

다중 경로 신호의 도달 주파수 차를 이용한 수중 이동 음원의 거리 추정

Range estimation of underwater moving source using frequency-difference-of-arrival of multipath signals

박웅진,¹ 김기만,^{1†} 손윤준²

(Woong-Jin Park,¹ Ki-Man Kim,^{1†} and Yoon-Jun Son²)

¹한국해양대학교 전파공학과, ²국방기술품질원

(Received September 17, 2018; accepted March 26, 2019)

초 록: 수중 이동 음원의 방사 소음을 측정하는 경우 음원과 수신기 사이의 거리 정보가 중요한 평가 요소이며, 수신기 위치, 음원의 수심 및 속도 등과 같이 측정 규격이 정해져 있다. 이동하는 수중 음원의 거리를 찾는 방법으로써 상호 상관도를 사용하는 방법이 있지만 이 방법은 송신기와 수신기 사이의 시간 동기화 과정을 필요로 한다. 본 논문에서는 이론적으로 계산된 다중 경로 신호 사이의 도달 주파수 차와 수신 신호에서 추정된 다중 경로 신호의 도달 주파수 차를 비교하여 거리를 추정하는 방법을 제안한다. 기존의 방법과는 다르게 제안한 방법은 시간 동기화 과정이 필요하지 않다. 성능 검증을 위해 모의실험을 수행하였으며, 거리 오차가 기존의 방법에 비해 약 95 % 감소하였다.

핵심용어: 음원 거리 추정, 도플러 주파수, 도달 주파수 차, 다중 경로 전달

ABSTRACT: When measuring the radiating noise of an underwater moving source, the range information between the acoustic source and the receiver is an important evaluation factor, and the measurement standards such as a receiver position, a moving source depth and a speed are set. Although there is a method of using the cross correlation as a method of finding the range of the underwater moving source, this method requires a time synchronization process. In this paper, we proposed the method to estimate the range by comparing the Doppler frequency difference of the theoretically calculated multipath signal with the Doppler frequency difference of the multipath signal estimated from the received signal. The proposed method does not require a separate time synchronization process. Simulations were performed to verify the performance, and the ranging error of the proposed method reduced by about 95 % than that of the conventional method.

Keywords: Source range estimation, Doppler frequency, Frequency difference of arrival, Multipath propagation

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

1. 서 론

수중에서 일반적인 표적 탐지뿐만 아니라 근거리에서 수중 음원으로부터 방사되는 소음을 측정하고 분석하는 분야에서도 소음 수준이 전달 거리와 밀접한 관계를 갖고 있기 때문에 음원과 측정 지점까지의 정확한 거리 정보를 필요로 한다.

지금까지 수중에서 기동하는 음원을 탐지하기 위한 방법으로 소나가 가장 효과적인 것으로 알려져 있다.^[1] 소나를 이용하여 음원을 탐지하는 방법 중 수동형 소나는 음원으로부터 방사된 신호를 이용하여 위치를 추정하는 방법이다. 소나는 두 개 이상의 공간적으로 분리된 센서들을 이용하여 도달 시간 (Time-of-Arrival, TOA)이나 시간차, 도래 각, 공간영역 상관도 등을 이용하여 음원의 위치를 추정할 수 있다.^[2-4] 이 가운데 도달 시간을 이용한 음원 위치 추

†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)

정 방법은 미리 설계되어 음원으로부터 방사되는 능동 신호를 송신단과 시간적 동기가 이루어진 수신단에서 수신한 신호와 상호 상관도를 구하여 도달 시간을 측정하는 방법이다. 이 기법은 정확한 도달 시간을 추정하기 위해 높은 샘플링 주파수가 필요하며, 다중 경로 전달과 해수면의 큰 시변동성 등의 문제로 인하여 정확한 도달 시간을 추정하기 어려운 문제를 갖고 있다.

본 논문에서는 근접 영역에 있는 수중 음원의 이동 경로나 속도 등의 정보를 알고 있는 상황에서 수중 음원의 위치를 추정하는 방법을 제안한다. 트랜스듀서를 통해 방출된 신호는 수중 음원의 움직임으로 인해 도플러 효과가 발생하게 되고, 수중 채널 전달 특성에 의해 다중 경로 전달 현상이 생기게 된다. 이때 다중 경로 전달 신호들은 고정되어 있는 수신기 관점에서 입사각이 다르기 때문에 다른 도플러 주파수를 갖게 되므로 이 도달 주파수들의 차이를 추정하고 측정 조건 규격의 정보들에 의해 계산되어진 도달 주파수 차이와 비교하여 수중 음원의 위치를 추정하는 방법을 제안한다. 수신된 신호의 도플러 주파수 추정을 위한 방법은 서로 다른 도플러 주파수에 대응하는 정합필터뱅크를 구성하고 수신된 신호를 각 정합필터에 통과시켜 가장 큰 에너지 값을 갖는 정합필터 출력을 찾아 도플러 주파수를 추정하는 모호 함수 기법을 사용한다. 제안한 방법의 성능을 고찰하기 위하여 수중 채널 전달 모델 기반의 모의실험을 수행하여 타당성을 제시하였다.

II. 모호 함수 기반의 도플러 주파수 추정

시간 및 도플러 주파수 관점에서 소나 신호처리의 출력을 나타내는 2차원 상관함수인 모호 함수를 이용하여 도플러 주파수를 추정한다. 송신 파형에 따라 모호 함수는 고유한 특성을 갖기 때문에, 본 논문에서는 PN 신호를 이용하여 수신 신호의 도플러 주파수를 추정한다. 모호 함수는 서로 다른 도플러 주파수에 대응하는 송신 신호의 복제된 형태의 정합필터의뱅크를 구성하고 수신된 신호를 각 정합필터에 통과시켜 가장 큰 에너지를 가지는 값을 갖는 정합필터 출력을 찾아 도플러 주파수를 추정하는 방법

이다. 이 방법은 도플러 주파수 추정 값의 정확도가 정합필터 수에 비례하기 때문에 정확한 값을 찾기 위해서는 정합필터의 해상도와 개수가 늘어나야 한다. 정합필터 출력 식은 다음과 같다.^[5]

$$\int_{-\infty}^{\infty} y(t) s^*(t-\tau) dt \tag{1}$$

$$= \int_{-\infty}^{\infty} s [(1-\delta)t-\tau_0] s^*(t-\tau) dt,$$

여기서 $s(t)$ 는 송신 신호이고, $y(t)$ 는 수신 신호, $\delta = \frac{v}{c}$ 는 단방향 전송에 있어서 시간 압축 인수, τ_0 는 시간 지연이다. 이때, v 는 상대 속도, c 는 수중 음파의 속도이다. δ 에 의해 압축 또는 신장되고, 거리에 따라 송신 시점부터 τ_0 만큼 시간 지연된다. Eq. (1)은 τ 와 δ 의 함수가 되는데 $\tau = \tau_0$, $\delta = 0$ 로 완전히 정합되었을 때 최대값을 갖게 된다. Eq. (1)의 크기 혹은 크기의 제곱을 모호 함수라고 하며, 아래의 식과 같다.

$$|\Psi(\tau, \delta)| = \left| \int_{-\infty}^{\infty} s [(1-\delta)t] s^*(t-\tau) dt \right|. \tag{2}$$

$s(t)$ 가 협대역 신호라면 도플러 효과는 주파수 천이로 근사시킬 수 있으므로, 위 Eq. (2)에서 수신 신호의 모양은 그대로 두고 시간 압축 인수인 δ 에 관한 항을 도플러 주파수 천이 항으로 표현하면 아래의 식과 같다.

$$|\Psi(\tau, \nu)| \tag{3}$$

$$= \left| \int_{-\infty}^{\infty} s(t) s^*(t-\tau) \exp(j2\pi\delta f_0 t) dt \right|$$

$$= \left| \int_{-\infty}^{\infty} s(t) s^*(t-\tau) \exp(j2\pi\nu t) dt \right|.$$

위 식에서 f_0 는 신호의 중심 주파수 또는 변조되었을 때의 전송 주파수이며, $\nu = \delta f_0$ 는 도플러 주파수이다. Eq. (3)은 수신 신호와 정합필터뱅크의 켈레복소수를 곱한 후 Fourier 변환한 형태를 갖는다. 시간 지연 및 도플러 천이가 없는 경우 모호 함수의 결과는 입력 신호와 정합필터뱅크의 파형이 똑같은 때인 $\tau = \tau_0$, $\delta = 0$ 에서 최대값을 갖는다. Fig. 1과 같이

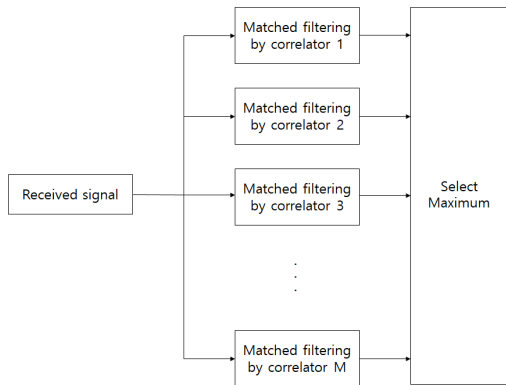


Fig. 1. Structure of matched filter bank.

수신된 신호와 서로 다른 도플러 주파수에 대응하는 송신 신호의 복제된 정합필터 बैं크의 출력들 중 최대값을 가지는 정합필터 बैं크의 정보를 통해 수신된 신호의 도플러 주파수를 추정할 수 있다.

III. 제안한 방법

도플러 주파수는 음원과 수신기의 상대속도에 따라 신호의 주파수가 달라지는 현상으로 속도 v 로 이동하는 이동체로부터 단방향으로 전송된 송신신호가 고정된 단일 센서로 수신되면서 발생하는 도플러 주파수는 아래 Eq. (4)와 같고, 그 구조를 Fig. 2와 같이 표현한다.

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

직접 전달 신호의 도플러 주파수는 Eq. (4)와 같이 구해지며 상대적으로 깊은 수심으로 인한 해저면 반사를 무시할 수 있다고 하였을 때 평평하다고 가정되어진 해수면으로부터 반사되어 수신되는 신호의 도플러 주파수는 Fig. 3과 같은 구조에서 다음과 같이 표현할 수 있다.^[6,7]

$$f_{d, \text{second}} = f_d \cos\Phi_2, \tag{5}$$

여기서 Φ_2 는 해수면을 맞고 수신기로 들어오는 각도를 나타낸다. $\cos\Phi_2$ 의 값은 Fig. 3에 음영으로 표시된 것과 같이 Φ_2 의 같은 각을 이루고 있는 두 개의 삼

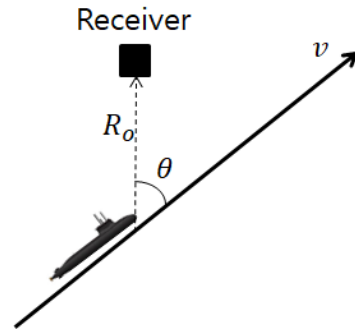


Fig. 2. Geometry structure between a receiver and source.

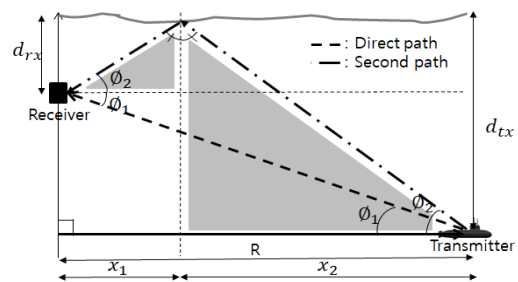


Fig. 3. Geometry structure of multipaths.

각형 비율을 이용하여 x_1, x_2 를 아래와 같이 구할 수 있고 x_1, x_2 를 이용하여 $\cos\Phi_2$ 를 구할 수 있다.

$$x_1 = \frac{d_{rx}}{d_{tx} + d_{rx}} R, \tag{6}$$

$$x_2 = \frac{d_{tx}}{d_{tx} + d_{rx}} R.$$

$$\Phi_2 = \tan^{-1} \frac{d_{rx}}{x_1}, \tag{7}$$

$$\cos\Phi_2 = \cos\left(\tan^{-1} \frac{d_{rx}}{x_1}\right).$$

구해진 $\cos\Phi_2$ 를 이용하여 Eq. (5)의 해수면 반사파 신호의 도플러 주파수는 직접 전달 신호의 도플러 주파수에 $\cos\Phi_2$ 를 곱하여 아래와 같이 산출할 수 있다.

$$f_{d, \text{second}} = f_d \cos\left(\tan^{-1} \frac{d_{rx}}{x_1}\right). \tag{8}$$

본 논문에서는 제안하는 수중 이동 음원의 거리를 추정하는 방법의 과정을 Fig. 4에 나타내었다. 제안

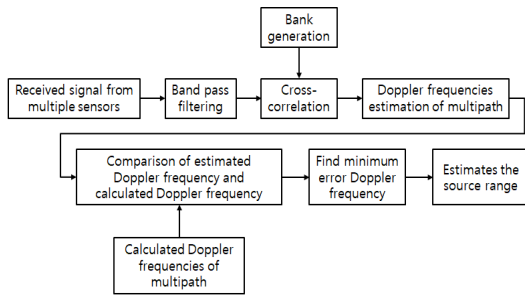


Fig. 4. Flow of the proposed method.

하는 방법은 사전에 미리 설계된 PN 신호를 수중 이동체에 부착된 트랜스듀서로부터 방출한다. 음원의 움직임으로 인해 도플러 천이가 발생하는 환경에서 수중 채널에 의해 직접 전달 신호와 해수면 반사 신호가 수신된다. 수신된 신호들은 대역 통과 필터를 거친 후 앞서 언급한 2장의 모호 함수 방법을 이용하여 다중 경로 신호들의 도플러 주파수를 각각 추정하고 사전에 알고 있는 수신기 위치, 음원의 이동 속도, 이동 경로 정보들을 이용하여 관심 영역내의 임의의 위치에서의 다중 경로에 대한 도플러 주파수를 계산한 값과 비교하여 가장 작은 오차를 나타내는 지점을 찾고 계산되어진 도플러 주파수를 이용한 거리 값을 음원의 위치로 추정한다. 제안한 방법은 별도의 시간 동기화 과정이 필요하지 않고, 도달 시간 추정 방법과 같이 도플러 주파수 보정이 없는 위치 추정 방법에 비해 이동하는 표적에 대한 도플러 주파수를 추정하는 방법이기 때문에 음원의 위치 추정 성능은 기존의 방법보다 안정적이다.

IV. 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.¹⁸⁾ VirTEX는 미국 스크립스 해양 연구소가 개발하여 공개한 Bellhop 기반 수중 채널 모델링 프로그램이다. 모의실험 환경은 Fig. 5와 같이 실제 동해에서 측정된 음속 구조를 적용하였다. 이때 수심은 500 m이면서 해저면과 해수면은 평탄하다고 가정하였다. 모의실험에 사용된 수신기는 3개로 각각 수심 30 m, 40

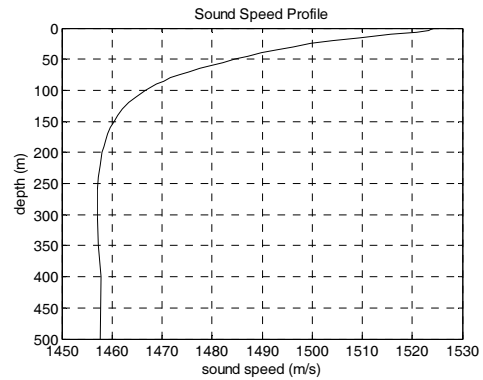


Fig. 5. Sound speed profile for simulation.

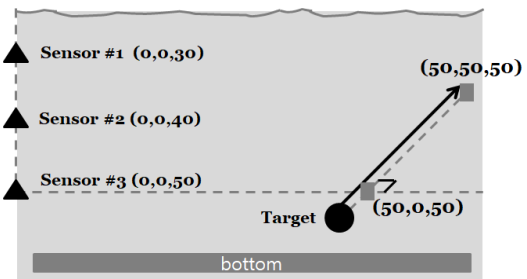


Fig. 6. Setup for simulation.

m, 50 m에 배치하였으며, 송신기는 수심 50 m에 위치하여 이동한다고 가정하였고 실험 환경은 Fig. 6에 나타내었다. 송수신기 사이의 거리는 소스가 수신기에 가장 근접한(CPA) 거리인 50 m로 하였고, 이 기준점으로부터 송신기를 0 m에서 50 m까지 5 m/s의 속도로 이동한 것으로 가정하였다. 송신신호의 중심 주파수는 30 kHz의 PN 신호를 사용하였고, 송신신호의 대역폭은 1 kHz와 2 kHz를 사용하였다.

1 kHz 대역폭의 PN 신호를 송신기가 CPA 지점에서 30 m에 위치해 있을 때 모의실험의 모호 함수 결과를 Fig. 7에 나타내었다. 모호 함수의 결과로부터 모의실험의 채널 특성인 다중 경로 신호의 존재와 송신기의 이동으로 인한 도플러 주파수 값을 추정할 수 있다. Eqs. (4)와 (5)에 의해 이론적으로 산출된 도달 주파수의 차이는 첫 번째 센서는 20.0012 Hz, 두 번째 센서는 23.1367 Hz, 세 번째 센서는 25.5335 Hz로 산출되었고 모호 함수의 결과로부터 추정된 도달 주파수의 차이는 첫 번째 센서는 19 Hz, 두 번째 센서는 23 Hz, 세 번째 센서는 25 Hz로 추정되었다. 이로부터 이론적으로 산출된 도달 주파수 차이와 모호 함수로

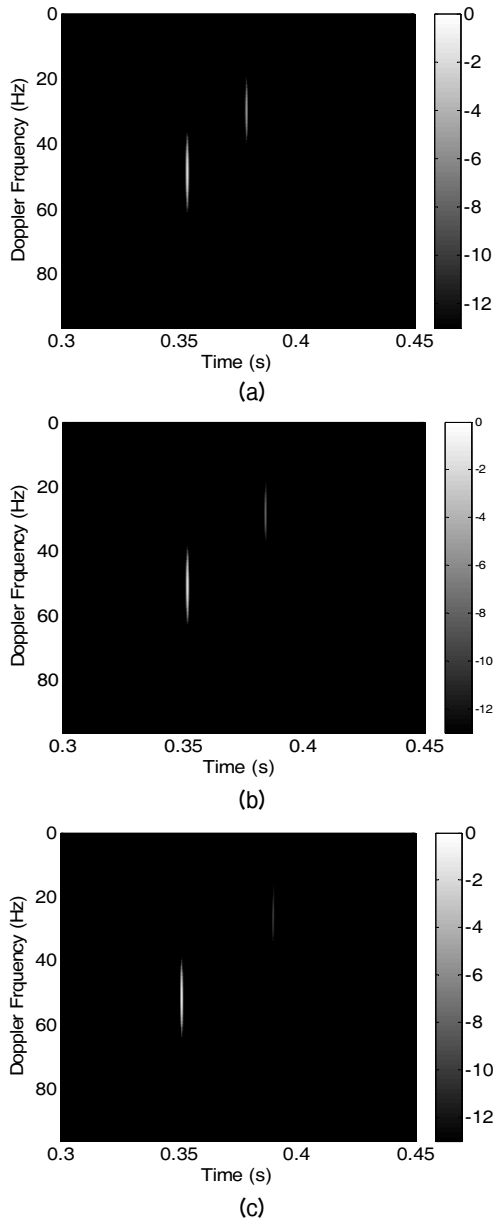


Fig. 7. Ambiguity function, (a) 1st receiver, (b) 2nd receiver, and (c) 3rd receiver.

부터 추정된 도달 주파수 차이가 1 Hz 이하인 것으로 확인할 수 있다.

상관함수를 이용하여 거리를 추정하는 기존의 도달 시간 추정 방법과 제안한 방법의 성능을 비교한 결과를 PN 신호의 대역폭에 따라 Fig. 8에 나타내었다. 이동하는 표적의 도플러 주파수를 추정하지 않는 기존의 도달 시간 추정 방법의 성능은 안정적이지 않고 변동성으로 인하여 큰 오차가 발생하는 것

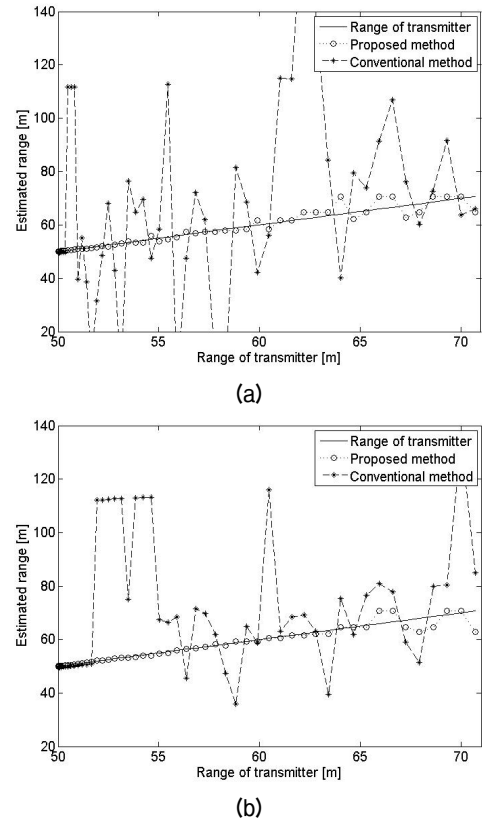


Fig. 8. Comparison of range estimation performances. (a) Bandwidth: 1 kHz, and (b) bandwidth: 2 kHz.

을 확인할 수 있다. 반면에 제안한 방법의 거리 추정 방법은 오차가 적고 안정적으로 표적의 거리를 추정하는 것을 확인할 수 있다. 그러나 제안한 방법은 거리가 멀어질수록 다중 경로 신호들 사이의 도플러 주파수 차이가 작아지므로 오차가 점점 커지는 것도 확인할 수 있다. 추정한 거리 오차 값은 대역폭이 1 kHz인 경우 기존의 도달 시간 추정 방법은 23.8025 m 인데 반해 제안한 방법은 1.1342 m이며, 대역폭이 2 kHz인 경우 제안한 방법은 0.7948 m, 기존의 도달 시간 추정 방법은 17.5664 m로 나타나 제안한 방법의 거리 오차가 약 95% 감소하면서 성능이 향상되는 것을 확인하였다.

V. 결 론

본 논문에서는 근접장에 위치한 수중 이동 음원의 거리 추정을 위해 수중 채널에 의해 발생하게 되는 다중 경로 신호의 도플러 주파수 차이를 이용하여

거리를 추정하는 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 수신 신호로부터 추정된 다중 경로 신호의 도플러 주파수 차이와 음원의 이동 경로 및 속도 등의 사전 정보들을 이용하여 산출한 이론적인 다중 경로 신호의 도플러 주파수 차이를 비교하여 음원의 거리를 추정하기 때문에 함정의 방사소음을 측정하는 경우와 같이 도플러 주파수를 계산하기 위한 정보들을 알 수 있는 경우로 제한되어 있다. 제안한 방법은 시간 동기를 필요로 하지 않는다는 장점을 갖는다. 모의실험의 결과를 통하여 이동하는 음원의 위치를 추정 성능을 입증하였다. 향후 실제 해양에서 취득한 데이터를 활용하여 성능을 분석하는 과정을 수행하여야 한다.

References

1. H. L. Van Trees, *Optimum Array Processing* (John Wiley & Sons, New York, 2004), pp. 428-709.
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. W. Adams, J. Kuhn, and W. Whyland, "Correlator compensation requirements for passive time delay estimation with moving source or receivers," *IEEE Trans. Acoust Speech Signal Process*, **28**, 158-168 (1980).
4. G. Carter, "Time delay estimation for passive sonar signal processing," *IEEE Trans. Acoustics, Speech, and Signal Processing*, **29**, 463-470 (1981).
5. R. O. Nielson, *Sonar Signal Processing* (Artech House, Inc, Norwood, 1991), pp. 187-229.
6. S. Pecknold, J. A. Theriault, D. McGaughey, and J. Collins, "Time-series modeling using the waveform transmission through a channel program," *IEEE Trans. Acoustics Speech and Signal Processing*, **2**, 993-1000 (2005).
7. D. R. McGaughey, V. Dagenais, and S. P. Recknold, "Improved torpedo range estimation using the fast orthogonal search," *IEEE J. Oceanic Engineering*, **35**, 595-602 (2010).
8. *A Fast Algorithm for Computing Doppler Introduced by Sea Surface Gravity Waves*, http://oalib.hlsresearch.com/Rays/VirTEX/VirTEX_Talk.pdf

저자 약력

▶ 박 응 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

▶ 손 윤 준 (Yoon-Jun 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