

다중 직교 특성을 갖는 FH-MFSK 방식의 수중음향통신

Underwater Acoustic Communication of FH-MFSK Method with Multiple Orthogonal Properties

이형우, 김기만[†], 손윤준^{*}, 김우식^{**}, 천승용^{**}, 이상국^{**}

(Hyeung-Woo Lee, Ki-Man Kim[†], Yun-Joon Son^{*}, Woo-Sik Kim^{**},
Seung-Yong Chun^{**} and Sang-Kook Lee^{**})

한국해양대학교 전파공학과, ^{*}국방기술품질원, ^{**}국방과학연구소

(접수일자: 2014년 6월 27일; 채택일자: 2014년 8월 29일)

초 록: 본 논문에서는 다중 직교 특성을 갖는 FH-MFSK(Frequency-Hopped Multiple Frequency Shift Keying) 방식의 수중음향통신을 제안한다. 일반적으로 FSK(Frequency Shift Keying) 방식은 처리 과정이 단순하지만 다중 경로 전달로 인해 발생하는 인접 심볼간 간섭에 취약하다. 본 논문에서는 전송하고자 하는 심볼 수와 동일한 서로 직교 성질을 갖는 코드들을 생성한다. 이 코드 값들은 각각 다수의 주파수들에 대응된다. 이러한 다중 직교 코드를 생성하기 위해 m-sequence를 이용하였다. 실험을 통해 제안된 방법의 성능을 기존의 MFSK 방식과 비교하였다. 100 bps 전송율에서 제안한 방법은 기존의 방법보다 오차율이 6 ~ 10 % 낮게 나타났다.

핵심용어: 수중음향통신, 다중경로 전달, 대역 확산, 주파수 도약, 주파수 천이 변조, 다중 직교 코드

ABSTRACT: In this paper, we propose an underwater acoustic communication of FH-MFSK(Frequency-Hopped Multiple Frequency Shift Keying) system with multiple orthogonal property. Generally, the processing of FSK(Frequency Shift Keying) method is simple, but it is vulnerable to ISI (Inter-Symbol Interference) caused by multipath transmission. In this paper, the orthogonal codes are generated with the same number of transmitting symbols, and these codes are corresponding to multiple frequencies. We used m-sequence to generate multiple orthogonal codes. We compared the performance of proposed method with conventional MFSK method via the experiment. As a result, we confirmed that the proposed method shows 6~10 % lower error rate at 100 bps than conventional method.

Keywords: Underwater acoustic communication, Multipath propagation, Spread spectrum, Frequency hopping, Frequency shift keying, Multiple orthogonal codes

PACS numbers: 43.60.Dh

1. 서 론

최근 해양에 대한 관심이 높아지고, 해양 탐사나 해저 자원 탐사가 활발해지면서 통신의 중요성이 확대되고 있다. 전파를 이용한 수중통신은 산란 및 전달 손실이 크기 때문에 매우 근접한 거리에서만 사용이 가능하고, 레이저를 이용한 수중통신은 근거리에서 해수의 투과율이 매우 좋을 경우에만 사용가능

하다. 근거리가 아닌 경우에는 음파에 의한 수중통신만 가능하다. 음파를 이용한 수중통신으로는 비동기식 복조기법을 이용한 FSK(Frequency Shift Keying) 수중음향통신 시스템의 구현을 시작으로 전송속도 증가를 위해서 PSK(Phase Shift Keying) 변복조를 사용하는 방법이 일반화되었다.^[1] 수중음향통신 분야에서 전송을 향상을 위한 연구와 함께 수중에서 다중경로 전달로 인한 신호의 왜곡을 극복하려는 연구가 주로 이루어지고 있다. 특히, 전자기파의 전달 속도에 비해 음파의 전달 속도는 약 20만 분의 1이다.

[†]Corresponding author: Ki-Man Kim (kimkim@kmou.ac.kr)
Korea Maritime and Ocean University, 727 Taejong-Ro, Yeongdo-ku, Busan 606-791, Republic of Korea
(Tel: 82-51-410-4918, Fax: 82-51-404-3986)

이러한 음파의 느린 전달 속도로 인해 육상의 통신에 비해 상대적으로 긴 신호의 지연이 발생한다. 그리고 천해에서는 해수면과 해저면의 기하학적 구성에 따른 다중 경로 전달 특성이 변하는 문제가 발생한다. 이러한 다중경로 전달 문제를 해결하기 위하여 적용되는 방법으로 빔 형성 기법을 포함한 배열 센서를 이용한 시공간적 신호 처리 기법과 등화기 적용 이외에도 대역 확산 기법을 들 수 있다.^[2,3] 국내에서도 일부 연구소와 대학을 중심으로 이에 대한 연구가 진행되고 있으며, 대부분 FSK와 PSK 변복조를 기반으로 하여 해상실험을 수행한 결과를 제시하였다.^[4,7]

외국의 경우 1990년대 중반 미국 Datasonics사의 ATM 시리즈의 수중음향통신 모뎀이 출시되면서 상용화하기 시작하였는데, 현재 상용 제품을 시판하고 있는 제품으로는 미국의 WHOI(Woods Hole Oceanographic Institution), Benthos, LinkQuest 및 독일의 Evologics사 등이 대표적이다. 특히, WHOI의 마이크로모뎀과 Benthos사의 ATM 시리즈는 변형된 FSK 방식을 기본으로 하고 있는데 이는 다중경로 전달이 통신 성능에 큰 영향을 미치는 수중음향 채널 특성 때문이다.^[8,9] 이들 상용 모뎀에는 모두 주파수 도약(Frequency Hopping, FH) 방식이 적용된 FH-FSK 방법이 사용되고 있다.

기존의 FH-FSK 방식은 정해진 주파수 코드를 사용한다. 해상 실험 결과에서 전송율에 따라 비트 오차율이 약 1~8%, 거리의 변화 따라 약 20% 이상 있어서 비교적 근거리 적용 가능하며, 전송율을 향상시키는데 한계가 있다.^[10-12] 본 논문에서는 FH-MFSK 방식으로 전송율을 향상시키면서 심볼간 간섭에 강한 다중 직교 성질을 갖는 방법을 제안하였으며, 이때 다중 직교 코드는 분할된 m-sequence를 사용하여 구성하였다. 제안한 방법은 서로 다른 지연 확산 시간을 갖는 채널에서의 실험을 통하여 성능을 고찰하였다.

II. 다중 직교 성질을 갖는 FH-MFSK 수중음향통신

주파수 도약 방식은 FSK 전송과 연계되는데 특히 다중 코드를 가지면서 송신부에서의 변조는 미리 정

해진 다수의 등간격으로 배열된 주파수들을 사용하는 MFSK(Multiple Frequency Shift Keying)를 적용할 수 있다. 이러한 M-ary FH-MFSK에서 각 코드를 c_{mn} ($m=0,1,\dots,M-1, n=0,1,\dots,N-1$), N 을 코드의 길이 라 하면 기저대역에서 m 번째 FH 심볼은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$x_m(t) = \sum_{n=0}^{N-1} e^{j2\pi c_{mn} \Delta f t} s(t-n\Delta t), \quad (1)$$

여기서 $s(t)$ 는 $0 \leq t \leq \Delta t$ 구간에서 1이며, Δf 는 MFSK를 구성하는 주파수들의 최소 간격이다. 따라서 하나의 심볼 길이 T 는 $N\Delta t$ 가 된다. Fig. 1은 Hanning 윈도우가 곱해진 FH-MFSK 심볼 한 주기의 파형과 스펙트로그램의 예를 보여준다. 이러한 M-ary FH-MFSK가 좋은 성능을 가지려면 각 코드들은 서로 직교성을 가져야 하는데 이는 서로 다른 코드 사이의 상관도는 낮고, 같은 코드 사이의 상관도는 높게 나타나야 함을 의미한다. 예를 들어 하나의 심볼당 2개의 비트를 전송하고자 하는 경우 $M=2^2=4$ 가 되어 4개의 직교

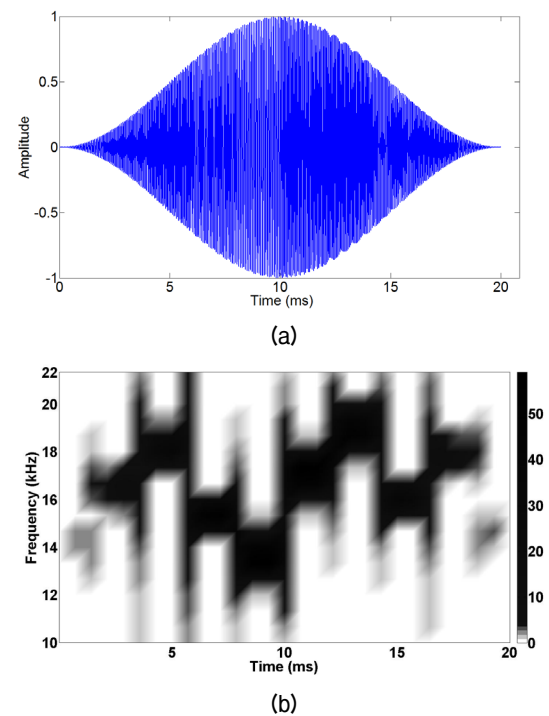


Fig. 1. Example of FH-MFSK (a) waveform and (b) spectrogram.

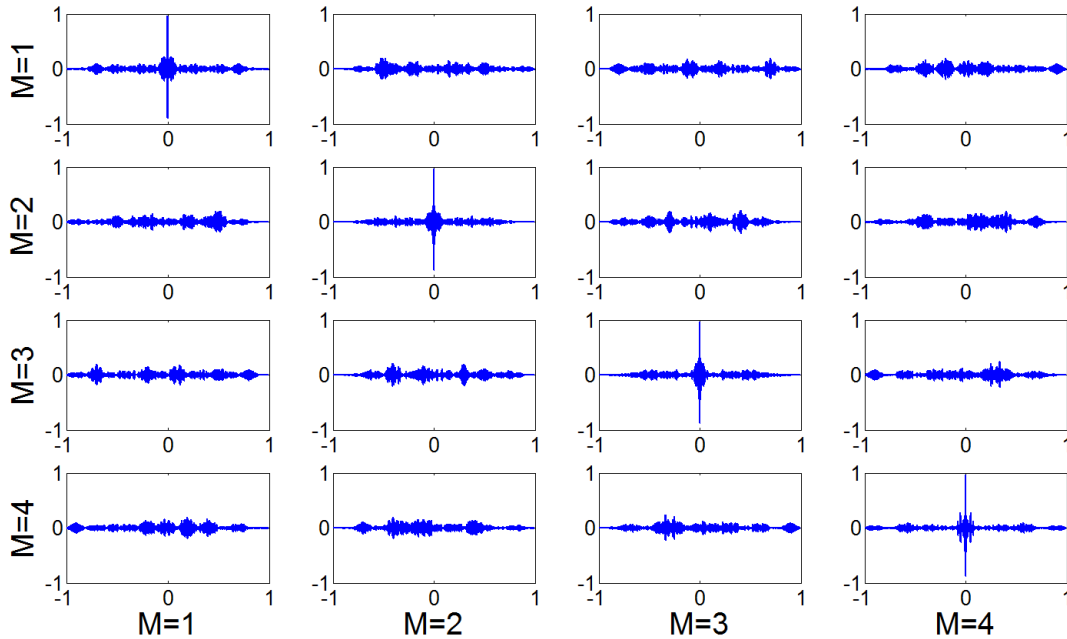


Fig. 2. Cross and autocorrelation between FH-MFSK waveforms.

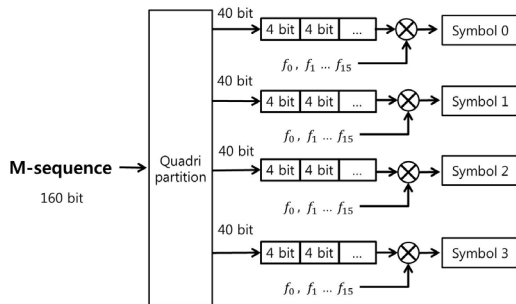


Fig. 3. Flow diagram for FH-MFSK waveform generation.

코드가 필요하며, 이들 코드는 서로 높은 직교성을 갖고 있어야만 수신단에서 정합필터를 이용해 데이터를 검출하기 용이해진다.

블록 코히어런스를 최소화하는 등의 직교 코드를 구성하는 방법들이 연구되어 왔으나 본 연구에서는 분할된 m-sequence를 사용하여 구성하였다. 예를 들어 M=4, N=10이고 전체 도약 주파수를 16개라 한다면 먼저 총 K=160 비트의 m-sequence를 생성한다. 이를 40비트씩 4개의 그룹으로 분할하고, 각 그룹 내의 40비트도 10개씩 분할하면 최소 단위는 4개의 비트가 된다. 이 4개의 비트 값에 의하여 0~15 사이의 랜덤 값이 생성되며, 이들은 도약 주파수 $f_0 \sim f_{15}$ 로 할당된다. 최종적으로 4개의 코드는 각각 도약 주파수

$f_0 \sim f_{15}$ 가운데 10개의 주파수로 구성된다. Fig. 3은 이러한 과정을 나타내는 순서도이다.

Fig. 2는 전체 도약 주파수의 수가 16개이고, M=4, N=10인 경우 앞서 설명한 방법으로 생성된 FH-MFSK 신호 4개의 심볼들 사이의 상관관계를 보여준다. 이들 심볼들은 각각 2개의 비트 00, 01, 10, 11에 해당된다. 그림은 각 심볼들의 자기 상관도(autocorrelation)는 높지만 서로간의 상호 상관도(crosscorrelation)는 매우 낮게 나타나는 것을 알 수 있다. 수신기는 원래의 이진 신호를 복원하기 위한 것으로 대표적인 것은 동기식 정합 필터이다. 정합 필터는 수신된 신호와 송신 신호 사이의 유사도를 측정하는 것이며, 제안한 방법 역시 동기식 정합 필터를 이용하여 신호를 복원할 수 있다.

III. 실험 및 결과

제안한 방법의 성능을 확인하기 위하여 2014년 5월 경상북도 문경시에 위치한 호수에서 실험을 수행하였다. 실험에서 사용된 FH-MFSK 신호는 앞서 설명된 것과 같이 전체 도약 주파수의 수를 16개로 하였다. 시작 주파수를 13 kHz로 하였고, 주파수 사이의 간격

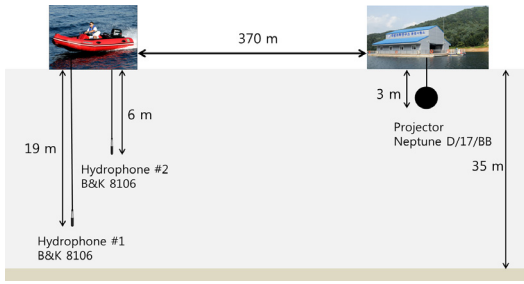


Fig. 4. Experimental setup.

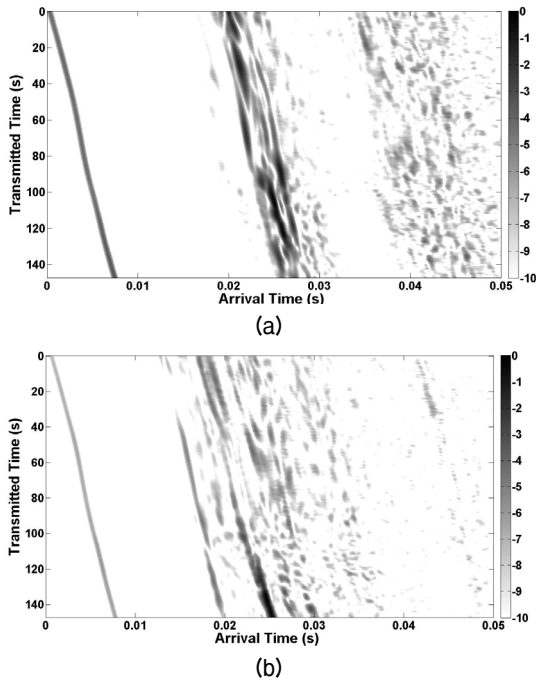
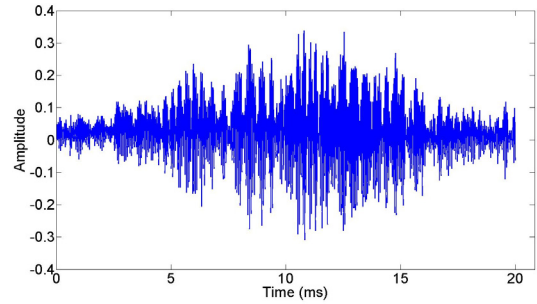
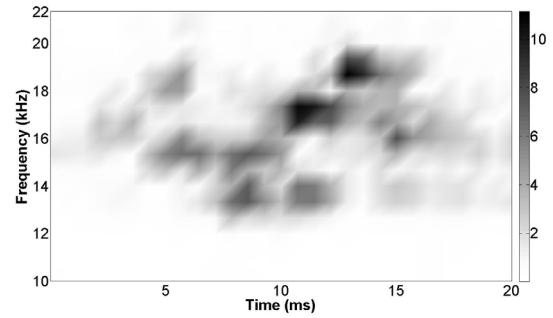


Fig. 5 .Channel impulse response, (a) receiver depth 6 m, (b) receiver depth 19 m.

$\Delta f = 400$ Hz, $M=4$, $N=10$ 인 경우로 구성하였다. 전송 속도는 100 bps로 하였고, 샘플링 주파수는 192 kHz를 사용하였다. 성능비교를 위하여 동일한 데이터를 16FSK로 변조한 신호도 전송하였으며, 같은 주파수와 같은 전송율을 갖도록 하였다. 즉, 16FSK의 경우 전송하고자 하는 데이터를 4 비트씩 묶어 이진 값에 해당하는 하나의 주파수가 실제 송신된다. 송신기와 수신기 사이의 거리는 약 370m, 송신기는 수심 약 3m 지점에 설치하였다. 수신기는 수심 6m와 19m에 각각 배치하였는데 이들을 설치한 보트는 드리프팅하여 바람의 영향을 받아 불규칙하게 천천히 이동하였다. 송신기로는 Neptune D/17/BB, 수신기는 B&K 8106, 그리고 파워 앰프는 B&K 2713이 사용되었다. 실험



(a)



(b)

Fig. 6. (a) The received FH-MFSK waveform, (b) spectrum.

당시 수심은 약 30 ~ 40m였으나 거리에 따라 일정하지는 않았으며, 순간 풍속 1 ~ 8 m/s의 바람이 불규칙하게 불었다. Fig. 4는 실험 모식도를 나타내며, Fig. 5은 실험 당시 각 채널의 전달 특성을 보여준다. 채널 전달 특성을 구하기 위해 길이가 10 ms이고, 6 kHz 대역폭을 갖는 선형 주파수 변조된 신호를 주기적으로 전송하였다.

Fig 5로부터 수신기의 배치 수심에 따라 완전히 다른 형태의 전달 특성을 볼 수 있다. Fig 5(a)는 수신기의 수심이 6 m인 경우로 바닥과 수면에 의한 다중경로 전달 특성을 나타낸 것을 볼 수 있으며, Fig 5(b)는 수신기 배치 수심이 19 m로써 약 30 ms 까지 반사파와 함께 시변동성도 관찰할 수 있다. Fig 6에 실제 수신된 FH-MFSK 신호의 파형과 스펙트로그램을 나타내었는데 채널 전달 특성에 의하여 반사파가 나타나는 것을 확인할 수 있다. Fig 7은 수신 신호의 심볼에 따른 정합 필터 출력 값을 나타낸 그림이며, 그 결과 각각의 심볼 간에 직교성이 유지 되는 것을 확인할 수 있다. Tables 1과 2에는 각 패킷을 전송할 때마다 제안한 방법과 기존의 16FSK 방식의 오차율을 나타내었으며, 이 때 어떠한 채널 부호화 기법도 적용하

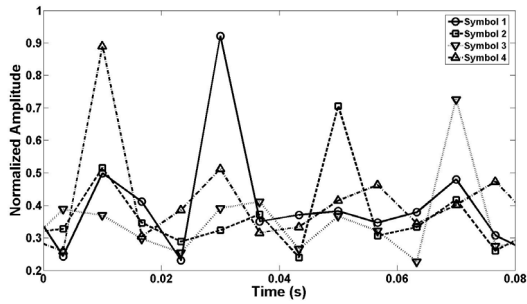


Fig. 7. Matched filter output.

Table 1. Uncoded bit error rates in FH-MFSK transmission.

| Packet \ Water depth | 6m | 19m |
|----------------------|--------|------|
| 1 | 0.0185 | 0.00 |
| 2 | 0.0075 | 0.00 |
| 3 | 0.0185 | 0.00 |
| 4 | 0.009 | 0.00 |
| 5 | 0.019 | 0.00 |
| Average | 0.0144 | 0.00 |

Table 2. Uncoded bit error rates in 16FSK transmission.

| Packet \ Water depth | 6m | 19m |
|----------------------|--------|--------|
| 1 | 0.1185 | 0.065 |
| 2 | 0.122 | 0.061 |
| 3 | 0.149 | 0.039 |
| 4 | 0.042 | 0.044 |
| 5 | 0.138 | 0.0815 |
| Average | 0.1139 | 0.0581 |

지 않았다. 제안한 방법의 평균 오차율은 수신기 배치 수심 6m에서는 1.44%, 19m에서는 0.0%로 나타났다. 비교를 위하여 같은 시점에 같은 전송율을 갖는 16FSK로 전송한 경우에는 수심 6m에서 11.39%이고 19m에서는 5.81%로 나타났다. 두 전송 방법 모두 수심 19m에서의 오차율이 6m에서의 오차율보다 좋게 나타났는데 이는 Fig. 5의 그림처럼 수심 19m에서의 다중경로 전달 특성이 수심 6m인 경우보다 나은 환경이기 때문이다. 6m에서는 제안한 방법이 16FSK에 비해 비트 오차율이 약 10% 정도 높게 나타났고, 19m의 경우에는 약 6% 향상되었다. 이로부터 같은 전송율을 기준으로 FH-MFSK가 16FSK에 비해 다중 경로 전달 환경에서 더 향상된 성능을 갖는 것을 알

수 있다.

IV. 결 론

본 논문에서는 신호의 지연으로 발생하는 심볼간 간섭에 강한 다중 직교 특성을 갖는 FH-MFSK 방식의 수중음향통신 방법을 제안하였고, 이의 성능을 분석하기 위해 실험을 수행하였다. 이 때 다중 직교 코드는 m-sequence를 분할하여 생성하였다. 실험 결과에서 제안한 방법은 다중경로 전달 채널에서 같은 전송율을 갖는 기존의 MFSK 방식보다 좋은 성능을 보였다. 다중 직교 코드를 보다 많이 생성한다면 할당 가능한 심볼 수가 늘어나 결국 전송율을 높일 수 있게 된다. 그러나 FH-MFSK 방식은 구현하기 쉬운 반면 주파수 선택적 채널에서는 그 성능이 저하될 것으로 판단되므로 오류 정정 부호화와 같은 채널 부호화 기법이 함께 적용되어야 한다.

향후 연구 내용으로는 다중 직교 코드를 생성하는 방법과 함께 성능도를 높이는 등에 대한 연구가 필요하다. 아울러 다양한 해상 실험을 통한 성능 분석에 대한 연구도 진행되어야 할 것이다.

감사의 글

본 논문은 방위사업청과 국방과학연구소의 지원(계약번호 UD130007DD) 및 교육부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업으로 수행된 연구결과 중 일부입니다.

References

1. D. B. Kilfoyle and A. B. Baggeroer, "The state of art in underwater acoustic telemetry," *IEEE J. Oceanic Eng.* **25**, 4-27 (2000).
2. Y. C. Choi and Y. K. Rim, "A broadband FIR beamformer for underwater acoustic communications" (in Korean), *J. Korea Inst. Inform. Comm. Eng.* **10**, 2151-2156 (2006).
3. R. L. Peterson, R. E. Ziemer, and D. E. Borth, *Introduction to Spread-Spectrum Communications* (Prentice Hall, New Jersey, 1995), pp. 47-83.
4. J. W. Han, K. M. Kim, Y. J. Youn, H. W. Moon, S. Y. Chun, and K. Son, "Sea trial results of the direct sequence

spread spectrum underwater acoustic communication in the east sea” (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **31**, 441-448 (2012).

5. J. H. Jeon and S. J. Park, “Design and implementation of an acoustic modem for small underwater devices operating at shallow water” (in Korean), J. Inst. Elec. Inform. Eng. **49**, 110-117 (2012).
6. K. C. 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” (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **32**, 95-103 (2013).
7. Y. W. Choi, Y. C. Lim, J. K. Shin, M. K. Kim, D. C. Park, and S. C. Kim, “Low power underwater acoustic communication using orthogonal codes” (in Korean), Proc. Underwater Robot, 45-48 (2014).
8. E. Gallimore, J. Partan, I. Vaughn, S. Singh, J. Shusta, and L. Freitag, “The WHOI micromodem-2 : a scalable system for acoustic communications and networking,” Proc. IEEE/MTS Oceans Conf. 1-7 (2010).
9. L. Freitag, *FH-FSK coding and modulation specification*, WHOI report, 6-10 (2005).
10. L. Freitag, M. Stojanovic, S. Singh, and M. Johnson, “Analysis of direct-sequence and frequency-hopped spread spectrum acoustic communication,” IEEE J. Oceanic Eng. **26**, 586-593 (2001).
11. W. B. Yang and T. C. Yang, “High-frequency FH-FSK underwater acoustic communications : the environmental effect and signal processing,” in Proc. High Freq. Ocean Acoust. Conf. **728**, 106-113 (2004).
12. D. Green, “Underwater acoustic communication and modem-based navigation aids,” in Proc. EUC workshops, 474-481 (2007).

저자 약력

▶ 이 형 우 (Hyeung-Woo Lee)



2014년 2월: 한국해양대학교 전파공학과(공학사)
 2014년 3월 ~ 현재: 한국해양대학교 전파공학과 석사과정
 <관심분야> 수중통신, 음향 신호처리 등

▶ 김 기 만 (Ki-Man Kim)



1988년 2월: 연세대학교 전자공학과(공학사)
 1990년 8월: 연세대학교 전자공학과(공학석사)
 1995년 2월: 연세대학교 전자공학과(공학박사)
 1995년 3월 ~ 1996년 8월: 연세대학교 의과대학 의용공학교실(Fellow)
 1996년 9월 ~ 현재: 한국해양대학교 전파공학과 교수
 <관심분야> 수중통신, 소나 신호처리, 어레이 신호처리 등

▶ 손 윤 준 (Yun-Joon Son)



2000년 8월: 한국해양대학교 제어계측공학과(공학사)
 2000년 5월 ~ 2001년 6월: 대우정밀(주) 연구원 근무
 2003년 8월: 한국해양대학교 전파공학과(공학석사)
 2004년 ~ 2008년: 삼성탈레스
 2008년 ~ 현재: 국방기술품질원 선임연구원
 <관심분야> 소나 탐지, 수중음향 등

▶ 김 우 식 (Woo-Sik Kim)



1991년 2월: 한국외국어대학교 물리학과(이학사)
 1993년 2월: 한국외국어대학교 물리학과(이학석사)
 2004년 2월: 한국해양대학교 해양공학과(공학박사)
 1993년 ~ 현재: 국방과학연구소 책임연구원
 <관심분야> 수중음향, 음향신호처리, 소나 시스템 등

▶ 천 승 용 (Seung-Yong Chun)



1988년 2월: 경북대학교 전자공학과(공학사)
 1990년 2월: 경북대학교 전자공학과(공학석사)
 2007년 8월: 한국해양대학교 전파공학과(공학박사)
 1990년 3월 ~ 현재: 국방과학연구소 책임연구원
 <관심분야> 소나 탐지, 어레이 신호처리, 수중통신 등

▶ 이 상 국 (Sang-Kook Lee)



1989년 2월: 경북대학교 전자공학과(공학사)
 1991년 2월: 경북대학교 전자공학과(공학석사)
 1991년 3월 ~ 현재: 국방과학연구소 책임연구원
 <관심분야> 수중통신 네트워크, 소나 신호처리 등