한국음향학회지 제38권 제2호 pp. 207~213 (2019)
The Journal of the Acoustical Society of Korea Vol.38, No.2 (2019)
https://doi.org/10.7776/ASK.2019.38.2.207

pISSN : 1225-4428
eISSN : 2287-3775

수중 주파수 선택적 채널에서 블록 인터리빙 기법을 적용한 길쌈부호화 기법의 성능

Performance of convolutional coding using block interleaving in underwater frequency-selective channel

박지현,[1] 윤종락[2†]

(Jihyun Park[1] and Jong Rak Yoon[2†])

[1]부경대학교 음향진동공학연구소, [2]부경대학교 정보통신공학과

(Received November 8, 2018; revised December 20, 2018; accepted March 25, 2019)

초 록: 본 논문은 수중 주파수 선택적 채널에서 블록 인터리빙 기법을 적용한 길쌈부호기법의 통신성능을 평가하였다. 블록 인터리빙은 디지털 데이터 열을 확산 분산하고 재배치하는 기법으로 주파수 선택적 채널에서 연집오류(burst error)의 집중을 분산시켜 성능을 향상하게 시키는 기법으로 블록 인터리빙 기법이 적용되고 있다. 수조 실험에서 블록 인터리빙이 적용된 길쌈부호의 성능을 평가한 결과 주파수 비 선택적 채널에서 블록 인터리빙을 적용한 길쌈부호의 성능의 차이가 없었다. 하지만 주파수 선택적 채널에서는 블록 인터리빙이 적용된 길쌈부호가 길쌈부호보다 2 dB 이득이 발생하였으며, 이로 인해 수중 음향 통신 성능향상에 기여함을 확인하였다.
핵심용어: 수중 음향 통신, 블록인터리빙, 페이딩, 길쌈부호, 주파수 선택적 채널

ABSTRACT: In this paper, we evaluate the communication performance of convolutional code with block interleaving in a frequency-selective channel. Block interleaving is a technique for spreading and rearranging digital data streams. A block interleaving technique is applied to improve the performance by dispersing the concentration of burst errors in a frequency-selective channel. As a result of evaluating the performance of the convolutional code with block interleaving in the water tank experiment, There was no difference in the performance of convolutional codes using block interleaving in a frequency-selective channel. However, in the frequency-selective channel, the convolutional code with block interleaving has a gain of 2dB, and it is confirmed that the underwater acoustic communication performance is improved.
Keywords: Underwater acoustic communication, Block interleaving, Fading, Convolutional code, Frequency-selective channel

PACS numbers: 43.30.Zk, 43.60.Dh

I. 서 론

천해 수중환경은 해면과 해저 면의 물리적 변동성과 통행 선박 등에 의해 심해보다 상대적으로 높은 배경 잡음을 가지는 통신 채널이다.

현재 수중 음향 통신은 수십 kbps로 전송속도가 제한적이다. 이를 극복하기 위해 위상 변조 방식, 등화기법, 채널 코딩 등의 다양한 통신기법이 적용되고 있지만, 성능은 제한적이다.[1-4]

수중 음향 통신에서 성능 제한의 대표적인 환경요인은 다중경로이다. 다중경로는 송·수신기의 위치 변화, 조수간만에 따른 수심 변화, 그리고 경계면의 변동에 의한 음향 통신 채널의 물성 변동에 영향을 받는다. 이로 인해 송신 신호의 반사각, 진폭, 주파수,

†**Corresponding author:** Jong Rak Yoon (jryoon@pknu.ac.kr)
Department of Information and communication Engineering, Pukyong National University, 45, Yongso-ro, Nam-gu, Busan 48513, Republic of Korea
(Tel: 82-2-629-6233, Fax: 82-2-629-6210)
"이 논문은 2017년도 한국음향학회 추계학술대회에서 발표하였던 논문임."

위상 그리고 각 경로 파의 시간 지연에 영향을 미친다. 수신된 신호는 다중경로 경계면의 물리적 특성에 따라 지연확산되고 수중 음향 통신 채널의 코히어런스 대역폭 제한과 전송 심벌의 심벌 간 간섭 및 주파수 선택성 증가로 인해 통신성능이 제한된다.[5]

수중 주파수 비 선택적 채널은 코히어런스 대역폭이 송신 신호 대역폭보다 넓은 채널로 주파수 선택성을 고려하지 않아도 된다. 하지만 주파수 선택성 채널은 코히어런스 대역폭이 송신 신호 대역폭보다 좁아 주파수 선택성에 의한 대역폭 제한으로 전송률 제한과 오류 발생이 높은 채널이다.[6] 이러한 주파수 선택적 채널에서 대역폭 효율이 우수한 QPSK(Quadrature Phase Shift keying) 방식과 지연확산 변동에 따른 오류감소를 위해 등화기, DLL(Delay Lock Loop) 등이 적용되고 있다. 또한 수중음향 채널의 환경을 고려하여 자동 재전송요구기법보다 효율적인 전방오류정정기법의 채널 코딩 등이 적용되고 있다.[7-12]

수중 주파수 선택적 채널에서 전방오류정정기법 중 길쌈부호를 적용하여 수치 모의실험 성능을 제시한 연구에서 3 dB의 이득이 발생함을 보였다. 또한 수조 실험의 결과로 주파수 선택적 채널에서 4 dB의 성능향상을 확인하였다.[13] 이러한 채널코딩 성능의 직접적인 실험 연구와 더불어 주파수 선택적 채널의 영향을 감소시키기 위해 시간 확산 기법 중 인터리빙 기법이 적용되고 있다. 이중 블록 인터리빙은 디지털 데이터 열을 확산 분산하고 재배치하면 하는 기법으로 수중 주파수 선택적 채널에서 연집오류(burst error)의 집중을 분산시켜 성능을 향상하게 시키는 기법으로 블록 인터리빙 기법이 적용되고 있다.[10,14]

본 연구에서는 수중 주파수 비 선택적 채널과 주파수 선택적 채널에서 블록 인터리빙 기법을 적용한 길쌈부호의 통신성능을 평가하였다. 수조 채널의 지연확산에 따른 코히어런스 대역폭을 고려하여 QPSK방식과 길쌈부호기법 그리고 블록 인터리빙이 적용된 길쌈부호기법의 BER(Bit Error Rate) 성능을 확인하였다.

II. 수중 주파수 선택적 채널

수중 경계면 반사에 의한 다중경로는 물리적 변동성이 강한 수중음향 환경요인으로 통신성능에 영향을 주는 주요 환경요인이다. Fig. 1과 같이 송신된 신호는 해면과 해저 면에 반사되어 시간 지연되어 수신된다. 각 경로에서 수신되는 신호의 지연은 Eq. (1)과 같다.[6]

$$\tau_p = l_{p,path}/c, \tag{1}$$

여기서 $l_{p,path}$는 p 번째 전파경로의 길이이며, c는 수중에서의 음속(1500 m/s)이다.

Fig. 2는 채널 응답특성에 따른 수신 신호의 주파수 선택성이다. Eq. (1)을 이용한 수중 다중경로 채널의 임펄스 응답은 Eq. (2) 와 같다.

$$h(t,\tau) = \sum_p \alpha_p(t)\delta(t-\tau_p(t)), \tag{2}$$

여기서 $\alpha_p(t)$는 다중경로 채널의 복소수 값의 크기이며, $\tau_p(t)$는 p 번째 전파경로의 전파지연이다.

수중 다중 경로에 의한 지연확산은 Eq. (3)과 같으며, Eq. (3)의 평균 초과 지연 $\bar{\tau}$와 평균 제곱 지연 $\overline{\tau^2}$는 Eq. (4)와 같다.[13]

$$\tau_{rms} = \sqrt{\overline{\tau^2} - (\bar{\tau})^2}. \tag{3}$$

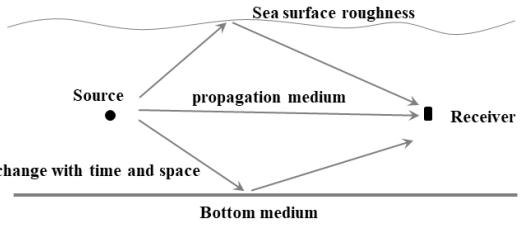

Fig. 1. Underwater multipath channel.

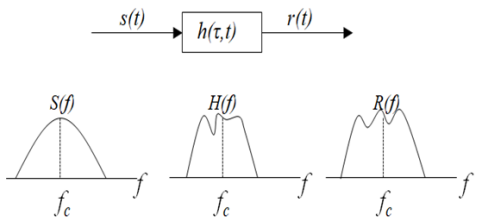

Fig. 2. Underwater frequency-selective channel.

$$\bar{\tau}=\frac{\sum_{p}P(\tau_p)\tau_p}{\sum_{p}P(\tau_p)},\ \overline{\tau^2}=\frac{\sum_{p}P(\tau_p)\tau_p^2}{\sum_{p}P(\tau_p)}, \quad (4)$$

여기서 $P(\tau_n)$는 n차 경로의 전력밀도이다.

Eq. (3)의 지연확산과 채널의 코히어런스 대역폭의 관계는 Eq. (5)과 같다.[13]

$$B_c=\frac{1}{5\tau_{rms}}. \quad (5)$$

Eq. (5)에서 채널의 코히어런스 대역폭 B_c가 송신 신호의 대역폭 B_s보다 넓다면, 송신 신호의 모든 주파수 성분은 채널의 대역 제한에 따른 왜곡 현상이 없이 수신된다. 반대로 채널의 코히어런스 대역폭 B_c가 송신 신호의 대역폭 B_s보다 좁다면, 채널의 대역 제한에 따른 왜곡 및 심벌 간 간섭이 발생하여 오류가 증가할 것이다.[8]

III. 길쌈부호와 블록 인터리빙

통신 채널 전송에서 발생하는 오류를 감소시키기 위해 채널 코딩기법을 적용한다. 채널코딩 기법은 자동 재전송요구 기법과 전방오류 정정기법으로 구분된다. 자동 재전송요구 기법은 오류가 발생하면 오류 심벌을 다시 전송하는 기법으로 고속전송이 가능한 통신에서 유용한 방법으로 수중 음향 통신에서는 효율이 낮다. 전방오류 정정기법은 정보 비트에 대한 정정 비트를 함께 전송하는 방법으로 정보의 중복 도를 증가시켜 오류정정을 수행하는 기술이다.

전방오류 정정기법 기법 중 대표적인 방법은 길쌈부호화 기법으로 Fig. 3과 같다. 길쌈부호의 구속장 k는 한 개의 입력 비트가 영향을 끼치는 출력 시퀀스(output sequence)의 길이로 Eq. (6)과 같다.

$$k=m+1, \quad (6)$$

여기서 m은 메모리 소자의 개수이다. 길쌈부호의 부호율(code rate)은 출력비트 n과 구속장 k로 정의할 수 있으며 Eq. (7)과 같다.[15-17]

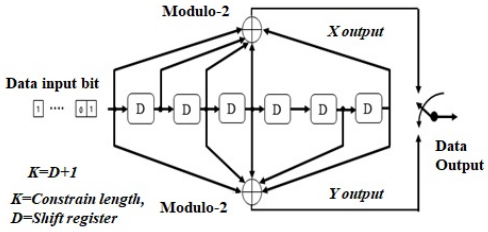

Fig. 3. FEC k = 7, rate 1/2 convolutional encoder.

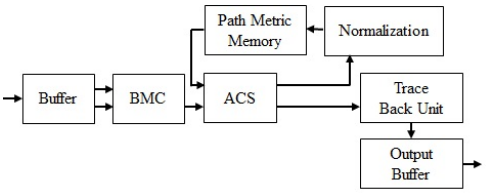

Fig. 4. Viterbi decoder.

$$code\ rate=k/n. \quad (7)$$

본 논문에서는 구속장 $k=7$, 부호율 1/2로 설정하였다. 이러한 길쌈부호는 동일한 BER 조건에서 저전력을 요구하는 수중음향 통신 시스템에 부호율 1/2의 길쌈부호를 적용할 수 있다.

복호기(decoder)는 일반적으로 Fig. 4의 비터비(Viterbi) 알고리즘이 적용된 경판정(hard decision) 복호기가 적용된다.

비터비 복호기는 높은 부호 이득과 높은 하드웨어의 복잡도를 가지면 복잡도는 2^{k-1}에 비례한다. 최대 우호 복호 사용하며, 길쌈 복호기로 가장 많이 사용된다.

- BMC(Branch Metric Calculation): 수신된 시퀀스와 각각의 branch간의 codeword와의 hamming distance를 구하여 branch metric 값을 계산.
- ACS(Add Compare Select): BMC에서 계산된 branch metric값과 현재 상태의 경로척도 값을 이용하여 새로운 경로척도 값을 계산.

수중 음향 통신에서 디지털 변조 방식은 환경요인에 의한 영향을 받더라도 "0"과 "1"을 명확히 전송된다면 왜곡 없이 송신할 수 있다. 하지만 시변적 채널 환경에서 순간 잡음 및 페이딩 영향에 강인한 통신 성능을 보장하기 위해 인터리빙 방식이 적용된다.

인터리빙은 데이터 시퀀스의 순서를 일정 단위로

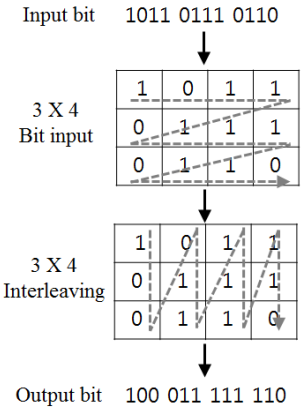

Fig. 5. Block interleaving.

재배열함으로써 환경에 의한 시퀀스 비트가 손실을 감소시켜 복구할 수 있게 하는 기법이다.[15]

블록 인터리빙은 Fig. 5와 같이 디지털 시퀀스를 일정한 블록 단위로 배열한 후 열과 행을 바꾸어 전송하는 기법이다.

이 기법은 시퀀스 비트를 분산 재배치함으로써 어느 한 부분에 오류가 집중되는 것을 막을 수 있다. 이것은 수중 주파수 선택적 채널에서 대역 제한과 페이딩에 의한 군집오류를 감소시킬 수 있다. 또한 천해에서 운용되는 수중 로봇의 무선 제어와 시변성 수중음향 채널에서의 수중 음향 통신 시스템의 성능을 향상할 수 있다.

IV. 실험 및 결과

수중 주파수 선택적 채널에서 블록 인터리빙 기법을 적용한 길쌈부호의 수중음향 통신성능 평가를 위해 Fig. 6과 같이 2.0 m × 1.5 m × 1.0 m 의 수조 실험을 하였다. Fig. 6에서 송신기는 ITC-1001, 수신기는 B&K 8106으로 송·수신기의 수심과 거리는 각각 0.3 m, 0.7 m이다. 채널의 응답특성을 분석을 위해 0.5 s 길이의 LFM(Linear Frequency Modulation) 신호를 10 kHz ~ 20 kHz 대역으로 1 s 간격으로 60회 전송하여 채널의 주파수 응답특성을 분석하였다.

실험 파라메타는 Table 1과 같이 변조 방식은 QPSK, 반송주파수는 18 kHz로 설정하였다. 정보 심벌 전송률은 100 sps, 200 sps(symbol per second)로 설정하였으며, 1/2 길쌈부호를 적용한 전송 신호의 전송률을 심벌 발생률과 같게 하여 송신대역폭 B_s가 100 Hz, 200 Hz가 되도록 하였다. 총 전송되는 비트는 10,000비트로 랜덤비트를 생성하여 전송하였으며, 채널의 잡음 생성을 위해 ITC-1032를 이용하여 백색잡음(white noise)을 발생하였다.

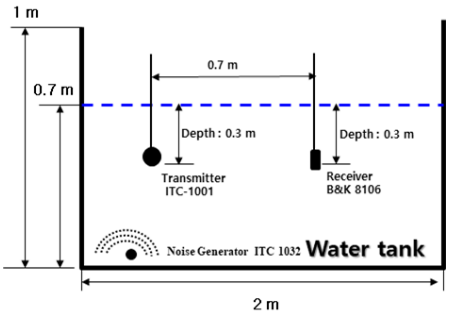

Fig. 6. Experimental configuration in water tank.

Table 1. Water tank experiment parameters.

Modulation	QPSK
Carrier frequency	18 kHz
Coding method	Convolutional code block interleaving
Symbol per second	100, 200 sps
Coherence bandwidth	~ 100 Hz
Range	0.6 m
Transmitter and receiver depth	0.3 m and 0.3 m
Data	Random bit 10,000 bit
Water tank	2 m × 1.5 m × 1 m

Fig. 7은 LFM 신호를 60회 전송하여 평균 정규화한 수조의 지연확산 특성이다. 지연확산 신호의 세기가 0.1 이상의 신호를 Eqs. (3) ~ (6)에 적용하여 지연시간 유효값 τ_{rms} 와 코히어런스 대역폭 B_c을 구하였다. Fig. 7의 지연확산 유효치에 따른 채널의 코히어런스 대역폭 B_c는 Eq. (8)과 같다.

$$B_c = \frac{1}{5\tau_{rms}} \cong 100\,(Hz). \tag{8}$$

최대 지연확산 시간은 약 20 ms이며, Eq. (4)를 이용한 RMS 지연확산은 2 ms이며, Eq. (6)의 RMS 지연확산에 의한 채널의 코히어런스 대역폭 B_c는 100 Hz로 최대 전송률은 100 sps 이하로 제한된다.

Fig. 8은 수조 채널의 응답특성 해석을 위한 LFM

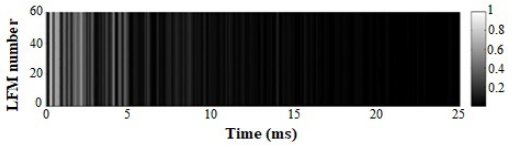

Fig. 7. Delay spread of water tank.

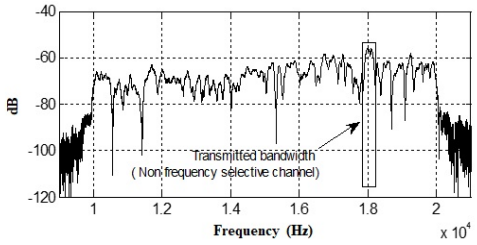

Fig. 8. Water tank channel frequency response.

신호에 대한 주파수 응답 특성이다. 주파수 응답 특성 분석결과 수조 채널의 지연확산은 약 20 ms이며, Eq. (8)과 같이 코히어런스 대역폭은 100 Hz 이하로 제한되는 대역 제한 채널이다. 이러한 채널은 주파수 선택성에 의해 전송성능이 제한되며, 채널의 주파수 선택성에 대한 영향을 감소시키기 위해서는 전송률이 코히어런스 대역폭 이하로 전송되어야 한다.

따라서 수조 실험에서 주파수 비 선택적 채널인 100 sps 이하에서는 블록 인터리빙의 적용이 성능향상에 기여하지 못할 것으로 예상할 수 있다. 하지만 주파수 선택성이 존재하는 100 sps 이상에서는 블록 인터리빙이 적용된 길쌈 부화 기법의 성능향상을 예상할 수 있다.

Fig. 9는 코히어런스 대역폭 이하인 전송률 100 sps의 주파수 비 선택적 채널에서 QPSK, QPSK-길쌈부호[QPSK-CC(Convolutional Code)] 그리고 블록 인터리빙을 적용한 QPSK-길쌈부호-블록 인터리빙[QPSK-CC-BI (Block Interleaving)]의 BER 특성이다. 수조 실험결과 주파수 비 선택적 채널에서는 QPSK 방식과 QPSK-CC를 적용한 경우 E_b/N_o 이득은 약 3 dB로 일반적인 이론치와 일치함을 보인다. 하지만 QPSK-CC와 QPSK-CC-BI를 적용한 경우 E_b/N_o 이득은 0 dB로 주파수 비 선택적 채널에서는 블록 인터리빙이 적용된 길쌈 부호기법의 성능 차이가 발생하지 않았다.

Fig. 10은 채널의코히어런스 대역폭 이상인 200 sps의 주파수 선택적 채널에서 QPSK, QPSK-CC 그리고 QPSK-CC-BI의 BER 특성이다. QPSK 방식과 QPSK-CC

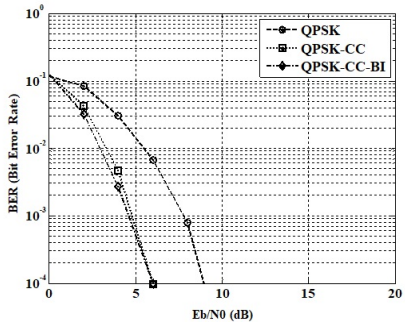

Fig. 9. BER characteristic of non frequency-selective channel.

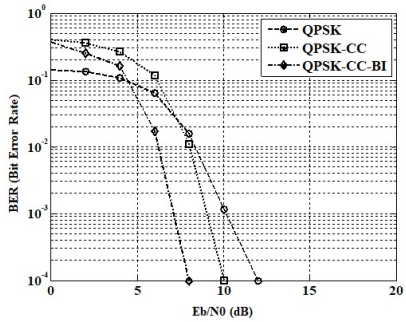

Fig. 10. BER characteristic of frequency-selective channel.

를 적용한 경우 E_b/N_o 이득은 약 2 dB로 길쌈부호기법의 오류정정에 따른 성능이 향상되었다. 또한 QPSK-CC와 QPSK-CC-BI의 경우 E_b/N_o 이득은 QPSK-CC-BI가 약 2 dB 증가하였으며, QPSK 방식에 비해 QPSK-CC-BI를 적용한 경우 약 4 dB의 이득이 향상됨을 실험을 통해 확인하였다.

실험결과 블록 인터리빙 기법을 적용한 길쌈부호기법은 주파수 선택적 채널에서 성능향상에 효과적임을 확인하였으며, 이를 통해 수중 음향 통신 시스템의 성능향상에 기여할 수 있음을 확인하였다.

V. 결 론

본 논문은 수중 주파수 선택적 채널에서 블록 인터리빙 기법을 적용한 길쌈부호의 통신성능을 평가하였다. 수조 실험을 통해 채널의 특성을 분석하고, 지연확산에 따른 코히어런스 대역폭을 통해 전송률에 따른 주파수 선택성을 판단하였다.

본 논문에서 제시한 블록 인터리빙 기법을 적용한

길쌈부호화 기법은 수중 음향 통신 채널의 주파수 선택성에 따른 오류를 감소시키는 방법으로 제시하였다. 실험결과에서 주파수 비 선택적인 채널에서 QPSK 방식보다 QPSK-CC와 QPSK-CC-BI는 약 3 dB 개선되었지만, 블록 인터리빙 기법에 대한 이득은 존재하지 않았다. 하지만 주파수 선택적 채널에서는 QPSK-CC보다 QPSK-CC-BI가 2 dB 개선 효과를 가지는 것을 확인하였다.

실험결과에서 채널의 코히어런스 대역폭에서 의한 주파수 선택성이 존재하는 채널에서 성능개선 효과를 확인하였다. 이를 바탕으로 주파수 선택성이 강한 천해 다중경로 채널에서 블록 인터리빙을 적용한 길쌈부호기법은 적용할 경우 수중 음향 통신 시스템의 성능향상에 기여할 것으로 판단된다.

감사의 글

이 논문은 2017년도 정부(교육부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 기초연구 사업임 (No. 2017R1D1A3B03032824).

References

1. K. Park, J. Park, S. W. Lee, J. W. Jung, J. Shin, and J. R. Yoon, “Performance evaluation of underwater acoustic communication in frequency selective shallow water,” J. Acoust. Soc. Kr. **32**, 95-103 (2013).
2. R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound* 3th Edition (McGraw-Hill, New York, 1983), pp. 99-233.
3. M. Chitre, S. Shahabudeen, and M. Stojanovic, “Underwater acoustic communications and networking: recent advances and future challenges,” J. Marine Tech. Soc., **42**, 103-116 (2008).
4. G. Zhang, J. M. Hovem, H. Dong, and L. Liu, “Experimental studies of underwater acoustic communications over multipath channels,” SENSORCOMM 2010, IEEE, 458-461 (2010).
5. L. Liu, Y, Wang, L. Li, X. Zhang, and J. Wang, “Design and implementation of channel coding for underwater acoustic system,” ASICON, IEEE 497-500 (2009).
6. M. Stojanovic and J. C. Preisig, “Underwater acoustic communication channels: propagation models and statistical characterization,” Communications Magazine, IEEE, **47**, 84-89 (2009).
7. D. Choi, H. Kim, N. Kim, S. Kim, and J. Chung, “Coherence bandwidth and coherence time for the communication frame in the underwater of East Sea” (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **29**, 365-373 (2010).
8. J. Kim, K. Park, J. Park, and J. R. Yoon, “Coherence bandwidth effects on underwater image transmission in multipath channel,” Jpn. J. Appl. Phys. **50**, 07HG05-1-07HG05-5 (2011).
9. M. Siderius, M. B. Poter, P. Hursky, V. McDonald, and the KauaiEx Group, “Effects of ocean thermocline variability on noncoherent underwater acoustic communications,” J. Acoust. Soc. Am. **121**, 1895-1908 (2007).
10. J. Trubuil, A. Goalic, N. Beuzelin, and C. Laot, “Check and validate reed solomon block turbo codes in shallow underwater acoustic communication,” Proc. IEEE OCEANS, 1-6 (2010).
11. J. Trubuil, A. Goalic, and N. Beuzelin, “An overview of channel coding for underwater acoustic communications,” MILCOM 2012, IEEE, 1-7 (2012).
12. A. Goalic, J. Trubuil, and N. Beuzelin, “Channel coding for underwater acoustic communication system”, Oceans 2006, IEEE, 1-4 (2006).
13. C. Seo, J. Park, K. Park, J. Shin, J. Jumg, and J. R. Yoon, “Performance of convolution coding underwater acoustic communication system on frequency selectivity index” (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **32**, 95-103 (2013).
14. R. V. Nee, and R. prasad, *OFDM for Wireless Multimedia Communications* (Artech House, Norwood, 2000), pp. 33-58.
15. J. G. Proakis, and M. Salehi, *Digital Communications* 4th Edition (McGraw- Hill, New York, 2001), pp. 470-506.
16. J. Park, C. Seo, K. Park, and J. R. Yoon, “Effectiveness of convolution code in multipath underwater acoustic channel,” Jpn. J. Appl. Phys. **52**, 07HG01-1- 07HG01-3 (2011).
17. C. Seo, J. Park, K. Park, and J. R. Yoon, “Performance comparison of convolution and Reed-Solomon codes in underwater multipath fading channel,” JJpn. J. Appl. Phys. **53**, 07KG02-1-07KG02-3 (2014).

저자 약력

▸ 박 지 현 (Jihyun Park)

2000년 2월: 밀양대학교 정보통신공학과 학사
2002년 2월: 부경대학교 정보통신공학과 석사
2008년 8월: 부경대학교 정보통신공학과 박사
2008년 11월 ~ 2018년 8월: 부경대학교 음향진동연구소 선임연구원
2017년 06월 ~현재: 부경대학교 음향진동연구소 책임연구원
<관심분야> 수중음향통신시스템, 수중음향신호처리, 수중로봇제어

▸ 윤 종 락 (Jong Rak Yoon)

1977년 2월: 부경대학교 어업물리 학사
1980년 2월 부경대학교 수산물리 석사
1987년 2월: Florida Atlantic University 해양공학과 음향공학 전공 석사
1990년 2월: Florida Atlantic University 해양공학과 음향공학 전공 박사
1990년 4월 ~ 현재: 부경대학교 정보통신공학과 교수
<관심분야> 수중음향 ,수중음향통신, 음향신호처리