한국음향학회지 제36권 제6호 pp. 413~418 (2017)
The Journal of the Acoustical Society of Korea Vol.36, No.6 (2017)
https://doi.org/10.7776/ASK.2017.36.6.413

pISSN : 1225-4428
eISSN : 2287-3775

도플러 주파수 맵을 이용한 수중 이동 음원의 거리 추정

Range estimation of underwater acoustic moving source using Doppler frequency map

박웅진,[1] 김기만,[1†] 한민수,[2] 최재용[2]

(Woong-Jin Park,[1] Ki-Man Kim,[1†] Min su Han,[2] and Jae-Yong Choi[2])

[1]한국해양대학교 전파공학과, [2]국방과학연구소

(Received September 25, 2017; accepted November 29, 2017)

초 록: 수중 운동체의 방사소음을 측정하는 경우 음원과 수신기 사이의 거리 정보가 중요한 평가 요소이지만 GPS를 사용할 수 없다. GPS를 대신하여 음원의 거리를 찾는 방법으로써 상호 상관도를 사용하는 방법이 있다. 하지만 이는 많은 계산량을 갖는다. 본 논문에서는 상대적으로 적은 연산량을 갖는 고속 퓨리에 변환 기반의 방법을 사용하여 거리를 추정한다. 제안한 방법은 다수의 수신기에 수신되는 CW 신호로부터 고속 퓨리에 변환을 사용하여 도플러 주파수를 추정하고, 수신기 위치, 음원 수심 정보들을 이용하여 이론적으로 미리 산출된 도플러 주파수 맵을 비교하여 거리를 추정한다. 성능검증을 위해 모의 및 호수실험을 수행하였다.

핵심용어: 도플러 주파수, 음원 거리 추정, CW 신호, 고속 퓨리에 변환, 호수실험

ABSTRACT: When measuring the radiated noise of an underwater vehicle, range information between acoustic source and receiver is an important evaluating factor, but it cannot use GPS. There is a method of using the cross correlation for finding the range of the acoustic source instead of the GPS. However, this method has heavy computational loads. This paper proposes a fast Fourier transform based method with a relatively small amount of computation to estimate the range of a source. The proposed method estimates Doppler frequencies of CW signals received at multiple receivers by fast Fourier transform and estimates the source range by comparing theoretical Doppler frequencies map previously calculated by a receiver position and source depth information. Simulation and lake trial were performed to verify the performance.

Keywords: Doppler frequency, Source range estimation, CW signal, Fast Fourier transform, Lake trial

PACS numbers: 43.60.Jn, 43.30.Vh, 43.30.Xm

I. 서 론

지난 수십년 동안 수중에서 움직이는 음원의 위치를 추정하기 위한 많은 연구가 이루어져 왔다.[1,2] 그런데 최근에는 일반적인 표적 탐지뿐만 아니라 근접장에서 수중 운동체로부터 방사되는 소음을 측정하여 분석하는 분야에서도 소음 수준이 전달 거리와 밀접한 관계를 갖고 있기 때문에 음원까지의 거리 정보를 필요로 한다. 하지만 수중에서는 GPS 신호를 직접 수신할 수 없기 때문에 전파 측위가 어렵지만 일반적인 소나 탐지 분야와는 다르게 방사 소음 측정을 목적으로 하는 경우 측정 조건 규격이 정해져 있어 음원의 이동 경로나 속도 등의 정보는 사전에 알고 있다. 음원까지의 거리를 추정하는 방법에는 음원으로부터 방사되는 신호가 다른 위치에 있는 수신기들에 도달하면서 발생하는 도달 시간차를 이용하거나 미리 설계된 능동신호를 트랜스폰더를 통해 방출한 뒤 송신단과 시간동기가 이루어진 수신단에서 수신한 신호와 송신신호 사이의 상호 상관도를

†**Corresponding author:** Ki-Man Kim (kimkim@kmou.ac.kr)
Korea Maritime and Ocean University, 727 Taejong-Ro, Yeongdo-ku, Busan 49112, Republic of Korea
(Tel: 82-51-410-4918, Fax: 82-51-404-3986)
"이 논문은 2017년 한국음향학회 수중음향학 학술발표회에서 발표하였던 논문임."

구하여 도달 시간을 측정하는 방법 등이 있다.[3,4] 하지만 도달 시간차를 이용하는 방법은 수신되는 소음의 상관 특성이 성능에 많은 영향을 미치며, 특히 도달 시간차 추정에 오차가 발생한 경우 거리 정보에 더 큰 오류를 가져온다. 도달 시간을 측정하는 경우에는 높은 정밀도를 갖는 시간동기화 과정과 함께 음원의 이동성으로 인하여 발생하는 도플러 현상을 고려하여 상호 상관도를 구하기 때문에 상대적으로 많은 계산을 수행해야 하는 어려운 점이 있다.

이 논문에서는 근접장에서 이동하는 수중 음원의 거리를 추정함에 있어 CW 신호를 송신하는 능동형을 고려하되 수신 신호와의 상호 상관을 이용한 거리추정 기법을 사용하지 않는 대신 상대적으로 적은 계산량을 갖는 방법을 연구하였다. 트랜스폰더로부터 방출된 CW 신호는 음원의 움직임으로 인해 수신된 신호에서는 도플러 효과가 발생하고, 도플러 주파수는 지상에서 전파의 속도에 비해 물속에서의 느린 음속 때문에 비교적 큰 도플러 주파수가 생기게 된다. 이렇게 수중 근접 표적으로부터 발생되는 도플러 천이된 신호를 다수의 수신기에서 고속 퓨리에 변환 방법으로 도플러 주파수를 추정하고, 추정된 도플러 주파수의 비율과 수신기 위치, 음원의 수심 등의 사전 정보들을 이용하여 이론적으로 산출된 도플러 주파수 맵과 비교하여 가장 작은 오차를 갖는 경우에 대해 음원 위치로 추정한다. 제안한 방법의 성능을 고찰하기 위하여 수중 채널 전달 모델에 기반한 모의실험과 함께 호수실험을 수행하여 타당성을 제시하였다.

II. 제안한 방법

수중 이동체에서 송신하는 CW 신호는 중심주파수 f_c에서 Eq. (1)과 같다.

$$s(t) = \exp(j2\pi f_c t). \tag{1}$$

Fig. 1과 같이 송신신호가 단방향으로 전송되면서 도플러 천이되어 수신된 신호는 Eq. (2)와 같이 표현된다.[5]

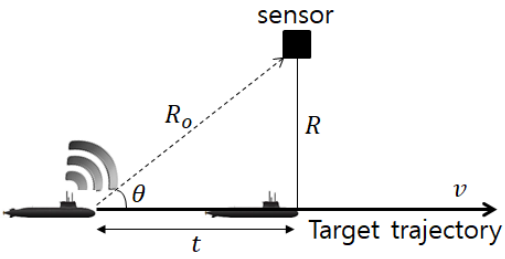

Fig. 1. Geometric structure between a receiver and source.

$$x(t) = A\exp\left[j2\pi f_c\left(t+\frac{R}{c}\right)\right]+g(t),$$
$$R = R_o + vt\cos\theta, \tag{2}$$

여기서 A는 송수신단 사이의 거리에 따르는 감쇄, c는 음속, $g(t)$는 백색 가우시안 첨가 잡음, R_o는 이동체의 $t=0$에서의 거리이고, R은 $t=t_c$에서의 거리이다. Eq. (2)를 정리하면,

$$x(t) = \exp\left[j2\pi\left(f_c + f_c\frac{v}{c}cos\theta\right)t + \frac{2\pi f_c R_o}{c}\right]. \tag{3}$$
$$+g(t)$$

Fig. 1에 나타낸 고정된 단일 센서와 이동체간의 기하학적 모델에서 이동체의 속도 v에 의해 발생한 도플러 주파수는 Eq. (4)와 같다.

$$f_d = f_c\frac{v}{c}cos\theta. \tag{4}$$

Fig. 1은 수평면 상에서의 구조를 표현한 것이며, 도플러 주파수는 수직면 상에서도 수신기와 음원 사이의 상대적인 위치에 따라 변화한다. 이동체로부터

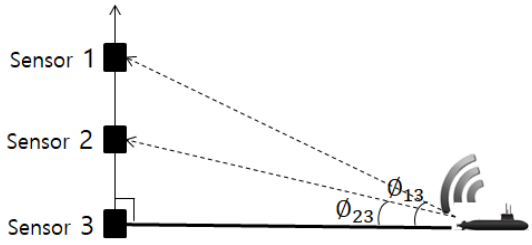

Fig. 2. Geometric structure of Doppler frequencies for multiple receivers.

수직으로 배열된 다수의 수신기로 전달된 신호의 도플러 주파수의 기하학적 모델을 Fig. 2에 나타내었다. 그림에서 ϕ_{13}과 ϕ_{23}은 음원과 수신기 Sensor 3이 이루는 평면을 기준으로 음원과 다른 수신기들 사이의 각도를 의미한다.

수신기 Sensor 3이 음원과 같은 수심에 있고, 도플러 주파수를 f_{d3}라고 했을 때, 수신기 Sensor 2와 수신기 Sensor 1에서의 도플러 주파수는 다음과 같다.

$$f_{d2} = f_{d3}\cos\phi_{23},$$
$$f_{d1} = f_{d3}\cos\phi_{13}. \quad (5)$$

Eq. (5)에 Eq. (4)를 대입하여 이론적으로 각 수신기에서 관찰되는 도플러 주파수를 산출할 수 있다.

$$f_{d3} = f_c\frac{v}{c}cos\theta,$$
$$f_{d2} = f_c\frac{v}{c}cos\theta\cos\phi_{23},$$
$$f_{d1} = f_c\frac{v}{c}cos\theta\cos\phi_{13}. \quad (6)$$

본 논문에서는 도플러 주파수를 추정하기 위해 CW 신호를 사용하였지만 주파수 변조된 광대역 신호를 사용하거나 변형된 퓨리에 변환을 적용할 수 있다.[6] 음원으로부터 방출된 CW 신호는 음원의 움직임으로 인해 도플러 천이가 발생하고, 수신된 신호를 간단한 고속 퓨리에 변환 처리하여 도플러 주파수를 추정한다. 또한 사전에 알고 있는 수신기 위치, 이동체의 속도, 이동경로 정보들을 이용하여 관심 영역내의 임의의 위치에서 Eq. (6)을 이용하여 이론적으로 미리 산출된 도플러 주파수들로 맵을 구성한다. 이렇게 구성된 맵과 수신된 데이터로부터 추정된 도플러 주파수를 비교하여 가장 작은 오차를 나타내는 지점을 음원의 위치로 추정하는데 이 과정을 Fig. 3의 블록도로 표현하였다. 따라서 고속 퓨리에 변환만 계산함으로써 계산량이 상대적으로 적고, 별도의 시간동기화 과정이 필요하지 않다. 도플러 주파수 추정에 사용되는 고속 퓨리에 변환 처리 길이에 따라 도플러 주파수 추정 해상도가 결정되며, 이를 Fig. 4에 나타내었다. 그림은 1 s 길이의 고속 퓨리에 변환 처리를 이용하는 경우 주파수 해상도가 약 6 Hz로 나타나며, 4 s 길이를 사용하면 약 2 Hz가 되는 것을 보여준다.

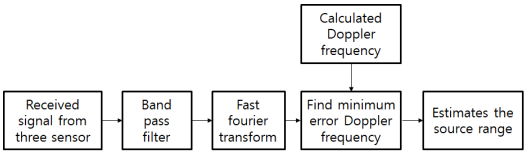

Fig. 3. Block diagram of the proposed algorithm.

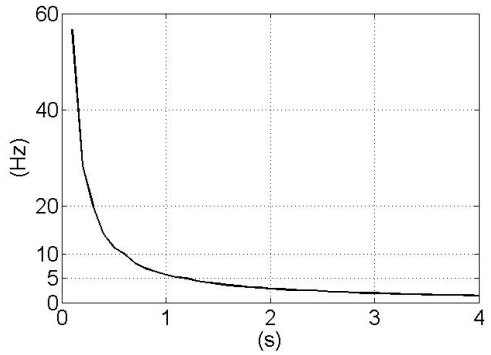

Fig. 4. Doppler frequency resolution according to FFT size.

III. 모의실험 및 결과

제안한 방법의 성능을 확인하기 위해 실제 해양에서 측정된 음속 분포를 VirTEX(Virtual Time series Experiment) 수중 채널 모델링 시뮬레이터에 적용하여 모의 수중 채널을 생성하여 모의실험을 수행하였다.[7] VirTEX는 미국 스크립스 해양 연구소가 개발하여 공개한 벨합(Bellhop) 기반 수중 채널 모델링 프로그램이다. 모의실험 환경은 Fig. 5와 같이 2010년 2월 동해에서 획득한 음속 분포 정보를 적용하였고, 수심은 400 m이면서 해저면은 평탄하다고 가정하였다. 3개의 수신기는 각각 수심 20 m, 40 m, 80 m에 배치하였으며, 송신기는 수심 80 m에 위치하여 이동한다고 가정하였다. 송수신기간의 거리는 가장 근접한 CPA(Closest Point of Approach) 지점의 거리를 50 m로 하였고, 이 기준점으로부터 송신기를 0 m에서 80 m까지 10 m/s의 속도로 이동한 것으로 가정하였다. 송신신호는 중심 주파수가 30 kHz인 1 s 길이의 CW 신호를 사용하였다.

모의실험에 적용한 음속 구조와 송신기의 위치가 수평면에서 CPA 점으로부터 80 m거리에 위치하였을 때 수심 80 m에 위치한 수신기에서의 채널응답특성을 Fig. 6에 나타내었다. 채널응답특성은 직접 전달 경로와 해수면으로 반사된 간접 전달 경로가 나타나는 것을 보여주며, 수신기 위치마다 약간의 시간차가 발생하는 것 이외에는 비슷한 형태를 보였다.

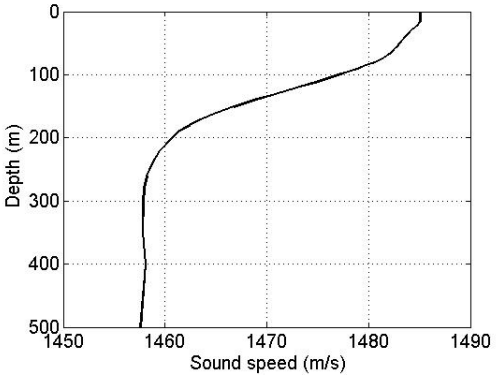

Fig. 5. Sound velocity profile for simulation.

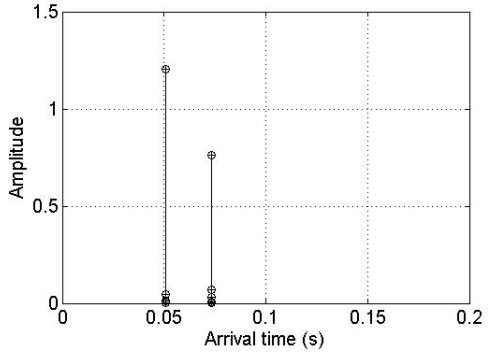

Fig. 6. Channel response characteristic for simulation.

Table 1. Simulation results.

Transmitter location (m)	Error (%)
0 (CPA)	0
10	5.6406
20	2.0651
30	3.5602
40	2.9840
50	4.0415
60	2.9935
70	2.5312
80	2.2378

신호 대 잡음비를 0 dB로 하여 각각 100회 반복한 모의실험 결과 송신기의 위치에 따라 수신된 CW신호를 고속 퓨리에 변환 처리하여 추정한 도플러 주파수의 오차를 Eq. (7)과 같은 식으로 구하고, 100회 반복한 평균값을 Table 1에 나타내었다.

$$e = \frac{|f_{d,c} - f_{d,e}|}{f_{d,c}} \times 100\,[\%]. \tag{7}$$

모의실험으로부터 수신된 도플러 천이된 신호와 이론적으로 산출된 도플러 주파수 값의 오류가 약 5 % 이내였으며, 도플러 주파수 값의 오차는 평균 약 2.9 %로 나타났다.

IV. 호수실험 및 결과

제안한 방법의 성능을 고찰하기 위하여 2017년 8월 경상북도 문경시 경천호에서 실제 실험을 수행하였는데 실험 당시 기상은 강한 비가 내리는 상태였다. 실험이 진행된 수역의 수심은 약 30 m ~ 40 m였으며, 장비 운용의 문제로 인하여 하나의 수신기만을 사용하여 깊이 약 10 m에 위치시켰다. 송신기는 예인 보트에서 로프에 매달아 일정한 속도로 기동하면서 수심 약 10 m 정도가 유지되도록 하였는데 송신기에는 측심기를 부착하여 기동하는 동안의 수심 정보를 기록하도록 하였다. 보트에는 GPS 수신기를 장착하였으며, 기동 정보는 실시간으로 전달되어 저장되었다. CPA 지점에서 송수신단 사이의 거리는 약 40 m 정도가 유지되도록 하였다. 중심 주파수 30 kHz의 연속 CW 신호가 지속적으로 송신되었으며, 부이에 달린 수신

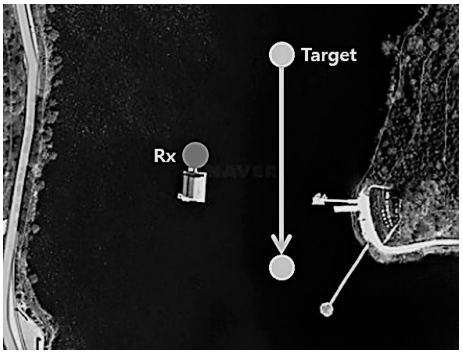

Fig. 7. Environment for lake trial.

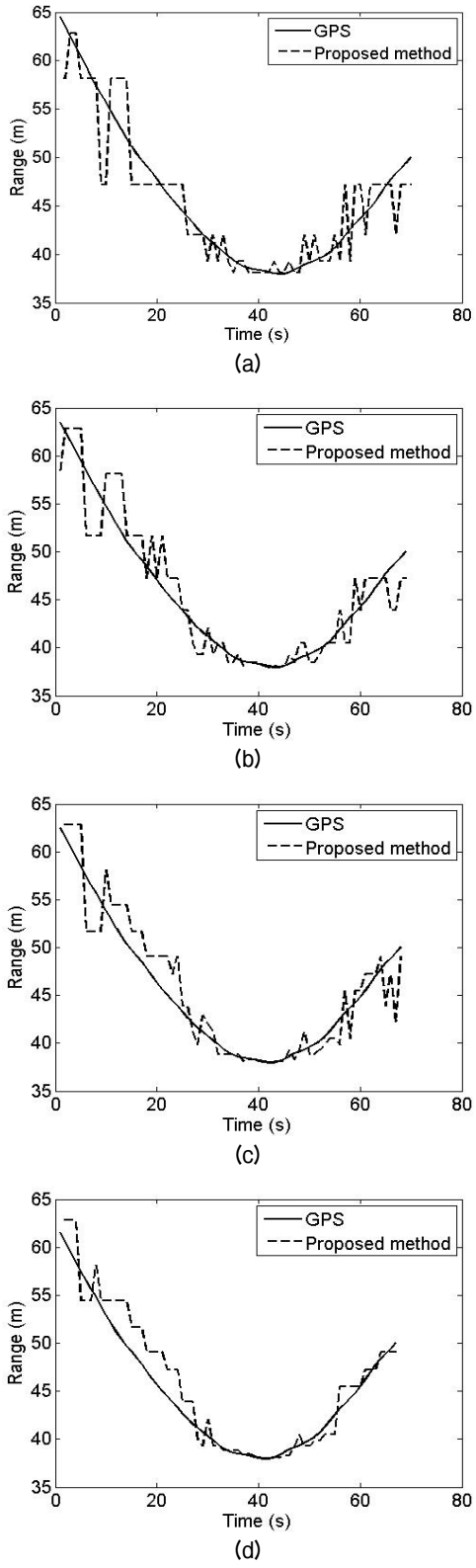

Fig. 8. Ranging results using the measured Doppler frequency, (a) FFT-size : 1 s, (b) FFT-size : 2 s, (c) FFT-size : 3 s, (a) FFT-size : 4 s.

을 위한 하이드로폰으로써 B&K 8106 모델이 사용되었다. 컨디셔닝 증폭기를 거친 수신 신호는 130 kHz의 샘플링 주파수로 저장되었다. 실험 환경은 Fig. 7에 나타내었다.

수신된 CW 신호는 1 s, 2 s, 3 s, 4 s 길이의 고속 퓨리에 변환 크기로 각각 도플러 주파수를 추정하였고, 이렇게 추정된 도플러 주파수와 미리 계산된 도플러 주파수 맵을 비교하여 송신기까지의 거리를 추정하였다. 매 순간마다 추정된 음원의 거리를 보트에 장착된 GPS 정보와 비교하여 Fig. 8에 나타내었다.

Fig. 7에 나타낸 결과와 같이 수신 데이터로부터 추정된 도플러 주파수와 이론적으로 계산된 도플러 주파수 맵을 비교하여 거리를 추정한 결과는 송수신기 사이의 거리가 가장 가까운 CPA 지점에서 GPS 정보와 가장 비슷한 결과를 나타내고 고속 퓨리에 변환 크기가 길수록 거리 추정의 해상도가 높아지면서 짧은 고속 퓨리에 변환 크기를 사용하여 거리를 추정한 결과보다 좋은 성능을 보여준다. 송신기가 이동한 궤적이나 속도가 도플러 주파수 맵을 계산할 때 적용한 값과 정확히 일치하지 않은 부분과 좋지 않았던 기상 상태 등이 오차의 원인으로 판단된다.

V. 결 론

본 논문에서는 근접장에 위치한 수중 이동 음원의 거리 추정을 위해 음원의 대략적인 이동 경로 및 속도 등의 사전 정보를 이용하여 미리 산출한 이론적인 도플러 값들과 측정된 도플러 값을 비교하는 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 계산량이 상대적으로 적고, 시간 동기화 과정이 필요하지 않아 간단하게 구현할 수 있다. 도플러 주파수 추정을 위해 CW 신호와 고속 퓨리에 변환 방법을 사용하였고, CW 신호의 길이에 따라 도플러 추정 오차가 발생하기 때문에 원하는 추정 해상도를 위해서는 고속 퓨리에 변환 블록 길이의 조절이 필요하다. 모의 및 호수실험을 통하여 제안한 방법으로 추정한 거리 값과 GPS로 측정한 이동 표적의 위치를 비교하여 성능을 입증하였다. 향후에는 보다 정밀한 도플러 주파수 추정을 위해 CW 신호가 아닌 광대역 의사 잡음 신호와

상호 상관도를 적용할 필요성이 있다.

감사의 글

본 연구는 국방과학연구소의 연구비 지원(과제번호 : UE170014DD)으로 이루어졌음.

References

1. G. Carter, “Time delay estimation for passive sonar signal processing.” IEEE Trans. Acoustics, Speech, and Signal Processing, **29**, 463-470 (1981).
2. D. H. Chang, H. B. Park, S. I. Kim, J. H. Ryu, and G. T. Kim, “Matched-target model inversion for the position estimation of moving targets,” (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **22**, 562-572 (2003).
3. X. Li, Z. D. Deng, L. T. Rauchenstein, and T. J. Carlson, “Source-localization algorithms and applications using time of arrival and time difference of arrival measurements,” Review of Scientific Instrument, **87**, 1-12 (2016).
4. R. K. Otines, “Frequency difference of arrival,” IEEE Trans, Acoust, Speech Signal Process, **37**, 306-308, Feb. (1989).
5. R. O. Nielson, *Sonar Signal Processing* (Artech House, Inc, Norwood, 1991), pp. 187-229.
6. S. W. Hyung, M. H. Park, S. B. Hwang, and K. S. Bae, “Estimation of target distance based on fractional Fourier transform analysis of active sonar linear frequency modulation signals,” (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **35**, 8-15 (2016).
7. *A fast algorithm for computing doppler introduced by sea surface gravity waves*, http://oalib.hlsresearch.com/Rays/Vir TEX/VirTEX_Talk.pdf.

저자 약력

▸ 박 웅 진 (Woong-Jin Park)

2017년 2월: 한국해양대학교 전파공학과 (공학사)
2017년 3월 ~ 현재: 한국해양대학교 전파공학과 석사과정
<관심분야> 소나 신호처리, 어레이 신호처리, 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> 어레이 신호처리, 수중통신, 소나 신호처리 등

▸ 한 민 수 (Min su Han)

2011년 2월: 한국해양대학교 전파공학과 (공학사)
2013년 2월: 한국해양대학교 전파공학과 (공학석사)
2013년 4월 ~ 현재: 국방과학연구소 연구원
<관심분야> 방사소음 측정, 소나 신호처리, 수중음향통신 등

▸ 최 재 용 (Jae-Yong Choi)

1994년 2월: 경북대학교 전자공학과(공학사)
1996년 2월: 경북대학교 전자공학과(공학석사)
2015년 3월 ~ 현재: 한국해양대학교 전파공학과 박사 과정
1996년 2월 ~ 현재: 국방과학연구소 책임연구원
<관심분야> 방사소음 측정, 소나 신호처리 등