

다수 정보들의 비선형 최적화에 의한 수중 음원 위치 추정 성능 향상

Performance enhancement of underwater acoustic source localization by nonlinear optimization of multiple parameters

양인식,¹ 권택익,² 강태웅,² 김기만^{2†}

(In-Sik Yang,¹ Taek-Ik Kwon,² Tae-Woong Kang,² and Ki-Man Kim^{2†})

¹국방과학연구소, ²한국해양대학교 전파공학과

(Received September 28, 2017; revised October 19, 2017; accepted November 29, 2017)

초 록: 수중 음원의 위치를 추정하기 위해 도달 시간차와 도달 방향이 활용될 수 있다. 하지만 위치 추정 성능은 표적과 수신단 사이의 상대적인 위치, 수신기들의 기하학적인 배치 구조 및 음속 등에 영향을 받는다. 본 논문에서는 추정된 다수의 표적 정보들을 조합하여 위치 추정 성능을 향상시키는 방법을 제안하였다. 제안한 방법은 도달 시간차, 도달 방향 및 음속 값을 변수로 사용하며, 비선형 최적화 과정 가운데 하나인 LM(Levenberg-Marquardt) 방법이 적용되었다. 제안된 방법의 성능은 모의실험을 통해 분석되었다. 결과에서 제안된 방법의 평균 위치 추정 오차가 기존의 방법을 사용한 경우보다 낮게 나타났다.

핵심용어: 위치 추정, 도달 시간 차, 도달 방향, 음속, LM(Levenberg-Marquardt) 최적화

ABSTRACT: TDoA (Time Difference-of Arrival) or DoA (Direction-of-Arrival) can be used for source localization. However, the localizing performance is dependent on relative position between source and receivers, receivers' geometric structure, sound speed, and so on. In this paper we propose a source localization method with enhanced performance that combines multiple information. The proposed method uses the time TDoA, DoA and sound speed as variables. LM (Levenberg-Marquardt) method which is one of nonlinear optimizations is applied. The performances of the proposed method was evaluated by simulation. As result of simulation, the proposed method has the lower average localizing error performance than the previous method.

Keywords: Source localization, TDoA (Time Difference-of Arrival), DoA (Direction-of-Arrival), Sound speed, LM (Levenberg-Marquardt) optimization

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

1. 서 론

소나 시스템에서 근접한 표적의 위치 추정은 중요한 응용 분야 가운데 하나이다. 특히, 수신되는 신호만을 처리하여 정보를 추출하는 수동형인 경우 도달 시간차를 추정하여 파면의 곡률을 이용한 위치 추정 기

법, 신호의 도달 방향을 추정하여 삼각측량을 하거나 초점 빔 형성에 기반을 둔 기법 등 다양한 방법들이 연구되었다.^[1-3] 이 가운데 초점 빔 형성을 이용한 방법은 최근 부배열을 이용하여 계산량을 감소시키기 위한 연구가 이루어졌으나 기본적으로 표적을 구분하기 위한 해상도를 높이기 위해서는 많은 수의 수신 센서를 필요로 하고 관심 주파수 대역에 따라서는 배열의 길이도 상당히 길어져서 운용하는데 제한이 따른다. 도달 시간 차 추정에 기반하는 방법은 서로 다른 위치에 있는 센서에 도달한 신호들 사이에 상호 상관도를 구

†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 발표되었던 논문임”

하여 표적의 위치를 추정하므로 비교적 하드웨어적인 제한조건이 크지 않지만 수신된 신호들 사이의 상관도가 성능에 큰 영향을 미치며, 특히 표적의 위치에 따라 거리 방향의 오차가 크게 나타날 수 있다.

실제 환경에서 도달 시간 차 추정 값은 오차를 포함하고 있으며, 특히 표적이 배열 축 방향 근처에 놓이면 그에 따른 오차가 크게 발생한다. 따라서 이러한 오차가 포함되어 있더라도 표적의 위치 정보를 정확하게 추정하는 방법이 필요하다. 이를 위해 본 논문에서는 도달 시간 차 추정 값뿐만 아니라 신호의 도달 방향 추정 값도 함께 융합하여 보다 정확한 표적 위치 정보를 추정하는 방법을 연구하였다. 추정된 다수의 정보들은 비선형 최소자승법의 한 종류인 LM(Levenberg-Marquardt) 최적화 방법에 적용하여 표적의 위치 추정 성능을 향상시키는데 이미 레이다 분야에서 이와 같은 최적화 방법을 적용한 연구가 이루어진 사례가 있다.^[6] 하지만 레이다 분야와는 다르게 소나 분야에서는 다양한 형태의 불일치 조건이 발생하는데 대표적인 것이 일정하지 않은 음속이나 수신기 위치의 변동성이다. 해양 환경은 시변동성이 매우 높기 때문에 음속이 시간에 따라 그리고 송수신 지점의 기하학적인 위치에 따라 항상 변화한다. 또한 레이다와는 다르게 소나 시스템 가운데에는 수신 센서들이 케이블에 장착되어 있어 수중에서 일정한 형태를 유지하지 못하고 해상 상태나 기동 방법에 따라 그 위치의 변동성이 매우 크다. 따라서 이러한 운용 환경적인 문제로 인하여 오차가 발생할 가능성이 증가하므로 이러한 요인들을 포함하여 최적화하는 방법에 대해 연구하였다. 즉, 본 연구에서는 LM 최적화와 같은 방법 자체를 제안하거나 기존의 연구에서처럼 도달 시간차와 도달 방향 정보만 사용하는 것이 아니라 표적 위치 추정에 많은 영향을 미치는 음속까지 포함하는 해양 환경 요소를 반영하여 최적화 하는 방법을 제안하였다. 연구한 내용은 모의실험을 통하여 기존의 방법과 제안한 방법의 성능을 비교하였다.

II. 시스템 모델

본 연구에서는 분리 빔 형성을 통해 도달 시간차

와 도달 방향 정보를 추정하는 환경을 고려하였다.^[7-9] Fig. 1은 분리 빔 형성기를 이용한 도달 시간차 및 도달 방향을 추정하는 블록도이다. 이를 위해 수신 센서들이 선형으로 일정한 간격 d 로 배치되어 있는 3개의 부배열을 고려하였으며, 이 부배열 사이의 거리는 알고 있다고 하였다. 표적에서 방사되는 신호를 $s(t)$ 라고 할 때, 각각 M 개의 센서로 구성된 k 번째($k=1,2,3$) 부배열에서 각 센서에 수신된 신호를 $A_{k,i}(t)$ 라고 한다. 샘플 시간 t 에서 수신된 신호는 다음과 같다.

$$A_{k,i}(t) = s(t + \tau_{k,i}) + n_{k,i}(t) \quad (1)$$

$$i = 0, 1, 2, \dots, M-1.$$

이때 $n_{k,i}(t)$ 는 각 센서에 더해지는 잡음에 해당하며, 공간적으로 상관성이 없다고 가정한다. $\tau_{k,i}$ 는 표적의 위치에서 각 센서까지의 거리에 비례하는 시간 지연이다. $\tau_{k,i}$ 는 Eq. (2)와 같이 구할 수 있다.

$$\tau_{k,i} = (r_k - r_{k,i})/c, \quad (2)$$

$$r_{k,i} = \sqrt{(dm_{k,i} - x_s)^2 + (y_s)^2},$$

여기서 d 는 각 부배열 내에서 센서 사이의 거리이고, $m_{k,i}$ 은 k 번째 부배열에서의 센서 인덱스에 해당한다. x_s 와 y_s 는 직교 좌표계로 표현된 표적의 위치이다. r_k 는 k 번째 부배열에서 기준 센서와 표적 사이의 거리이며, $r_{k,i}$ 는 k 번째 부배열에서 각 센서와 표적 사이의 거리이다. c 는 신호의 전달 속도이다.

제안하는 방법은 표적의 도달 방향 정보와 도달 시간차 정보를 모두 사용하여 조합한다. 이 때 도달 시간차는 각 분리 빔 형성기 출력 $b_k(t)$ ($k=1,2,3$) 사이의 상호 상관도를 구하여 최대값을 갖는 시간 지연으로 계산한다. 예를 들어 임의의 시점 t 에서 1번과 2번 부배열 사이의 도달 시간차는 다음 식과 같이 표현될 수 있다.

$$TDOA_{12}(t) = \frac{r_1(t) - r_2(t)}{c}. \quad (3)$$

하지만 도달 시간차의 추정 값은 오차를 포함할 수 있는데 그 원인으로는 잡음이나 샘플링 주파수 해상도 및 음속과 같은 수중 채널의 영향을 들 수 있다.

표적의 도달 방향 정보는 그림처럼 도달 시간차를 이용하여 추정할 수도 있고, 각 부 배열에서 지향 방향을 바꾸어가면서 지연-합 빔 형성기와 같은 빔 형성기의 출력을 구하여 추정할 수 있다. 하지만 이 정보에도 오차가 포함될 가능성이 있는데 그 원인으로 는 표적이 수신단에 근접한 경우 실제 신호는 구면파 형태로 전달되지만 빔 형성 과정을 평면파로 가정하여 처리하는 경우에 오차가 발생할 수 있다. 또한 배열의 축 방향에 가까이 표적이 존재하는 경우와 수중 채널의 음속 구조 변화와 같은 다양한 변동 요인들이 작용한다.

III. 제안한 방법

측정한 데이터 양이 많을수록 표적의 정확한 위치를 추정할 가능성이 증가하나 수신기들의 배치, 측정된 표적 정보의 종류나 정보들의 추정 오차 등에 영향을 받는다. 예를 들어, 수신기들이 직선 배열 형태를 갖고 도달 시간차를 이용하여 표적의 위치를 추정하는 경우 위치 추정 과정에서 풀어야 하는 쌍곡선 함수의 기울기가 서로 완만한 상태에서 교차하므로 오차가 발생할 확률이 크게 증가할 수 있다. 하지만 수신기들의 배치가 이미 정해진 환경에서 다수

의 표적 정보를 추출할 수 있다면 이들 정보를 독립적으로 활용하기 보다는 서로 조합을 통해 오차를 줄일 수 있다.

기존의 선형 최적화 방법인 LS(Least Square) 방법과는 달리 LM 최적화 방법은 비선형 방식으로써 닫힌 형태가 존재하지 않아 반복 방법인 Gauss Newton 방법과 Gradient Descent 방법의 결합한 형태로 나타난다. Gradient Descent 방법은 기울기의 반대방향으로 이동하며 이동하는 크기는 기울기에 비례한다. Gradient Descent 방법은 Gauss Newton 방법보다 빠르게 해에 수렴하지만 발산의 위험이 있어 안정적으로 해를 찾지 못할 가능성이 있다. 또한 Gauss Newton 방법은 함수의 기울기와 곡률을 고려하여 반복적으로 수행하며 해를 찾아 안정적으로 해를 찾을 수 있지만 수렴속도가 느린 문제점이 있다. 이러한 두 종류 방법의 조합된 형태인 LM 최적화 방법은 비선형 방정식의 해가 현재 값보다 멀리 있을 경우 Gradient Descent 방법으로 작동하여 빠른 수렴 속도를 가지며, 가까이 있을 경우 Gauss Newton 방법으로 작동하여 안정적인 해를 찾을 수 있다. 이 방법의 자세한 전개 과정은 이미 많은 다른 문헌에 나와 있으므로 여기서는 생략하였다. 본 논문에서는 LM 최적화 방법을 이용하여 추정된 도달 시간차와 도달 방향의 정보를 결합하여 음속 오차를 보정함과 동시에 표적을 위치를 추정한다.

임의의 시점에서 추정된 도달 시간차와 도달 방향은 다음과 같이 표현된다.

$$T_{i2}(t) = TDOA_{i2}(t) + \epsilon_t(t), \tag{4}$$

$$\theta_i = DOA_i(t) + \epsilon_d(t), \tag{5}$$

여기서 $\epsilon_t(t)$ 와 $\epsilon_d(t)$ 는 도달 시간차와 도달 방향의 추정오차이다. 도달 시간차의 수학적 모델은 Eq. (3)이고 도달 방향은 다음과 같이 표현된다.

$$DOA_i(t) = \arctan(y_s / dm_{k,i} - x_s). \tag{6}$$

LM 최적화 방법의 비용 함수는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

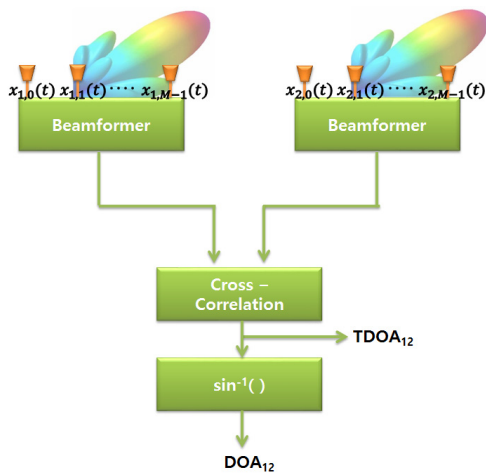


Fig. 1. Source parameter estimation based on split beamforming and cross-correlation.

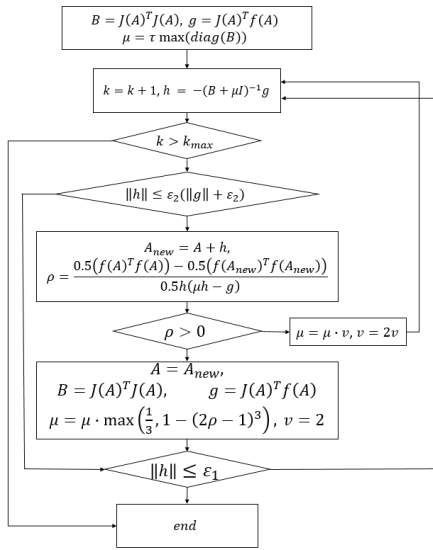


Fig. 2. Optimization of cost function using LM algorithm.

$$f(A) = Q(A) - q,$$

$$Q(A) = \begin{bmatrix} TDOA_{12} \\ TDOA_{32} \\ DOA_1 \\ DOA_3 \end{bmatrix}, q = \begin{bmatrix} T_{12} \\ T_{32} \\ \Theta_1 \\ \Theta_3 \end{bmatrix}, \quad (7)$$

$$A = [\hat{x}, \hat{y}, \hat{c}],$$

여기서 A 는 최적화될 변수로 구성된 벡터로써 그 원소에는 표적의 좌표와 음속 값이 포함된다. 비용함수 $f(A)$ 의 자코비안 행렬은 다음과 같이 나타낼 수 있는데 식에서 $Q_i (i = 1, \dots, 4)$ 는 각 파라미터의 수학적 모델을 의미한다.

$$J(A) = \begin{bmatrix} \frac{\partial Q_1}{\partial \hat{x}} & \frac{\partial Q_1}{\partial \hat{y}} & \frac{\partial Q_1}{\partial \hat{c}} \\ \frac{\partial Q_2}{\partial \hat{x}} & \frac{\partial Q_2}{\partial \hat{y}} & \frac{\partial Q_2}{\partial \hat{c}} \\ \frac{\partial Q_3}{\partial \hat{x}} & \frac{\partial Q_3}{\partial \hat{y}} & \frac{\partial Q_3}{\partial \hat{c}} \\ \frac{\partial Q_4}{\partial \hat{x}} & \frac{\partial Q_4}{\partial \hat{y}} & \frac{\partial Q_4}{\partial \hat{c}} \end{bmatrix}. \quad (8)$$

LM 최적화 방법을 이용하여 $f(A)$ 를 최적화 하는 과정을 Fig. 2에 나타내었다. 여기서 k_{\max} 는 최대 반복 횟수이고, ϵ_1 와 ϵ_2 는 종료 조건이다. Eqs. (7)와 (8)을 이용하여 B 와 g 행렬을 생성한다. 이때, μ 는 행렬

B 의 대각 행렬을 이용하여 구한다. 다음으로 B 와 μ 를 이용하여 h 를 구하게 되며, h 는 A 값을 갱신한다. 갱신된 A 와 기존의 A 를 이용하여 ρ 를 구한다. ρ 에 따라 μ 가 증가하거나 초기화된다. 이때 μ 가 증가하게 되면 LM 방법은 Gradient Descent 방법에 수렴하게 된다. 반면에 μ 가 작아지게 되면 Gauss Newton 방법에 수렴하게 된다. 앞의 방법을 반복하여 LM 알고리즘을 종료 조건 또는 최대 반복횟수만큼 수행한다.

IV. 모의실험 및 결과

제안된 LM 최적화 방법에 기반한 표적 위치 추정 성능을 분석하기 위해 기존의 LS 방법과 비교하는 모의실험을 수행하였다. 각 부배열 사이의 거리는 20 m로 가정하였다. 음속은 1500 m/s로 하여 모의 데이터를 생성하였으나 처리과정에서는 이 정보를 정확히 모른다고 가정하기 위해 LS 방법에는 1450 m/s로 설정하여 오차를 주었고, LM 방법의 음속 초기 값은 1450 m/s로 하였다. 오차는 RMSE(Root Mean Square Error)로 표현하였으며 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (\hat{x} - x)^2 + (\hat{y} - y)^2}{N}}, \quad (9)$$

여기서 \hat{a} , \hat{b} 는 추정된 표적 위치의 직교 좌표계이며 x, y 는 실제 표적위치이다. N 는 반복 시행 횟수이고 독립적으로 100번 반복 시행하였다.

도달 시간차의 오차에 대한 성능을 비교하기 위해 도달 시간차의 오차를 정규분포를 가지면서 $1.0 \times$

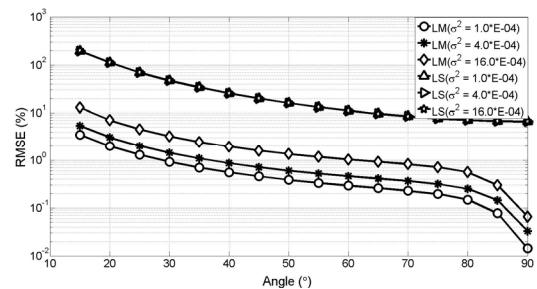


Fig. 3. RMSE according to TDoA error.

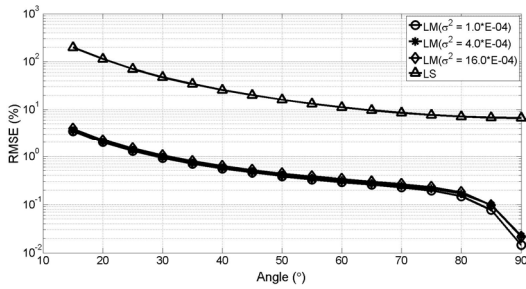


Fig. 4. RMSE according to DoA error.

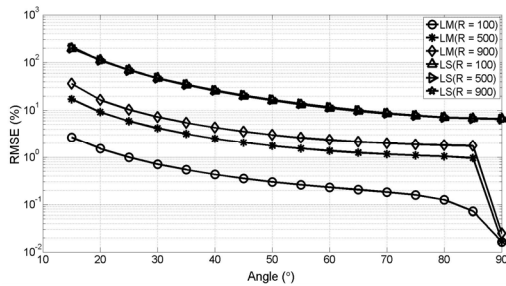


Fig. 5. RMSE according to source range.

10^{-4} , 4.0×10^{-4} , 16.0×10^{-4} 분산 값을 갖는 오류를 가정하였다. 이때 도달 방향의 오차는 1.0×10^{-4} 으로 고정하였다. 표적의 거리는 100 m, 방향은 5°부터 90°까지 5°간격으로 변화시킨 결과를 Fig. 3에 나타내었다.

위의 결과 그림으로부터 LS 방법은 90°에서 약 10%의 오차를 보이고 end-fire 영역으로 향할수록 오차가 증가하였으며, 도달 시간차의 편차에 따른 오차의 변화는 크지 않았다. 하지만 LM 방법의 경우, 도달 시간차 오차의 편차에 따라 위치 추정의 정확도가 달라졌다. 음속의 경우, 정확히 추정하였으며 90°에서 도달 시간차 오차의 편차에 따라 약 0.01%~0.1%의 오차를 나타내었다. 또한 편차가 16.0×10^{-4} 일 때, end-fire 영역에 가까운 15°에서 약 10%의 오차를 가지며 LS 방법에 비해 성능 향상을 나타낸다.

도달 방향 오차에 대한 성능을 비교하기 위해 도달 시간차의 오차는 1.0×10^{-4} 으로 고정하였고 도달 방향의 오차 편차는 앞과 동일하게 가정하였다.

Fig. 4의 결과로부터 도달 방향의 오차 편차 따른 위치 추정 성능은 도달 방향에 따라 약 0.01%~3%의 오차를 나타내었다. Fig. 3과 비교하면 도달 시간차보다 영향을 적게 받았고, LS 방법보다 향상된 성능

을 가진다.

거리에 따른 LM 방법의 성능을 비교하기 위해서 도달 시간차와 도달 방향의 오차를 1.0×10^{-4} 으로 고정하고 거리는 100 m, 500 m, 900 m를 사용하여 Fig. 5에 나타내었다.

기존의 LS 방법은 거리에 따른 위치 추정 성능 변화가 거의 나타나지 않았다. 하지만 LM 방법의 경우, 표적의 거리에 따라 다른 오차를 보였으며, 또한 LM 방법이 LS 방법보다 위치 추정 오차가 작게 나타났다.

V. 결론

근접장에서 표적의 위치를 추정하기 위한 방법으로 도달 시간차나 도달 방향 등의 정보가 사용될 수 있으나 이렇게 추정된 정보들은 항상 오차를 포함한다. 특히, 수신단과 표적의 상대적인 위치에 따라 end-fire 영역과 같은 특정 위치에서는 오차 범위가 크게 증가할 수 있다. 본 연구에서는 다수의 표적 정보들을 비선형 최적화 과정인 LM 방법에 적용하여 표적 위치 추정 성능을 향상시켰다. 이 때 추정된 도달 시간차와 도달 방향 정보뿐만 아니라 음속 값도 포함하여 최적화 하도록 하였다. 모의실험을 통해 제안한 방법과 기존의 LS 방법의 성능을 비교하였으며, 그 결과 제안한 방법의 성능이 기존의 LS 방법보다 나은 성능을 나타내었다. 특히, 표적이 수신 센서 축에 가까운 방향에 위치할수록 그 효과가 크게 나타났다. 향후 실제 환경에서 획득한 데이터를 이용하여 성능을 분석할 필요성이 있다.

References

1. A. D. Waite, *Sonar for Practising Engineers* (John Wiley & Sons, New York, 2004), pp. 13-41.
2. G. Carter, "Time delay estimation for passive sonar signal processing," *IEEE Trans. Acoustics, Speech, and Signal Processing* **29**, 463-470 (1981).
3. C. Knapp and G. Carter, "The generalized correlation method for estimation of time delay," *IEEE Trans. Acoustics, Speech, and Signal Processing* **24**, 320-327 (1976).
4. G. Pelegris, *A triangulation method for passive ranging*, (Master's thesis, Naval Postgraduate School

1994).

5. T. -I. Kwon, K. -M. Kim, S. -I. Kim, and J. -K. Ahn, "Near field acoustic source localization using beam space focused minimum variance beamforming" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **36**, 100-107 (2017).
6. J. -O. Park, M. -S. Lee, and Y. -M. Park, "Estimation and analysis of two moving platform passive emitter location using T/FDOA and DOA" (in Korean), J. Institute of Electronics and Information Engineers **52**, 121-131 (2015).
7. M. J. Hinich, "Passive range estimation using subarray parallax." J. Acoust. Soc. Am. **65**, 1229-1230 (1979).
8. S. Stergiopoulos and A. T. Ashley, "An experimental evaluation of split-beam processing as a broadband bearing estimator for line array sonar systems," J. Acoust. Soc. Am. **102**, 3556-3563 (1997).
9. Y. W. Ryu, E. C. Jeong, and S. Y. Chun, "Analysis on noise correlation of triplet line array sensors in the east sea" (in Korean), J. Acoust. Soc. Kr. **34**, 479-486 (2015).

▶ 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

저자 약력

▶ 양 인 식 (In-Sik Yang)



2000년 2월: 한국해양대학교 전파공학과 (공학사)
 2002년 2월: 한국해양대학교 전파공학과 (공학석사)
 2002년 1월 ~ 현재: 국방과학연구소 선임 연구원
 <관심분야> 소나 시스템, 신호처리

▶ 권 택 익 (Taek-Ik Kwon)



2016년 2월: 한국해양대학교 전파공학과 (공학사)
 2016년 3월 ~ 현재: 한국해양대학교 전파공학과 석사과정
 <관심분야> 소나 신호처리, 어레이 신호처리, 수중통신, 음향 신호처리 등

▶ 강 태 웅 (Tae-Woong Kang)



2017년 8월: 한국해양대학교 전파공학과 (공학사)
 2017년 9월 ~ 현재: 한국해양대학교 전파공학과 석사과정
 <관심분야> 소나 신호처리, 어레이 신호처리, 수중통신 등