

시변 수중음향통신 채널을 위한 도플러 주파수 추정

황 찬 호*, 김 기 만^o

Doppler Frequency Estimation for Time-Varying Underwater Acoustic Communication Channel

Chan-ho Hwang*, Ki-man Kim^o

요 약

수중음향통신 채널은 해수면의 시변동성, 해저지형, 음속 분포 및 송수신단 사이의 기하학적인 구조 등에 따라 매우 복잡한 형태의 채널 특성을 나타낸다. 특히, 바람과 해류에 의한 시변동성과 도플러 효과를 갖는다. 이러한 수중음향통신 환경에서 전송 효율을 높이기 위해서는 변화하는 채널의 상태를 파악하고 통신기법에 적용시켜야 한다. 이 논문에서는 채널 시변동 매개변수 가운데 도플러 주파수 추정을 위하여 모호 함수와 자기상관 기법을 적용한 프레임 재귀 변복조 방식을 제안하고, 모의실험과 실제 남해에서의 해상실험을 통해 성능을 확인하였다. 해상 실험 결과 채널 부호화 기법을 적용하지 않은 경우, 기존의 방법에 비해 제안한 방법의 비트 오류율이 약 32% 향상되었다.

Key Words : underwater acoustic communication, doppler frequency estimation, time-varying channel, ambiguity function, sea experiment

ABSTRACT

Underwater acoustic communication channels have very complex channel characteristics caused by time-varying sea surface, submarine topography, sound speed, and geometry between transmitter and receiver. Especially, the channel has time-variance and doppler effect due to wind and sea current. We have to recognize the channel state and apply it to communication technique for increasing transmission efficiency in the underwater acoustic channel. In this paper, we present the frame recursive modulation and demodulation method using ambiguity function and autocorrelation function to estimate the doppler frequency. Furthermore, we conducted the simulation and sea experiment to evaluate the performance of the proposed method. When the channel coding technique was not used, the bit error rate performance of the proposed method was improved about 32 % compared with conventional method.

1. 서 론

최근 해양 자원 개발이 활발해지면서 해양에 대한

관심이 고조되고, 해양환경 모니터링^[1]에서부터 수중 센서 네트워크를 위한 통신기법^[2]까지 다양한 연구가 국내외에서 이루어지고 있다. 특히 해양에서의 수중음

※ 본 연구는 교육부와 한국연구재단의 지역혁신인력창의양성사업 및 방위사업청과 국방과학연구소의 연구지원(계약번호: UD130007D)으로 수행되었습니다.

• First Author : Korea Maritime and Ocean University, hwangchanho@kmou.ac.kr, 학생회원

o Corresponding Author : Korea Maritime and Ocean University, kimkim@kmou.ac.kr, 정회원

논문번호 : KICS2014-09-358, Received September 25, 2014; Revised November 10, 2014; Accepted December 12, 2014

향통신은 응용분야가 확대되고 있는 추세이다³⁾.

육상통신과는 달리 수중음향통신은 전자파가 아닌 음파를 이용한다. 음파의 전달속도는 전자파에 비해 매우 느리고 수중온도와 염분 등에 따라 다르며, 음속 구배로 인한 굴절로 음파의 이동경로가 바뀌게 된다⁴⁾. 음파가 전달되면서 흡수, 손실됨은 물론 해수면과 해저면에 의한 반사와 산란, 다양한 잡음원들, 해류에 의한 송수신기 이동으로 발생하는 도플러 효과까지 수많은 요소들이 복잡하게 작용한다. 그 중에서도 도플러 효과는 실질 전송률과 관계된 채널의 상관시간에 영향을 미친다⁵⁾. 따라서 통신의 전송효율을 높이기 위해서는 도플러 주파수의 변화를 파악하고 그로 인한 왜곡을 보상해 주어야 한다.

이 논문에서는 도플러 효과로 인하여 왜곡된 수신 신호로부터 도플러 천이 주파수를 추정하는 기법을 소개하고, 이를 적용하여 데이터 구간에서도 도플러 주파수 추정 및 등화기 동작을 위한 채널정보 갱신이 가능한 프레임 재귀 반복조 방법을 제안한다. 동일한 도플러 주파수 추정기법을 적용한 기존의 단일 프레임 반복조 방법과의 비교를 위해 벨합(Bellhop) 모델링 기반의 모의실험과 함께 실제 해상실험을 수행하고 성능을 분석하였다.

II. 도플러 주파수 추정

2.1 모호 함수(ambiguity function)

도플러 주파수 천이는 송수신기 간의 상대속도와 신호의 전파속도 간의 비율로 정의된다⁶⁾. 도플러 천이를 Δ 라고 정의할 때, 도플러 효과로 인한 도플러 천이를 갖는 신호는 다음과 같이 표현한다.

$$r(t) = s((1+\Delta)t) \quad (1)$$

송신된 신호와 도플러 주파수 천이된 신호는 각각 $s(t)$ 와 $r(t)$ 로 대응된다. 모호 함수는 입력된 신호의 지연 및 도플러 천이를 정합여파기의 응답으로 나타낸다⁷⁾. 대역폭을 가지는 연속적인 신호에 대하여 모호 함수는 다음과 같이 나타난다.

$$A_s(\tau, \Delta) = (1+\Delta) \int_{-\infty}^{\infty} s((1+\Delta)t) s(t-\tau) dt \quad (2)$$

여기서, τ 는 지연시간, Δ 는 도플러 천이를 뜻한다. 만약 수신된 신호를 $r(t)$ 로 나타낸다면, 상호-모호 함수(cross-ambiguity function)는 아래와 같이 표현된다.

$$A_{sr}(\tau, \Delta) = (1+\Delta) \int_{-\infty}^{\infty} s((1+\Delta)t) r(t-\tau) dt \quad (3)$$

$r(t)$ 의 도플러 주파수 천이를 추정하기 위해 지연 시간은 $\tau=0$ 으로 시간 정렬하고, 아래의 상호-모호 함수 가운데 최대값을 찾는다.

$$A_{sr}(0, \Delta) = (1+\Delta) \int_{-\infty}^{\infty} s((1+\Delta)t) r(t) dt \quad (4)$$

식 (4)의 값이 최대가 될 때, 수신된 신호의 도플러 주파수 천이는 Δ 로 추정된다. 일정한 간격의 주파수 차이를 가지는 기준 신호들을 묶음으로 구성하고 수신된 신호와 각각 상호상관을 취한다. 그 중 가장 큰 상관 값을 갖는 기준 신호를 선택하여 도플러 주파수 천이를 추정한다.

2.2 자기상관 기반 기법

시간 동기화가 완벽한 위상편이키잉(Phase Shift Keying) 변조라면 자기 상관값을 이용하여 도플러 주파수를 추정할 수 있다⁸⁾. 혼련구간에서 수신된 신호가 정합 여파기를 통과한 뒤 심볼 간격으로 표본화된 경우 k 번째 심볼 형태 신호는 아래와 같다.

$$x(k) = a_k e^{j(2\pi \Delta f k T + \theta)} + n(k) \quad (5)$$

a_k 가 심볼 진폭, Δf 는 도플러 천이된 주파수, T 는 심볼 주기, θ 는 반송파 위상이다. $n(k)$ 는 잡음항이다. 혼련 구간에서 복조는 $x(k)$ 에 a_k^* 를 곱함으로써 수행되는데 윗 첨자 *은 켈레복소수를 의미한다.

$$z(k) = a_k^* a_k e^{j(2\pi \Delta f k T + \theta)} + n(k) a_k^* \quad (6)$$

식 $z(k)$ 는 백색 정규 잡음에 포함된 복잡한 정현파로 볼 수 있다. 이를 이용하여 $z(k)$ 와 $z^*(k-1)$ 의 곱을 표현하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} R(k) &= z(k) \times z^*(k-1) \\ &= e^{j2\pi \Delta f T} (1 + \tilde{n}(k) + \tilde{n}^*(k-1) + \tilde{n}(k) \times \tilde{n}^*(k-1)) \end{aligned} \quad (7)$$

윗 식에서 두 번째부터 네 번째 항들은 모두 잡음과 관련된 항이며, 신호 대 잡음비가 충분하다면 도플러 천이 주파수는 지수 부분 값을 이용해 아래와 같이 구

할 수 있다. $\arg()$ 는 팔호 안의 위상을 의미한다.

$$\Delta f = \frac{1}{2\pi T} \arg(z(k) \times z^*(k-1)) \quad (8)$$

III. 제안한 프레임 재귀 변복조 방법

3.1 재귀 프레임

일반적인 통신 데이터 전송을 위한 패킷 구조는 훈련 신호 구간과 데이터 신호 구간으로 구성된다. 훈련 신호구간에서는 송신단과 수신단이 모두 알고 있는 약속된 신호를 전송함으로써 등화기 동작을 위한 탭 계수 갱신은 물론 도플러 추정 등이 이루어진다. 하지만 이러한 값들은 채널의 시변동성에 의해 시간이 흐를수록 임의의 한 통신 프레임 데이터 구간에서도 오차가 커져서 통신 성능을 나쁘게 만든다. 따라서 데이터 신호 구간에서도 도플러 주파수 추정과 보상이 필요하다.

통상적인 통신은 훈련 신호 구간에서만 채널정보를 추정하고 그 정보를 이용해 데이터 신호 구간에서는 복조만 이루어지나, 제안한 프레임 재귀 변복조 방법은 데이터 신호 구간에서도 변화된 채널정보를 추정하기 때문에 통신성능의 신뢰도를 높일 수 있다는 장점이 있다. 제안한 방법은 통신 패킷내의 데이터 구간을 여러 재귀 프레임으로 나뉘 복조하는 방법으로 훈련 시퀀스 구간을 통해 추정된 채널 정보를 첫 번째 재귀 프레임에 적용하여 복조를 수행하고, 복조된 데이터를 재변조하여 훈련 신호처럼 채널정보를 추정하는데 이용된다. 그림 1은 제안한 방법의 모식도를 나타낸 것이다.

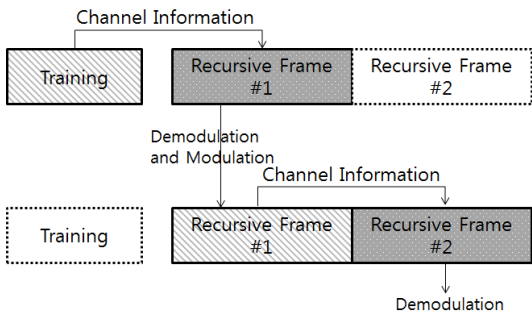


그림 1. 제안한 프레임 재귀 변복조
Fig. 1. The proposed frame recursive modulation and demodulation method

3.2 수신기 구조

이 논문에서는 위상편이변조의 통신 시스템을 기반

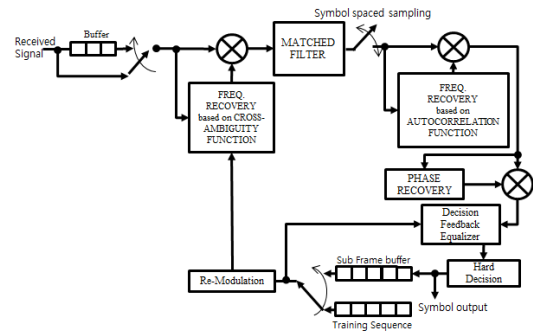


그림 2. 수신기 구조
Fig. 2. Receiver structure

으로 그림 2와 같은 수신기 구조를 구성하였다. 이상적인 신호(훈련신호)는 모호함수 기법 기반의 주파수 추정을 위해 일정 주파수 간격을 가지는 도플러 묶음으로 구성된다. 1차 주파수 추정 및 보상이 완료되면 정합 여파기를 거치게 되고 심볼 간격으로 표본화한다. 표본화된 값은 자기상관 기법 기반의 2차 주파수 보상이 이루어지며, 위상동기루프를 통해 왜곡된 위상이 보정된다. 이후 등화기를 통해 채널의 다중경로 전파로 인한 왜곡을 보상한다. 이때 사용된 등화기는 재귀 최소자승법 알고리즘 기반의 결정 궤환 등화기가 사용되었다⁹⁾. 등화기 출력의 경관정 값은 수신기의 최종 출력 값이 된다. 최종 출력된 심볼들은 이상적인 신호로써 1차 주파수 복구 및 등화기의 입력 값으로 재사용된다.

IV. 실험 및 결과

4.1 모의실험

제안한 방법의 성능을 확인하기 위해 실제 바다에서 측정된 음속 분포를 이용하여 벨합(Bellhop) 기반의 VirTEX(Virtual Time series Experiment) 시뮬레이터로 모의 수중 채널을 생성하고, 모의실험을 수행하였다¹⁰⁾. VirTEX는 미국 스크립스(Scripps) 해양 연구소가 개발한 벨합 기반 수중 채널 모델링 프로그램이다. 수심은 200 m로 해저면은 평탄하게 하였으며, 송신기와 수신기는 각각 50 m와 100 m에 위치시켰다. 송수신기간의 거리는 1 km를 기준으로 수신기를 이동시켜 0에서 5 Hz의 도플러 주파수를 갖도록 하였다. 2010년 6월 동해에서 획득된 음속 분포 정보¹¹⁾를 적용하였다.

송신신호는 중심 주파수가 5 kHz인 1 kbps의 4진 위상편이변조를 하였으며, 훈련 심볼과 데이터 심볼은

각각 256, 1000 심볼로 구성하였다. 다중경로 전파로 인한 간섭을 피하고자 훈련 시퀀스와 데이터 심볼 구간 사이에 0.2 초의 무음구간을 두었다. 또한 채널에 의한 왜곡을 보정하기 위한 채널 부호화 기법은 적용하지 않았다.

모의실험 결과 표 1과 같은 부호화되지 않은 비트 오류율을 보였다. 재귀 부 프레임 크기는 심볼 단위로 나뉘게 되며, 기존의 방법은 훈련 신호 구간에서 추정된 하나의 값을 데이터 신호 전체 구간에 적용하여 복조하는 방식을 의미한다. 도플러 주파수가 증가할수록 전체적인 부호화되지 않은 비트 오류율도 증가하는 양상을 보이며, 재귀 프레임의 크기에 따라 성능 차이가 존재하나 기존의 복조 방식보다 제안한 방법이 나은 성능을 보였다. 다만 도플러 천이 주파수 0 Hz의 경우, 재귀 프레임 크기가 250 심볼 이하일 때의 성능이 기존의 방법보다 좋지 않았는데 이것은 프레임 초반부에서 생긴 오류가 뒤쪽 프레임의 도플러 주파수

표 1. 모의실험결과
Table 1. Simulation results

Doppler shift frequency [Hz]	Conventional Method	Recursive subframe size	
		500 symbols	250 symbols
0	0.6	0.5	13.4
1	0.9	0.75	0.75
2	5.15	2.95	1.75
3	13.55	11.5	9.65
4	24.3	23.95	20.9
5	34.4	34	34
Uncoded Bit Error Rate [%]			

추정뿐만 아니라 채널 추정을 위한 등화기에도 영향을 미친 것으로 데이터 패킷 후반으로 갈수록 오류가 더 커지는 것을 확인하였다.

4.2 해상실험

제안한 방법의 성능을 고찰하기 위하여 2014년 6월 남해 거제도 인근 해역에서 해상실험을 수행하였다. 실험 해역의 수심은 약 60 m였으며, 송신기와 수신기는 각각 수심 20 m와 26 m 에 위치시켰다. 수신기는 부이에 장착하였으며, 송신기를 내린 선박은 엔진을 끄고 떠 다녔다. 실험 당일 기상 상태가 좋지 않아 풍속은 9 m/s, 파고는 2.5 m 로써 비교적 높았으며, 송수신 거리는 1~1.5 km 사이로 시간이 지날수록 가까워졌다. 송신신호는 모의실험 때와 동일한 패킷 구조를 이용하였으며, 중심 주파수 5 kHz, 표본화 주파수는 25 kHz인 4진 위상편이변조를 하였다. 모의실험과 마찬가지로 채널 부호화 기법은 적용하지 않았다. 통신신호를 송신하기 전에 변조된 m-수열을 전송하여 채널의 산란 함수를 추정하였다. 그림 4(b)에 나타난 산란 함수로부터 실험 당시 채널의 도플러 주파수는 4~7 Hz로 확인되었으며, 해수면의 거칠기 등에 의한 도플러 확산 현상을 관찰할 수 있다.

해상실험 결과 그림 5와 같이 채널 부호화를 적용하지 않은 비트 오류율을 보였다. 그림 5는 전체 길이가 1000 심볼(2000 비트)인 하나의 데이터 프레임 구간을 100 비트씩 나누어 구간별 부호화되지 않은 비트 오류율을 나타낸 것으로 데이터 구간 초반에는 오류가 없으나 시간이 갈수록 채널의 변동성으로 인하여 부호화되지 않은 비트 오류율이 증가하는 양상을 보인다. 기존의 복조방식을 이용한 그림 5 (a)의 경우 부호화되지 않은 비트 오류율은 9.45 % 를 보였으나 재귀 프레임 크기가 각각 500 심볼, 250 심볼인 경우, 그림 5 (b), (c)와 같이 기존의 복조 방식에 비해 구간

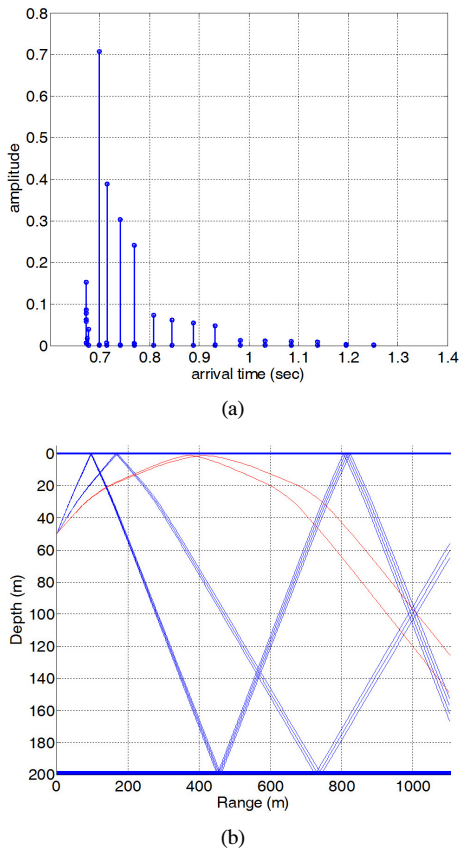


그림 3. 모의실험을 위한 채널 특성, (a) 채널응답특성, (b) 음파경로
Fig. 3. Simulation channel characteristic, (a) Channel Impulse response, (b) eigen-rays

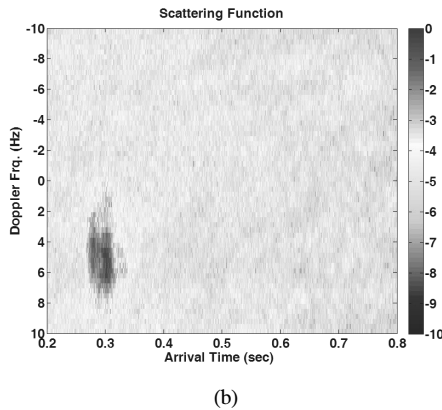
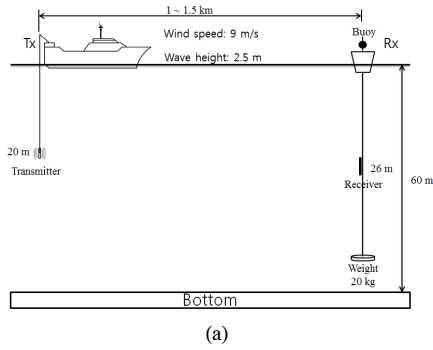


그림 4. 해상 실험 환경, (a) 실험 배치, (b) 산란 함수
Fig. 4. Experiment environment for the sea trial, (a) experimental configuration, (b) scattering function

별 비트 오류율이 감소하였으며, 전체 비트 오류율 또한 각각 7.75 %, 6.45 %로 향상된 성능을 보여 기존의 방법에 비해 약 32% 가량 부호화되지 않은 비트 오류율이 향상되었다. 또한 모의실험과 마찬가지로 250 심볼이 500 심볼에 비해 양호한 성능을 보였다.

V. 결론

이 논문은 수중음향통신 환경에서 전송효율을 높이기 위해 데이터 구간에서도 도플러 주파수 정보를 추정하고 보상하는 프레임 재귀 번복조 방식을 제안하였다. 해양환경 채널 모델링 프로그램인 VirTEX를 이용한 모의실험을 수행하였는데 이를 통해 제안한 방법이 기존의 번복조 방법에 비해 향상된 성능을 보였으며, 부 프레임 크기에 따라서도 성능이 변화하는 것을 확인하였다. 또한 프레임 초기에 오류가 발생했을 경우, 수신기내의 등화기에 영향을 미쳐 비트오류가 후반부로 확산되는 오류 전파 현상을 확인하였다. 남해에서 수행된 실제 해상실험을 통해서도 제안한 방법의 성능을 고찰하였다. 남해 수심 60 m, 송수신 거

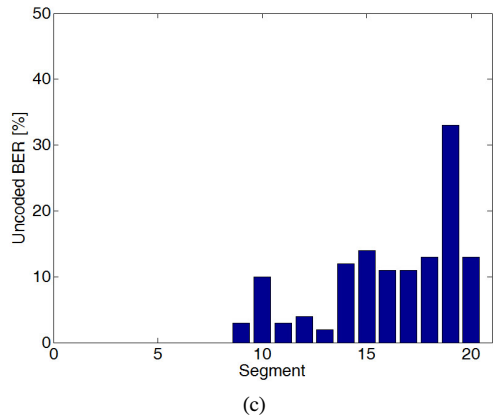
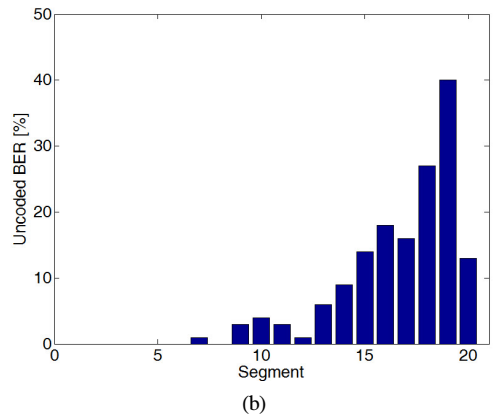
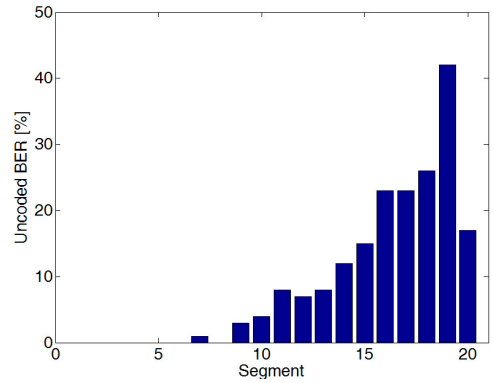


그림 5. 100 비트 당 부호화되지 않은 비트 오류율, (a) 기존의 방법, (b) 재귀 부 프레임 길이 500 심볼, (c) 재귀 부 프레임 길이 250 심볼
Fig. 5. Unencoded bit error rate per 100 bits. (a) previous method, (b) 500 symbols for recursive subframe size, (c) 250 symbols for recursive subframe size

리 1~1.5 km 환경에서 실험을 진행하였고, 변조된 m-수열을 이용하여 추정된 산란 함수를 통해 실험 당시 채널의 도플러 주파수는 4~7 Hz임을 확인하였다. 실험결과 제안한 방법이 기존의 방식보다 낮은 부호화

되지 않은 비트 오류율을 보였으며. 후반부로 갈수록 커지던 100 비트당 부호화되지 않은 비트 오류율도 줄어든 것을 확인하였다. 전체적으로 기존의 방법에 비해 약 32% 가량 비트 오류율이 향상되는 것을 확인하였다. 향후 채널 부호화 기법이 적용된다면 재귀되는 데이터의 오류율이 감소하면서 더욱 정확한 도플러 주파수 추정이 이루어질 수 있을 것으로 판단되며, 이에 대한 연구가 필요하다.

References

[1] S. Pack and S. R. Lee, "Marine disasters prediction system model using marine environment monitoring," *J. KICS*, vol. 38C, no. 3, pp. 263-270, Mar. 2013.

[2] J. H. Jeon, H. C. Cho, C. H. Kim, Y. S. Ryuh, and S. J. Park, "Design and implementation of a micro-modem for underwater acoustic communications," *J. KICS*, vol. 36, no. 4, pp. 405-411, Apr. 2011.

[3] T. D. Park, S. R. Lee, B. M. Kim, and J. W. Jung, "Analysis of an optimal iterative turbo equalizer for underwater acoustic communication," *J. KICS*, vol. 38C, no. 3, pp. 303-310, Mar. 2013.

[4] X. Lurton, *An Introduction to Underwater Acoustics: Principles and Applications*, Springer, 2002.

[5] T. C. Yang, "Measurements of temporal coherence of sound transmissions through shallow water," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 120, no. 5, pp. 2595-2614, Nov. 2006.

[6] J. Rosen and L. Q. Gothard, *Encyclopedia of Physical Science*, Facts On File, 2009.

[7] B. S. Sharif, J. Neasham, O. R. Hinton, and A. E. Adams, "Computationally efficient doppler compensation system for underwater acoustic communications," *IEEE J. Oceanic Eng.*, vol. 25, no. 1, pp. 52-61, Jan. 2000.

[8] S. Tao, "An improved frequency estimator for synchronization of PSK signals with large frequency offset," in *Proc. Int. Conf. Wirel. Commun., Netw. Mob. Comput. (WiCOM '08)*, pp. 1-3, Dalian, China, Oct. 2008.

[9] W. Zhuang, "RLS algorithm with variable

forgetting factor for decision feedback equalizer over time-variant fading channels," *Wirel. Pers. Commun.*, vol. 8, pp. 15-29, Aug. 1998.

[10] M. Siderius and M. B. Porter, "Modeling broadband ocean acoustic transmissions with time-varying sea surface," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 124, pp. 137-150, Apr. 2008.

[11] K. M. Kim, B. C. Gwon, J. W. Han, J. W. Jung, K. Son, and S. Y. Chun, "MIMO underwater communication with sparse channel estimation," *Information J.*, vol. 17, no. 6(A), pp. 2401-2409, Jun. 2014.

황 찬 호 (Chan-ho Hwang)



2013년 8월 : 한국해양대학교 전파공학과 졸업
 2013년 9월~현재 : 한국해양대학교 전파공학과 석사과정
 <관심분야> 수중통신, 음향 신호처리 등

김 기 만 (Ki-man Kim)



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