Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society
Vol. 21, No. 5 pp. 69-76, 2020

https://doi.org/10.5762/KAIS.2020.21.5.69
ISSN 1975-4701 / eISSN 2288-4688

Doublet 센서배열의 수중음원 위치 추정 성능 향상을 위한 시간지연 추정 기법

심민섭*, 이지혁, 이형신
국방기술품질원 함정2팀

Time-delay Estimation Method for Performance Enhancement of Underwater Source Localization using Doublet Array

Min-Seop Sim*, Ji-Hyeog Lee, Hyeong-Sin Lee
Defence Agency for Technology and Quality(DTaQ) Naval Sea Systems Team 2

요 약 수중에서 방사된 음원의 신호는 해수면, 해저면 반사에 의한 다중경로 시간지연(multi-path time-delay)을 포함하여 체계(system)의 센서에 수신된다. 다중경로 환경과 복잡한 해양환경의 외란(disturbance)에 의해 수신된 신호간 상관성(coherence)이 저하된다. 따라서, 신호간 시간지연값을 이용하여 수중음원의 위치를 추정하는 체계는 추정성능의 저하가 나타난다. 이러한 환경에서도 강인한 음원 위치 추정성능을 위해 선배열(uniform line array), 평면배열(rectangular array)과 같은 다양한 형태의 센서배열과 빔형성(beamforming) 기법, 비용함수(cost-function)과 같은 신호처리를 이용하여 왔다. 본 연구에서는 선배열 형태의 doublet array와 추정된 시간지연값 보정 기법을 이용하고자 한다. 3 개의 doublet array를 동일 선에 위치하였으며 각각의 doublet array에 수신된 신호간의 시간지연값을 2 단계로 추정하였다. 수신신호에 대해 상호상관(cross-correlation) 함수를 적용하여 추정된 시간지연값을 수신신호의 중심주파수(center-frequency)와 array의 개구경(aperture) 및 수중음원과의 기하학적 관계에 따라 보정하여 최종의 시간지연값을 얻었으며 이로부터 음원의 거리와 방위를 추정하였다. 제안한 기법의 타당성을 확인하기 위해, Monte-Carlo method를 이용하여 시뮬레이션하였다.

Abstract The sound signal radiated from an underwater source is received by the hydrophone of the system, including multi-path time-delay and multi-path signal by sea surface and bottom reflection. The system using a time-delay between received signals for the source localization shows performance degradation due to incoherence by the multi-path propagation environment and the disturbance of a marine environment. Various types of array and signal processing have been used for robust source range and bearing estimation in this environment. In this paper, we use a line array composed of doublet array and an estimated time-delay correction method for robust localization performance in a multi-path propagation environment. Three doublet arrays are located on the same line, and the time-delay between signals received on each doublet array is estimated in a two-step procedure. The estimated time-delay value is obtained by the cross-correlation function and corrected by the interaction formula between the center-frequency of received signal and the geometry of the array with respect to aperture. By this proposed procedure, the range and bearing of source from array were calculated. In order to confirm the validity of the proposed method and array, we simulated localization and estimation using the Monte-Carlo method.

Keywords : Time-Delay Estimation, Doublet Array, Multi-Path Propagation, Localization, Cross-Correlation

*Corresponding Author : Min-Seop Sim(Defense Agency for Technology and Quality)
email: simms@dtaq.re.kr
Received March 31, 2020 Revised April 24, 2020
Accepted May 8, 2020 Published May 31, 2020

1. 서론

수중에서 방사된 음원의 거리와 방위 추정을 위해 선배열센서(uniform line array), 환형배열센서(circular array), 평면배열센서(rectangular array)와 같은 다양한 형태의 센서배열과 빔형성(beamforming), 비용함수(cost-function), 고유값분해(eigen-decomposition)과 같은 복잡한 신호처리 방법을 이용하여 왔다. 본 연구의 수중음원 방위/거리 추정 기법은 음파면 곡률 측정기법(wavefront curvature ranging)을 기반으로 한다[1,2]. 음파면 곡률 측정 기법은 배열을 이루는 센서에 대해 기준이 되는 센서와 나머지 두 센서 사이의 시간지연을 추정하여 음파면의 곡률을 측정하고 이로부터 음원의 방위와 거리를 추정하는 기법으로 비교적 적은 연산량을 가진다. 음파면 곡률 측정기법은 수신신호의 센서 간 시간지연값이 높은 정확도로 추정이 되어야 음원 추정성능 확보할 수 있다. 센서 간 시간지연값은 상호상관 함수를 통해 추정하며 일반적으로 수신신호가 광대역(broadband) 특성을 가지고 있을 경우 시간지연 추정에서 우수한 성능을 가진다. 하지만, 대상 신호가 협대역(narrowband)이며 해양에서의 잡음(noise)로 인해 상호상관 함수를 이용한 시간지연 추정에서 다수개의 첨두값과 높은 진동특성이 나타나 상호상관 함수를 이용한 음원 위치 추정에 제한이 있다[3,4]. 이러한, 성능저하 원인을 제거하고자 비용함수를 이용한 시간지연 추정기법이 제안되었다[5,6]. 비용함수를 이용한 시간지연 추정에서는 NLS(Nonlinear Least Squares) 비용함수를 이용하여 수신신호의 협대역 특성과 이로인한 진동특성을 제거하여 강인한 시간지연 추정이 가능하다. 하지만, NLS 비용함수에서 시간지연 추정을 위해 사용하는 원신호(original signal)에 대한 정보가 없는 경우 비용함수에 왜곡이 발생하여 성능의 저하가 발생한다. 해양환경에서 음파의 다중경로 전파에 의한 신호간 상관성 저하로 비용함수를 이용한 시간지연 추정은 제한된 환경에서 우수한 추정성능을 가진다.

본 연구에서는 doublet array를 포함하는 선배열 센서를 활용하며 상호상관 함수를 이용하여 시간지연 추정한다[7]. 또한, 추정된 시간지연값을 배열의 기하학적 특성에 따라 보정하는 기법을 적용함으로써 음원의 거리 및 방위 추정 성능을 향상하고자 한다. 먼저 제시하는 센서배열 구조에서 센서와 음원의 위치, 시간지연값 사이의 관계에 대해서 정리하였으며 다중경로 환경에서도 강인한 시간지연 추정 성능을 보이는 기법을 제안하였다. 타당성 확인을 위해 Monte-Carlo method를 이용하여 시뮬레이션하였다.

2. Doublet array 센서배열 구조

본 연구에서 활용하는 선배열은 기 제안된 배열구조로 직선상에서 간격 L m를 두고 놓여진 3개의 doublet array로 구성된다. Doublet array는 2개의 수중청음기가 간격 d m를 두고 구성된다. 수중음원에서 방사된 신호는 Fig. 1과 같이 각 doublet array에 구면파로 수신되어 Fig. 2와 같이 각 수중청음기에 평면파로 수신된다. 기하학적 구조에 따라 음원과 센서 사이의 거리 R_1, R_6는 Eqs. (1)과 (2)와 같다. 여기서 배열의 중간에 도달하는 음파를 기준으로 하여 각 수중청음기에 도달하는 음파의 이동거리, $c\tau_n$은 Eqs. (3)과 (4)로 나타낼 수 있다.

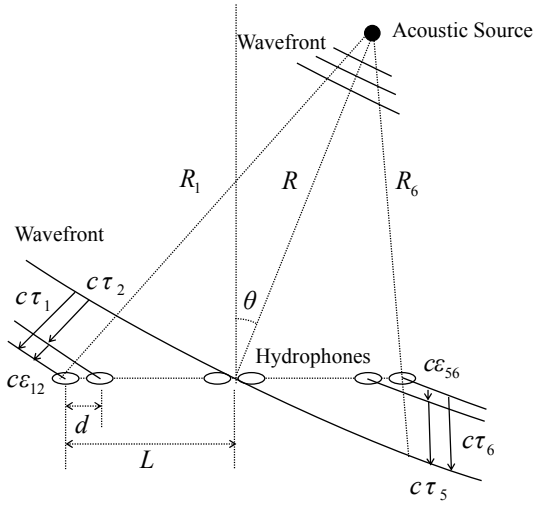

Fig. 1. Geometry of doublet array

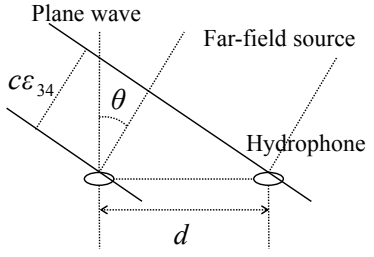

Fig. 2. Doublet array

$$R_1 = R + c\tau_1 \quad (1)$$

$$R_6 = R + c\tau_6 \quad (2)$$

Where, R denotes distance between array and source, c denotes sound velocity, τ denotes time-delay of received signal on hydrophones

$$c\tau_1 = \sqrt{R^2+L^2+2RLsin\theta}-R = R\left[\left(1+\frac{L^2}{R^2}+\frac{2L}{R}sin\theta\right)^{\frac{1}{2}}-1\right] \quad (3)$$

$$c\tau_6 = R\left[\left(1+\frac{L^2}{R^2}-\frac{2L}{R}sin\theta\right)^{\frac{1}{2}}-1\right] \quad (4)$$

Where, θ denotes bearing of source form array

Eqs. (3)과 (4)에서 Taylor expansion을 적용하면, 미지수 x에 대해 $x = L^2/R^2+2Lsin\theta/R$일 때, Eqs. (5)와 (6)으로 나타난다.

$$c\tau_1 = \frac{L^2}{2R}+Lsin\theta -\left(\frac{L^4}{8R^3}+\frac{L^3}{2R^2}sin\theta+\frac{L^2}{2R}sin^2\theta\right) \quad (5)$$

$$\simeq Lsin\theta+\frac{L^2}{2R}cos^2\theta,\ \frac{L}{R}\ll 1$$

$$c\tau_6 \simeq -Lsin\theta+\frac{L^2}{2R}cos^2\theta \quad (6)$$

Where, L denotes distance between doublet arrays

위의 관계식에 따라 수중음원의 거리 R은 다음과 같다.

$$R=\frac{L^2\cos^2\theta}{c(\tau_1+\tau_6)} \text{ or } R=\frac{(L-d)^2\cos^2\theta}{c(\tau_2+\tau_5)} \quad (7)$$

Where, d denotes distance between hydrophones of doublet array

본 연구에서 활용하는 doublet array에서 수신된 신호간의 시간지연값을 Fig. 2에서와 같이 ε으로 나타낼 경우 위의 Eq. (7)은 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$R=\frac{L^2\cos^2\theta}{c(\tau_2+\tau_5)+c(\varepsilon_{12}-\varepsilon_{56})} \quad (8)$$

Where, ε denotes time-delay of received signal on hydrophones of doublet array

Eq. (8)에 Eq. (7)을 대입할 경우, doublet array 센서배열 구조에서의 음원에 대한 거리 R은 Eq. (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R\simeq\frac{2dLcos^2\theta}{c(\varepsilon_{12}-\varepsilon_{56})}, d\ll L \quad (9)$$

Fig. 2에서 센서배열과 음원간의 방위 θ를 Eq. (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\theta=\sin^{-1}\left(\frac{c\varepsilon_{34}}{d}\right) \quad (10)$$

따라서, doublet array에 수신되는 신호간의 시간지연값, ε으로 음원의 방위를 표현하면 Eq. (10)과 같고, 음원의 거리는 아래의 Eq. (11)과 같다.

$$R=\frac{2L(d^2-c^2\varepsilon_{34}^2)}{cd(\varepsilon_{12}-\varepsilon_{56})} \quad (11)$$

3. 시간지연 추정 기법

앞서 2장에서 도출된 수식에 따라, 센서배열에 수신된 음원신호의 시간지연값, ε을 추정하면 음원의 방위, θ와 거리, R을 추정할 수 있다. 다음으로, 수신된 음원 신호로부터 시간지연값, ε을 추정하고자 한다. 본 연구에서는 Fig. 3에서 보이는 것과 같이 doublet array의 기하학적 특성으로 인하여 짧은 거리에 위치한 두 개의 수중청음기에 수신되는 음파는 다중경로 환경에서도 높은 상관성를 가지는 점을 활용하였다. 이는 간단한 신호처리 방법인 상호상관 함수만으로 복잡한 해양환경에서 수신된 신호로부터 시간지연값을 추정할 수 있도록 한다. 따라서 doublet array 센서배열을 이용하여 다중경로 환경에서도 음원 위치 추청성능을 확보할 수 있다.

상호상관 함수에서 첨두값은 대상 신호간의 시간지연에서 최대값을 가진다. 또한, 신호 중심주파수의 역수, $1/f_c$에 따라 상호상관 함수는 진동하며 나타나는 특성이 있다. 이러한 특성을 활용하여 추정된 시간지연값, $\hat{\varepsilon}$을 제안하는 조건에 따라 보정함으로써 시간지연 추정성능을 향상시키고 최종적으로 수중음원의 위치 추정 성능을 향상하고자 한다.

먼저, doublet array의 개구경(aperture)와 시간지연값, ε과 중심주파수, f_c의 관계식에 따라 추정된 시간지연값, $\hat{\varepsilon}$을 보정하는 방법에 대해 설명하고자 한다.

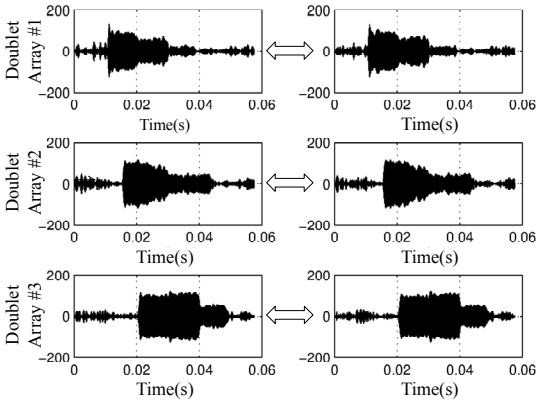

Fig. 3. The received signals of doublet arrays in the ocean and multi-path propagation environment

3.1 Doublet array 시간지연값의 관계

먼저, Eq. (5)와 아래의 Eq. (12)에 따라 doublet array에서의 시간지연값 ε_{12}, ε_{56}은 Eqs. (13)과 (14)로 나타낼 수 있다.

$$c\tau_2 \simeq (L-d)\sin\theta + \frac{(L-d)^2}{2R}cos^2\theta \tag{12}$$

$$c\varepsilon_{12} = c(\tau_1 - \tau_2) \simeq dsin\theta + \frac{dL}{R}cos^2\theta, d \ll 2L \tag{13}$$

$$c\varepsilon_{56} = c(\tau_5 - \tau_6) \simeq dsin\theta - \frac{dL}{R}cos^2\theta \tag{14}$$

Eq. (10)과 Eqs. (13), (14)에 따라 시간지연값 ε_{12}와 ε_{56}의 차, $\triangle\varepsilon$는 Eq. (15)로 나타낼 수 있다.

$$\triangle\varepsilon = |\varepsilon_{12} - \varepsilon_{56}| = \left|\frac{2dL}{cR}cos^2\theta\right| \tag{15}$$

Where, $\triangle\varepsilon$ denotes difference between time-delay of received signal on hydrophones of doublet array

다음으로 Eq. (15)에 대해 array의 물리적인 값에 따른 $\triangle\varepsilon$의 범위를 계산하였다. 본 연구에서는 doublet array간 간격, L을 20 m, doublet array 내부의 간격, d를 1 m로 설정하였다. 수중에서 음파의 속도, c는 1500 m/s로 설정하였다. 신호를 방사하는 음원의 거리, R을 1 km ~ 3 km, 음원의 방위, θ를 -45° ~ 45°로 가정하면 Eq. (15)의 $\triangle\varepsilon$은 Table 1과 같은 값을 가진다. 즉, $\triangle\varepsilon$은 설정한 음원의 방위와 거리에 대해서 항상 Table 1의 최대값 26.7 μs보다 같거나 작은 값을 가져야한다. 본 연구에서는 이러한 특성을 활용하며 3.2 절과 같이 추정된 시간지연값, $\hat{\varepsilon}$에 오차가 있을 경우 일정한 조건에 따라 보정하고자 한다.

Table 1. The difference values of time-delay on doublet array with respect to R(= 1 ~ 3 km), θ(= 0° ~ 40°)

$\triangle\varepsilon$ (μs)		θ				
		0°	10°	20°	30°	40°
R	1 km	26.7	25.9	23.5	20.0	15.6
	2 km	13.3	12.9	11.8	10.0	7.8
	3 km	8.9	8.6	7.8	6.7	5.2

3.2 추정된 시간지연값 보정

다음으로 $\triangle\varepsilon$과 신호의 중심주파수, f_c간의 관계를 확인하기 위해 f_c에 따라 상호상관 함수가 진동하는 주기를 확인하고자 한다.

본 연구에서 수신신호간의 시간지연 추정은 상호상관 함수를 이용하여 추정한다. 상호상관 함수에서는 Fig. 4와 같이 신호의 중심주파수 f_c의 역수, $1/f_c$의 간격으로 첨두값이 나타난다. 최대의 첨두값을 가질 때 신호간의 시간지연값으로 추정하게 된다.

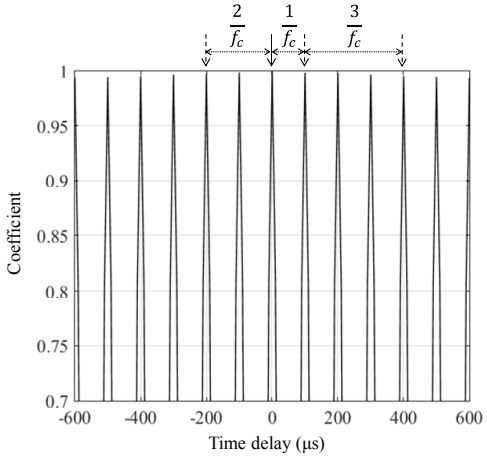

Fig. 4. The peak value interval of cross-correlation function with respect to the center-frequency f_c=10 kHz and the time-delay ε=0.

하지만, 중심주파수 f_c에 따라 높은 진동특성을 가지고 해양환경에서 발생한 복잡한 형태의 외란에 의한 수신신호의 잡음(noise)로 추정된 시간지연값, $\hat{\varepsilon}$은 실제값(참값)에서 $\pm n/f_c$, $n=1,2,3,\cdots$의 오차를 가질 수 있다. Fig. 4와 Table 2는 중심주파수 f_c = 5, 10 kHz의 수신신호에 대한 상호상관 함수에서 진동특성과 추정된 시간지연값, $\hat{\varepsilon}$의 오차 범위를 나타낸다.

Table 2. The peak values interval about center-frequency f_c(= 5, 10 kHz) on cross-correlation function

f_c (kHz)	$1/f_c$ (μs)
5	200
10	100

Table1과 2를 비교해보면, Eq. (16)과 같이 시간지연값의 차, $\triangle\varepsilon$은 시간지연 추정값, $\hat{\varepsilon}$이 나타나는 간격 $1/f_c$보다 항상 작은 값을 가지게 된다. 만약, $\triangle\varepsilon$이 $1/f_c$보다 큰 값을 가지게 되면 추정된 시간지연값, $\hat{\varepsilon}$이 상호상관 함수의 진동특성으로 인해 오차를 수반하여 추정된 것이다.

$$\triangle\varepsilon = \left|\hat{\varepsilon}_a - \hat{\varepsilon}_b\right| < \frac{1}{f_c} \tag{16}$$

Where, $\hat{\varepsilon}$ denotes estimated time-delay of received signal on hydrophones of doublet array, $1/f_c$ denotes reciprocal of center frequency

Eq. (16)에 따라, 각 doublet array에서 추정된 시간지연 $\hat{\varepsilon}_{12}$, $\hat{\varepsilon}_{34}$, $\hat{\varepsilon}_{56}$ 중 2개의 시간지연값이 Eq. (16)을 따르고 나머지 1개의 시간지연값이 관계식을 만족하지 않는다면 오차를 수반한 추정값으로 판단하여 신호 중심주파수의 역수, $1/f_c$ 단위로 보정할 수 있다. 보정된 시간지연값 $\hat{\varepsilon}'$은 Eq. (17)과 같이 나타낼수 있다. Fig. 5는 제안하는 시간지연 추정 기법에 대한 flow chart이다.

$$\hat{\varepsilon}' = \hat{\varepsilon} \pm \frac{n}{f_c}, n=1,2,3,\cdots \tag{17}$$

Where, $\hat{\varepsilon}'$ denotes corrected time-delay of received signal on hydrophones of doublet array

4. 시뮬레이션

4.1 시뮬레이션 환경

앞서 제안한 센서배열과 시간지연 추정 기법의 타당성 확인을 위해 Monte-Carlo method를 이용하여 시뮬레이션하였다. 먼저, doublet array와 수중환경에 대한 파라미터는 Table 3과 같이 설정하였다.

센서배열에 수신되는 음원 신호, $x(t)$와 수중에서 방사되는 음원, $s(t)$를 식으로 표현하면 아래와 같다.

$$s(t) = \cos(2\pi f_c t), \quad 0 \le t \le T \tag{18}$$

$$x(t) = s(t) + \alpha s(t-\tau_m) + n(t) \tag{19}$$

Where, $s(t)$ denotes underwater source signal, t denotes time series, T denotes signal length, $x(t)$ denotes received signal on hydrophones, α denotes attenuation at sea surface and bottom, τ_m denotes multi-path time delay, $n(t)$ denotes random noise signal

음원과 센서배열이 수심 500 m의 해양에서 수심 50 m에 위치하는 것으로 설정하였으며, 음원은 신호길이 20 ms의 연속파(Continuous Wave, CW)를 방사하는 것으로 가정하였다. 신호 대 잡음비는 0 ~ 20 dB로 설정하였으며 Table 3의 가능한 조합에 대해 Monte-Carlo method를 100회 실시하였다. 다음은 시뮬레이션 결과를 정리하였다.

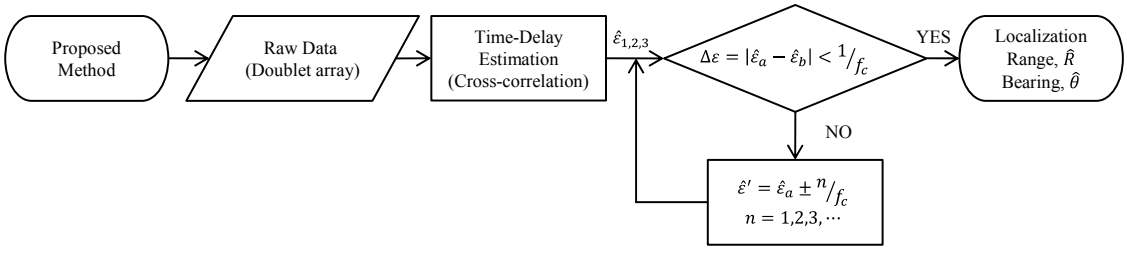

Fig. 5. Flow chart of proposed algorithm

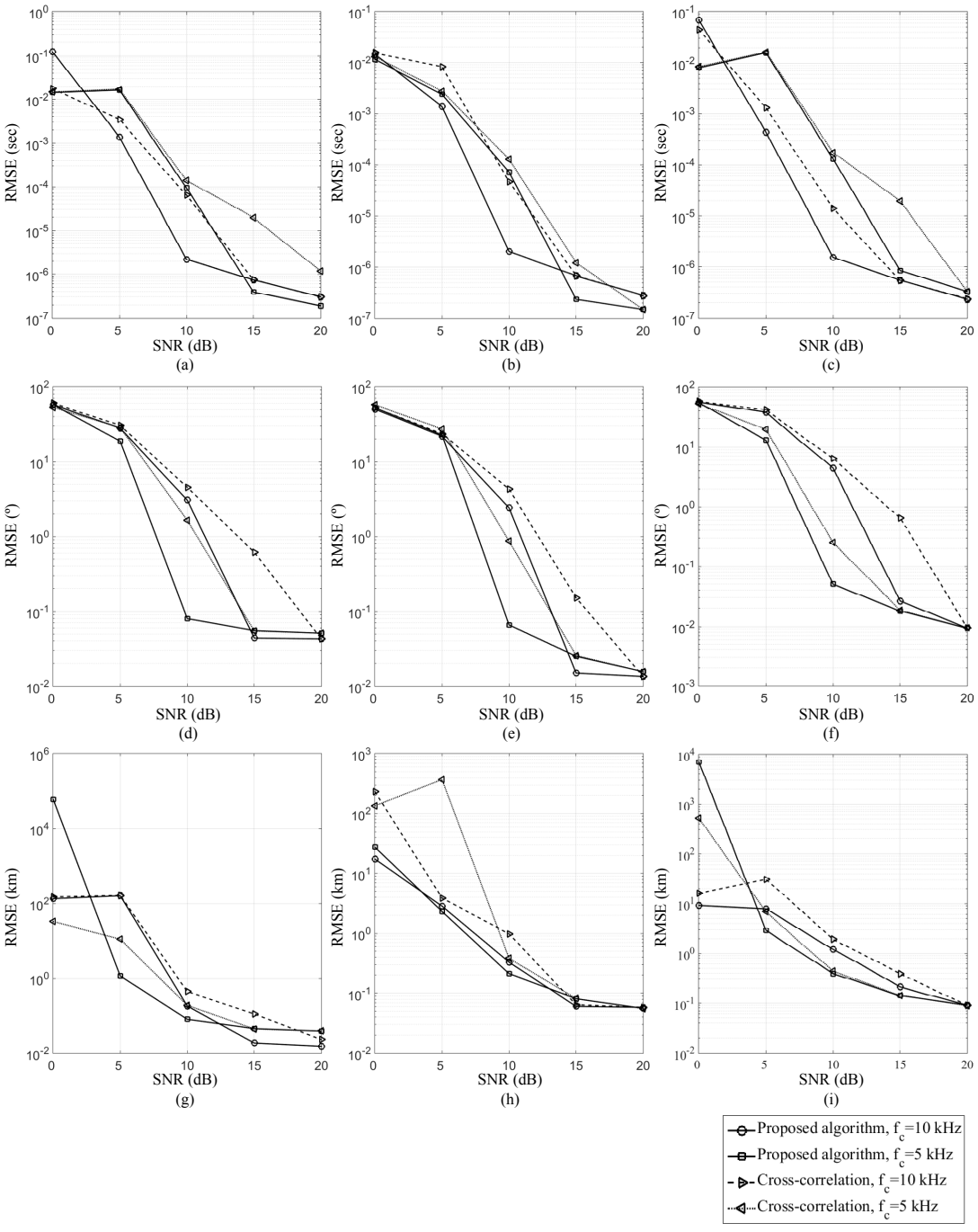

Fig. 6. Simulation result (RMSE VS SNR)
Time-delay estimation (a) R=1 km (b) R=2 km (3) R=3 km
Bearing estimation (d) R=1 km (e) R=2 km (f) R=3 km
Range estimation (g) R=1 km (h) R=2 km (i) R=3 km

Table 3. Variable values of simulation

Variables		Values
Array	Distance between doublet arrays, L	20 m
	Distance between hydrophones of doublet array, d	1 m
	Depth of array, D_h	50 m
Source	Range, R	1 ~ 3 km
	Bearing, θ	-45° ~ 45°
	Depth, D_s	50 m
	Center frequency, f_c	5, 10 kHz
	Signal length, T	20 ms
Water Depth, D		500 m
Signal Noise Ratio, SNR		0 ~ 20 dB
Monte-Carlo repetition		100

4.2 시뮬레이션 결과

본 연구에서 제안하는 추정된 시간지연값 보정 기법의 결과와 동일한 센서배열에 대해 상호상관 함수만을 적용한 결과에 대해 비교하였다. 음원의 거리, R=1, 2, 3 km, 방위, θ=-45° ~ 45°에 대해 각각의 시간지연 추정 기법으로 추정된 시간지연값, 음원의 거리, 방위의 RMSE를 비교하여 Fig. 6에 나타내었다. 시뮬레이션 결과, 제안한 기법을 통해 doublet array의 음원 위치추정 성능 향상을 확인할 수 있었다. 특히, 5~15 dB의 SNR에서 성능 향상이 나타났다. 해당 SNR에서 상호상관 함수에 의한 시간지연 추정 시 $\hat{\varepsilon}_{12}$, $\hat{\varepsilon}_{34}$, $\hat{\varepsilon}_{56}$ 중 오차를 수반하는 경우, 시간지연값 보정으로 위치 추정 성능향상이 나타났다. SNR=0 dB에서는 잡음에 의한 수신신호의 상관성 저하로 doublet array에서도 시간지연 추정 오차가 발생하여 보정기법에 의한 성능향상을 확인할 수 없다. SNR=20 dB에서는 상호상관 함수만을 이용하여서도 우수한 추정 성능이 나타나는 것을 확인할 수 있다. 이는, 높은 신호 대 잡음비에서는 상호상관 함수의 진동특성과 수신신호의 잡음으로 인한 시간지연 추정의 오차가 작은 것으로 확인할 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 doublet array를 포함하는 센서배열의 수중 음원 위치 추정 성능 향상을 위한 시간지연 추정 기법을 제안하였다. 제안한 기법을 통하여 다중경로 환경에서도 강인한 음원 위치 추정 성능을 가질 수 있음을 확인하였다. Doublet array는 짧은 센서간 간격으로 인해 수신되는 음원의 신호가 다중경로 환경에서도 높은 상관성을 가지는 점을 이용하여 시간지연 추정을 하였다. 또, 신호의 중심주파수, f_c와 시간지연값의 차, $\triangle\varepsilon$간의 관계에 따라 추정된 시간지연값을 보정함으로써 음원 위치 추정 성능을 향상시켰다. 연구내용을 Monte-Carlo method를 이용하여 시뮬레이션 하였고 제안한 기법의 타당성을 확인하였다.

References

[1] G. C. Carter, "Time delay estimation for passive sonar signal processing", *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, Vol.ASSP-29, No.3, pp.463-470, June 1981.
DOI:https://doi.org/10.1109/TASSP.1981.1163560

[2] B. G. Ferguson and R. J. Wyber, "Wavefront curvature passive ranging in a temporally varying sound propagation medium", *MTS/IEEE OCEANS, 2001. An Ocean Odyssey. Conference Proceedings*, Vol.4, pp.2359-2365, 2001.
DOI:https://doi.org/10.1109/OCEANS.2001.968368

[3] B. G. Ferguson, Kam W. Lo, "Passive ranging errors due to multipath distortion of deterministic transient signals with application to the localization of small arms fire", *The Journal of the Acoustical Society of America*, Vol.111, No.117, 2002.
DOI:https://doi.org/10.1121/1.1402619

[4] C. Knapp, G. Cater, "The generalized correlation method for estimation of time delay", *IEEE Transactions on Acoustic, Speech, and Signal Processing*, Vol.24, No.4, pp.320-327, Aug 1976.
DOI:https://doi.org/10.1109/TASSP.1976.1162830

[5] Renbiao Wu and Jian Li, "Time-delay estimation via optimizing highly oscillatory cost functions", *IEEE Journal of oceanic engineering*, Vol.23, No.3, pp.235-244, July 1998.
DOI: https://doi.org/10.1109/48.701196

[6] Qihu. Li, "Digital sonar design in underwater acoustics : principles and applications", Springer, 2012.

[7] M. S. Sim, "Underwater acoustic source localization using closely spaced hydrophone pairs", *Japanese Journal of Applied Physics*, Vol.55, No.7S1, 2016.
DOI: https://doi.org/10.7567/JJAP.55.07KG05

심 민 섭(Min-Seop Sim) [정회원]

- 2012년 2월 : 경북대학교 IT대학 전자공학부 (공학사)
- 2014년 2월 : 경북대학교 대학원 전자공학부 (공학석사)
- 2019년 8월 ~ 현재 : 국방기술품질원(DTaQ) 연구원

〈관심분야〉
신호처리, 수중음향

이 지 혁(Ji-Hyeog Lee) [정회원]

- 2004년 2월 : 연세대학교 공과대학 전자공학과 (공학사)
- 2006년 6월 : USC(University of Southern Califonia) M. S. in Electrical Engineering (공학석사)
- 2010년 2월 ~ 현재 : 국방기술품질원(DTaQ) 선임연구원

〈관심분야〉
정보처리, 영상 표적 추적, 무선통신

이 형 신(Hyeong-Sin Lee) [정회원]

- 2010년 2월 : 홍익대학교 조선해양공학과 (공학사)
- 2017년 2월 ~ 현재 : 국방기술품질원(DTaQ) 연구원

〈관심분야〉
조선공학, 정보통신