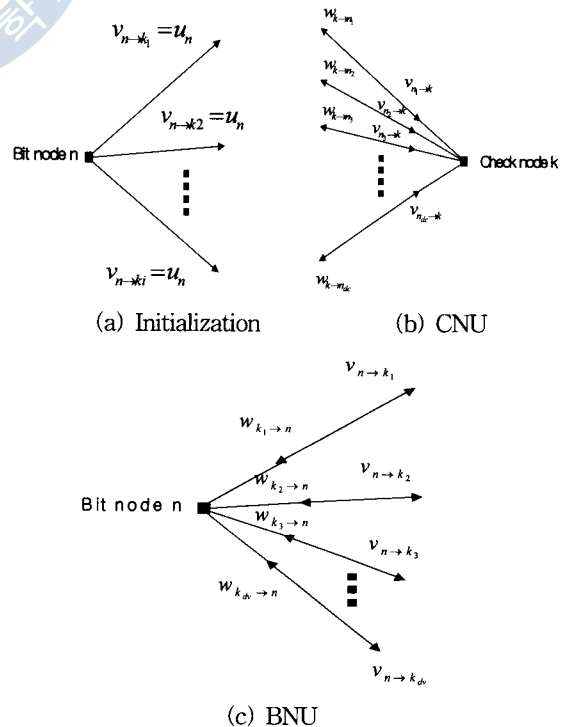


Fig. 3 Decoding process of LDPC

2.3 기타 수중채널에서 고려할 수 있는 채널코딩

Turbo 부호와 LDPC 부호 외에도, 수중채널에서 고려될 수 있는 채널 코딩 방식으로 무선통신에서 주로 사용되고 있는 연접부호 방식[6]과, 이동성 수신기를 위한 cross layer 부호화 방식[7]이 있다. 연접부호는 원하는 오류 성능을 구하기 위하여 내부부호(inner code)와 외부부호(outer code)의 두 레벨의 부호화를 수행하는 부호로써, 내부부호가 대부분의 채널 오류를 정정하도록 하고, 높은 부호율을 가진 외부부호는 오류 확률을 정해진 수준까지 낮추는 기능을 하게 된다. 그리고 두 부호화 단계 사이에는 인터리버를 두어 내부 부호화 과정의 출력에 나타날 수 있는 연접 오류를 펼쳐주어 성능을 높이게 된다. 이러한 연접부호는 단일 부호를 사용한 경우보다 전체 구현 복잡도는 줄이면서도 낮은 오류율을 달성할 수 있다.

본 논문에서는 무선통신시스템에서 주로 사용하고 있는 연접부호 방식으로서, 외부 부호로는 RS 부호를 사용하고, 내부 부호로는 convolutional 부호를 사용해 수중채널에서의 성능을 확인하고자 한다. 그리고 이동체에 대한 위성 방송 및 인터넷 통신을 하기 위한 연구에 의해 제안된 cross layer 부호 방식은 크게 상위계층(upper layer)부분과 물리계층(physical layer)부분으로 구별된다. 상위계층은 RS 부호와 virtual interleaver(VINT)로 구성되어 있으며, virtual interleaver의 크기는 2Mbits까지 유동적으로 설정 가능하다. 물리계층은 DVB-S2에서 규정하고 있는 N=16200을 가지는 LDPC부호를 사용하고 있다.

3. 시뮬레이션

3.1 시뮬레이션 환경

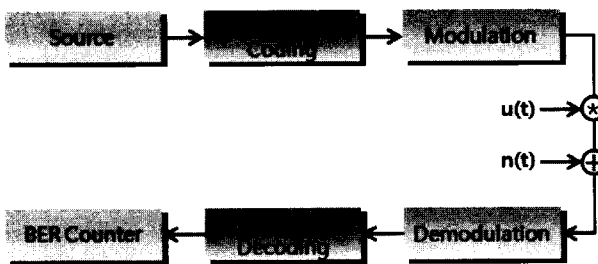


Fig. 4 Simulation block diagram

수중통신 채널에서 부호화기의 성능을 확인하기 위한 시뮬레이션 환경은 Fig. 4와 같다. Fig. 4에서 u(t)는 수중에서의 다중경로에 의한 채널을 나타내며, 송신단의 수심은 50m, 수신단의 수심은 100m, 송수신단의 거리는 1km로 하여 Ray model로 시뮬레이션된 3-path 수중 채널 모델을 사용하였다

[3][8]. 그리고 n(t)는 AWGN (Additive White Gaussian Noise)을 나타낸다. BER 성능을 산정하기 위해서는 송신 비트와 수신 비트의 오류 개수를 카운터 하여 수신측에서 총 데이터의 개수를 나누는 몬테카를로(Monte-Carlo) 시뮬레이션 방법을 적용하였다.

Table 1. Simulation parameter

Modulation		BPSK
fs[Hz]		50k
fc[Hz]		20k
데이터 전송률(D _R)[bps]		100~600
Channel u(t)		distance : 1km multi-path : 3path
Channel code	Convolutional	k(꺠속장)=7, R=1/2, G(x)=(133,171)8
	RS(N,K,t)	N=255, t=8,16,32, K=N-2*t
	Turbo	4state, Iteration=5
	LDPC	N=16200, Iteration=50
	Concatenated	RS+INT+Convolutional
	Upper layer	RS+VINT
	Cross layer	RS+VINT+LDPC

본 논문의 시뮬레이션을 위한 수중통신 채널 모델과 사용된 채널 부호의 파라미터를 Table 1에 나타내었다.

fc가 20kHz이고, fs가 50kHz이므로 각 bit당 할당되는 샘플의 수는 식 (1)과 같이 계산할 수 있다.

$$N_s = f_s / D_R \quad (D_R = \text{data rate}) \quad (1)$$

3.2 시뮬레이션 결과

모델링된 수중채널과 함께 AWGN을 적용하여 수중 무선 통신 환경에서 uncoded BPSK, convolutional 부호, turbo 부호, LDPC 부호의 성능을 Fig. 5부터 Fig. 8까지 나타내었다. 시뮬레이션 결과를 살펴보면, 데이터 전송률이 높아질수록 수중통신채널에서 BER 성능이 열화되다가 데이터 전송률이 500bps 이상이 되면서 다중경로에 의한 잡음의 영향으로 오류마루 현상이 발생하는 것을 확인할 수 있다. 그리고 보다 강력한 오류 정정 부호를 사용할수록 수중 통신 채널에서 BER 성능이 개선되는 것을 확인할 수 있는데, 특히 N=16200을 가지는 LDPC 부호의 성능이 다른 부호에 비해 뛰어난 것을 알 수 있다.

Fig. 5에서 8까지의 시뮬레이션에서 특이한 점은 데이터 전송률이 600bps일 때보다 데이터 전송률이 500bps일 때 더 많은 오류가 발생하는 것을 볼 수 있다. 그 이유는 본 시뮬레이션 프로그램 상에서 복조단에서 수신신호를 검출할 때 일정한 지점에서 하는 것이 아니라, 한 신호의 모든 구간을 한번 탐색하

여 최적점을 찾아내는 방법을 사용하였다. 이 때, 데이터 전송률이 500bps일 때는 한 개의 비트 전체 구간이 같은 다중경로의 영향을 받는 반면, 데이터 전송률이 600bps일 때는 한 개의 비트 내에서도 다른 다중경로의 영향을 받는 부분이 생기면서 신호의 왜곡이 덜한 부분이 생기기 때문에 오류가 줄어드는 것을 알 수 있다.

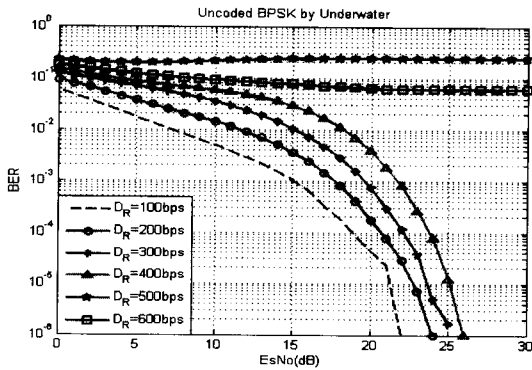


Fig. 5 Performance of Uncoded BPSK by underwater channel

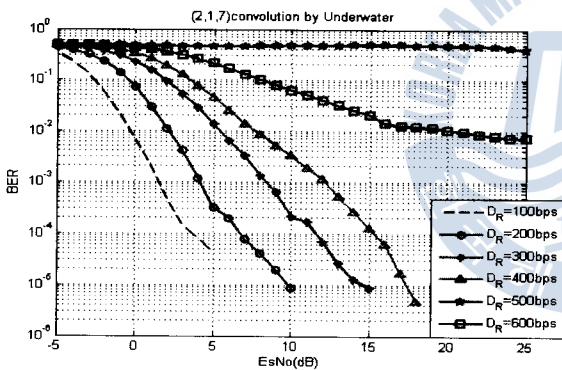


Fig. 6 Performance of (2,1,7) convolutional code by underwater channel

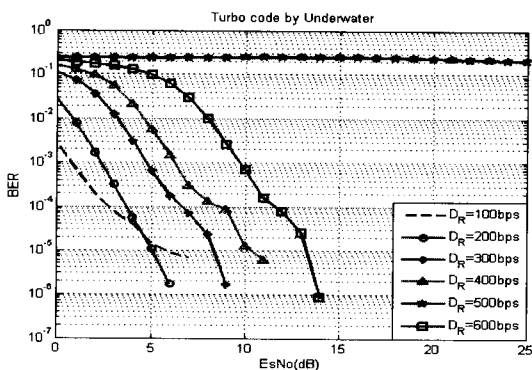


Fig. 7 Performance of 4-state Turbo code by underwater channel

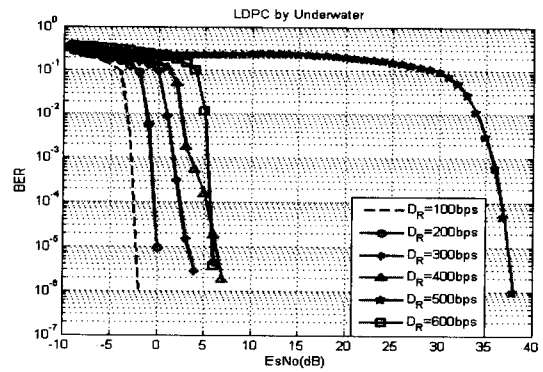


Fig. 8 Performance of LDPC code(N=16200) by underwater channel

Fig. 9에서는 AWGN이 없는 환경에서 데이터 전송률이 500bps와 600bps일 때의 수신 신호의 일부로써, 이러한 현상이 나타나는 것을 설명하고 있다. 이러한 현상은 실제 환경과는 다른 본 시뮬레이션의 시간상의 한계적 특징으로 실제 환경에서는 데이터 전송률이 500bps의 성능이 뛰어날 것으로 사료된다. 하지만, 본 시뮬레이션에서 나타난 데이터 전송률이 500bps에서의 결과값은 복조단에서 등화기의 효과를 볼 수 없는 최악의 수중 채널 환경으로 볼 수 있으므로, 시뮬레이션의 의미를 지니고 있다고 볼 수 있다.

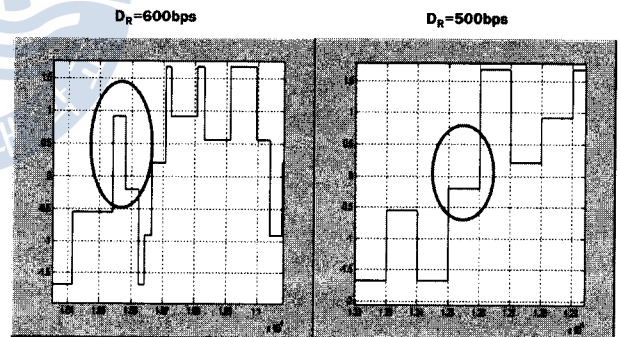


Fig. 9 Distortion of receive signals by multipath

Fig. 10에서는 수중채널에서 데이터 전송률에 따른 RS(255,191,32) 부호의 성능을 나타내었고, Fig. 11에서는 수중 채널에서 cross layer 방식에서 상위계층만의 성능을 나타내었다. cross layer 방식의 상위계층 구조는 RS(255,191,32) 부호에 virtual interleaver를 가미한 구조로써, Fig. 10과 Fig. 11의 결과를 비교하여 볼 때, 그 성능의 차이가 거의 없음을 알 수 있다. 따라서 수중채널에서 virtual interleaver의 효과는 거의 없음을 알 수 있다.

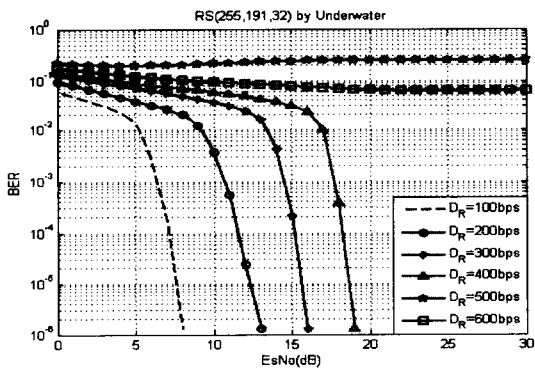
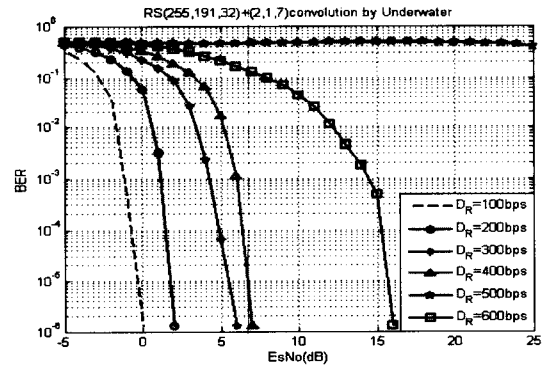


Fig. 10 Performance of RS code by underwater channel



(a) Without interleaver

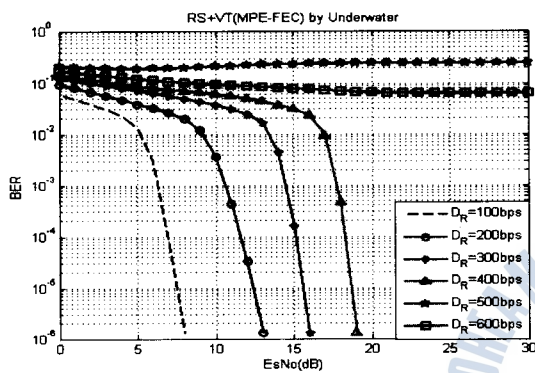
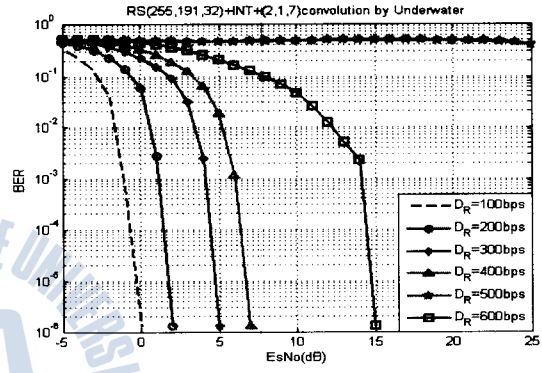


Fig. 11 Performance of upper layer by underwater channel



(b) With interleaver

Fig. 13 Performance of concatenation code by underwater channel

Fig. 12에서는 데이터 전송률이 400bps일 때, RS 부호와 cross layer 상위계층을 비교하여 나타내었다. 그래프의 오류정정 시점을 살펴볼 때, 오류정정 능력이 32심볼인 RS 부호를 사용하면, uncoded BER의 성능이 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 을 확보할 때, RS 부호를 통해 모든 오류를 정정할 수 있음을 알 수 있다.

Fig. 13은 연접부호 방식의 성능을 나타낸 것이다. Fig. 13의 (a)와 (b)를 비교하여 보았을 때 성능의 차이가 거의 없는 것으로 보아, 수중채널에서 인터리버의 효과는 거의 없음을 알 수 있다.

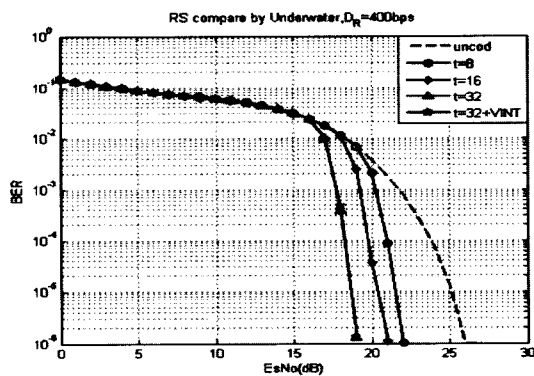


Fig. 12. Comparison of performance based on error correction capacity

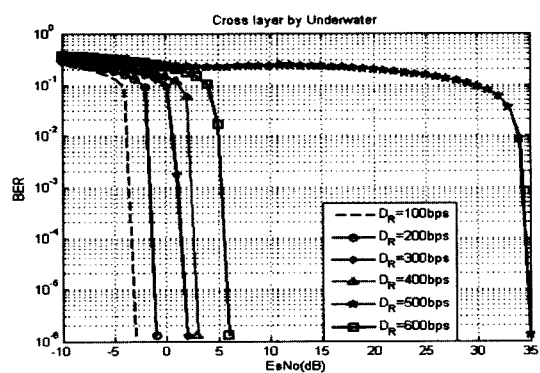


Fig. 14 Performance of cross layer coding by underwater channel

Fig. 14는 수중 채널에서 cross layer 방식의 성능을 나타내고 있다. 성능을 살펴보면 Fig. 8의 LDPC 부호의 성능과 Fig. 10의 RS(255,191,32) 부호의 성능을 결합한 형태로, LDPC 부호를 통해 BER을 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 으로 확보하게 되면 RS 부호를 통해 나머지 오류를 정정하게 되는 것을 알 수 있다.

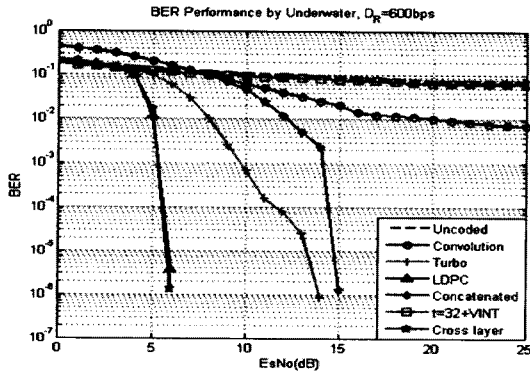


Fig. 15 Performance based on various channel coding by underwater channel

Fig. 15는 수중채널의 다중경로가 존재하는 DR=600bps에서, Table 1을 바탕으로 시뮬레이션 된 오류정정 부호들의 성능을 나타내었다. LDPC 부호와 turbo 부호를 사용할 경우 수중 채널에서 다중경로로 인한 오류를 정정할 수 있지만, RS 부호나 convolutional 부호로는 오류를 정정하지 못하고 오류마루 현상이 생기는 것을 알 수 있으며, RS 부호와 convolutional 부호, LDPC 부호, turbo 부호등을 연결해서 사용할 때 더 좋은 성능을 보이는 것을 알 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 모델링된 수중통신채널 환경에서 convolutional 부호를 비롯한 최신의 채널 부호화 방법들 뿐만 아니라 현재 무선 통신에서 적용되고 있는 다양한 연결부호 및 인터리버 등을 시뮬레이션하여, 수중에서의 다중경로 극복을 위한 효과적인 채널부호 방법에 대한 연구를 하였다. 수중 채널의 다중경로에 의한 영향은 데이터 전송률에 따라서 증가하며, 이를 극복하기 위해서는 단일 부호로서는 LDPC 부호와 turbo 부호를 사용하거나, RS 부호등을 연결하여 사용할 때 다중경로를 극복하고 성공적인 통신을 할 수 있음을 알 수 있다. 특히 RS(255,191,32) 부호는 BER을 $10^{-2} \sim 10^{-3}$ 을 확보하게 되면 거의 모든 오류를 정정할 수 있으므로, 다른 부호와 RS 부호를 연결하여 사용할 경우 오류의 정정 능력을 높일 수 있다. 그리고 수중채널의 다중경로에 의한 영향은 연집오류의 특성보다는 랜덤오류의 특성이 강하기 때문에 인터리버의 효과를 거의 볼

수 없지만, 연결부호를 사용할 경우 AWGN에서 발생할 수 있는 연집오류에 대한 대비를 위해 사용해야 할 것이다.

본 논문에서 제시된 부호화 알고리즘은 현재 지상 무선 통신에서 주로 적용되고 있는 방식이며, 기존의 convolutional 부호 및 RS 부호와의 성능 비교를 통해 차세대 수중통신 적용 부호화 알고리즘 적용 가능성을 검토하였다. 성능분석결과 LDPC의 적용이 다른 부호화 방식에 비해 가장 우수함을 알 수 있다. 현재 수중통신에서는 MIMO (Multi Input Multi Output) 채널에서 시공간 부호화 방식의 적용이 연구되어지고 있으며, 향후 시공간 방식의 성능과 비교 검토차원에서 활용성이 높다고 할 수 있다.

본 논문의 수중채널 환경은 시간적 변이 특성과 도플러 현상 등이 고려되지 않은 실제 해양 환경과는 다소 차이가 있는 제한적인 시뮬레이션이다. 하지만 차후에 더욱더 다양한 환경, shallow water에서 음속 분포, 바닥면의 재질 및 형태 등에 따른 더욱더 많은 다중경로 등을 고려하여 실제 해양환경과 가깝게 시간적 특성과 도플러 현상까지 적용한 시뮬레이션을 향후 과제로 연구할 계획이다.

참 고 문 헌

- [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] M. Stojanovic, "Recent advances in high-speed underewater acoustic communications", IEEE J. Ocean. Eng, vol. 21, no. 2, pp.125-136, Apr. 1996.
- [3] F.B. Jensen, W.A. Kuperman, M.B.Porter, and H.Schmidt, Computational Ocean Acoustic, AIP Press
- [4] C.Berrou, A.Glavieux, and P.Thitimajshima, "Near Shanon Limit Error-Correcting Coding and Decoding : Turbo-Codes", in Proc. ICC93, 1993.
- [5] C.Berrou, A.Glavieux, and P.Thitimajshima, "Near Shanon Limit Error-Correcting Coding and Decoding : Turbo-Codes", in Proc. ICC93, 1993.
- [6] G. D. Forney, Jr., "Concatenated Codes", Cambridge, MA: MIT. Press, 1996.
- [7] ETSI EN 301 210: "Digital Video Broadcasting (DVB): Framing Structure, Channel Coding and Modulation for Digital Satellite News Gathering (DSNG) and Other Contribution Applications by Satellite". (DVB-S2)
- [8] 정진우, 김락훈, 심태보, 김성일, "수중통신 채널에서 적용 변조기법을 적용한 STBC 시스템의 성능분석", 수중음향학 학술발표회 논문집, 22회, 2007.8

원고접수일 : 2008년 12월 10일
원고채택일 : 2009년 01월 05일



