

Pulsed CW 신호를 사용하는 수중 음원의 위치 추정을 위한 시간지연차 추정법

Position Estimation of Underwater Acoustic Source Using Pulsed CW Signal

최영근*, 김기만*, 손권**, 도경철**

(Young-Keun Choi*, Ki-Man Kim*, Kweon Son**, Kyeong-Cheol Dho**)

*한국해양대학교 전파공학과, **국방과학연구소

(접수일자: 2004년 8월 20일; 채택일자: 2004년 10월 4일)

수중에서 음원의 위치 추정을 위해 적용되어지는 기법으로써 시간지연차 (TDOA : Time Difference Of Arrival) 추정, 빔 형성 기법, 고 분해능 기법 등이 있다. 본 논문에서는 상대적으로 적은 수의 센서를 사용하여 주파수 영역에서 시간 지연차 추정에 사용되는 MCPSP (Modified Cross Power Spectrum Phase) 함수를 이용하였다. 그러나 MCPSP 함수에 기반한 방법은 CW (Continuous Wave) 신호를 대상으로 할 경우 추정 성능이 크게 떨어진다. 이에 본 논문에서는 Pulsed CW 신호를 사용하는 수중 음원의 위치를 추정하기 위해 단 구간 (short-time) 에너지 검출을 이용하여 핑 (ping)의 경계 영역을 포함하는 세그먼트를 구성하고 이로부터 MCPSP 함수를 구하는 방법을 제안하였다. 제안된 방법의 성능에 대한 이론적인 접근과 함께 다양한 환경 하에서 분석이 이루어졌다.

핵심용어: 음원 위치 추정, 상호상관, MCPSP 함수, Pulsed CW 신호

투고분야: 수중음향 분야 (5, 6)

There are many techniques for underwater source localization. These are the methods based on TDOA (Time Difference Of Arrival) estimation, beamforming techniques and high resolution techniques, etc. In this paper we estimate the underwater source position using MCPSP (Modified Cross Power Spectrum Phase) function that is calculated on frequency domain using sensors of small number. However, the performances of the localizing method based on MCPSP function drops greatly in the case of CW (Continuous Wave) signal. In this paper we proposed the TDOA estimation method for pulsed CW signal. In the proposed method we composed of new segment including a edge of ping. This segment was computed by short-time energy detection. With theoretical representation the performances of the proposed method were analyzed under various environment.

Keywords: Acoustic source localization, Cross-correlation, MCPSP function, Pulsed CW signal

ASK subject classification: Underwater acoustics (5,6)

I. 서론

수중의 3차원 공간상에서 고속으로 이동하는 수중 운동체의 움직임을 모니터링 하고자 할 때 위치에 따라 신뢰성 있는 좌표를 추정해야만 한다. 이는 수중 운동체의 시험/평가뿐만 아니라 일반적인 음원 위치 추정 분야에

서 매우 중요하다. 일반적으로 수중 운동체는 능동 및 수동형으로 동작하여 동체에서 방사되는 소음 정보를 이용하여 위치를 추정할 수 있을 뿐만 아니라 송신하는 핑 (ping)을 이용하여 위치 추정이 가능하다. 그러나 송신되는 핑은 대부분 Pulsed CW나 FM 신호로 구성되어 있으며, 이러한 신호를 이용하여 음원의 위치를 추정하여야 한다.

수중 음원의 위치를 추정하기 위해서 다수의 센서 어레이를 사용하여 빔 형성 기법 또는 MUSIC (MUltiple

Signal Classification)과 같은 고 분해능을 갖는 방위 탐지 기법들이 적용될 수 있으나 이는 많은 수의 센서가 필요하므로 시스템이 복잡해지고 계산량이 증가한다. 또한 운동체와 고정된 수신 센서의 시간 동기를 맞추고 운동체와 수신 센서간의 시간 지연을 구한 후에 이를 거리로 환산함으로써 운동체의 좌표를 얻을 수 있지만[1-3] 수중에서는 육상에서 GPS 신호를 사용하는 것과 같이 공통적인 시간 동기를 맞추기가 어렵다는 제약이 있다. 이에 본 논문에서는 위치가 고정된 측정 센서간의 상대적인 시간지연차를 구하여 음원의 위치를 추정하고자 하였다. 이 방법은 시간 동기화가 불가능한 조건에서 효율적이다.

시간지연차를 추정하는 방법은 기본적으로 두 센서 출력 신호 사이의 상호 상관도 추정을 기반으로 하며 본 논문에서는 주파수 영역에서의 상관도를 추정하는 CPSP (Cross Power Spectrum Phase) 방법의 확장된 방법인 MCPSP 방법을 적용하였다[5]. 그러나 MCPSP 방법은 신호의 주파수 특성이 광대역 신호일수록 정확한 시간 지연 차 추정이 이루어질 수 있으나 CW 신호인 경우 신호의 주기성으로 인하여 정확한 추정이 어렵다. 이로 인해 수중 음원이 CW 신호를 사용하는 경우 음원 위치 추정은 큰 오차를 가지게 된다. 이에 본 연구에서는 Pulsed CW 신호를 사용하는 수중 음원의 위치 추정 방법을 연구하였다. 제안된 방법은 우선 단구간 에너지 연산을 통하여 핑의 경계 영역을 찾고 이 영역을 포함한 프레임으로부터 상관도를 구하여 시간 지연 차를 추정하는 것이다. 다양한 환경에 대하여 모의실험을 수행하여 성능을 검증하였다. 2장에서는 일반적인 음원 위치 추정 방법에 대해 설명하였고, 3장에서는 제안된 방법을 나타내었다. 4장에서는 모의실험 결과를 논의하고, 마지막 5장에서 결론을 맺었다.

II. 음원 위치 추정 방법

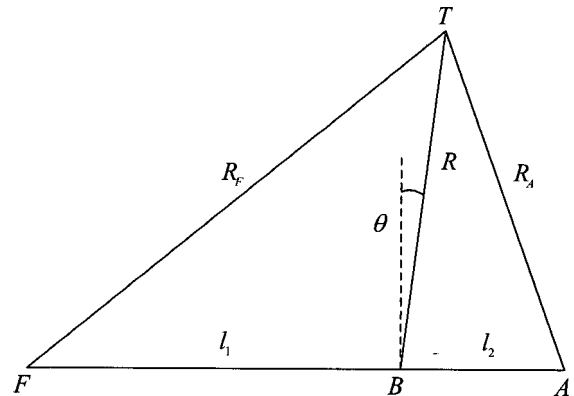
본 논문에서 적용된 음원 위치 추정 알고리즘인 시간 지연 차를 이용한 방법을 나타낸 그림 1은 시간 지연 분석에 이용되는 구조를 보여준다. 3차원의 좌표는 2차원 좌표의 조합이므로 여기서는 간단히 2차원 좌표인 경우에 대해서만 논의한다. A와 B는 두 개의 센서를 나타내고 F는 또 다른 센서를 나타낸다. R_F , R 그리고 R_A

는 음원으로부터 각 센서들까지 신호의 직접 경로들이다. 이 값들은 시간 지연의 두 값을 측정할 수 있도록 만들어 준다. 첫 번째로 R_F 와 R 의 시간차는 음파 전달 시간에 있어서의 차이 $\tau_1 = (R_F - R)/c$, R 과 R_A 사이에 음파 전달 시간차는 $\tau_2 = (R - R_A)/c$ 와 같다. 여기서 c 는 음파 신호의 전달 속도이다. 구하고자 하는 음원까지의 거리와 방향은 센서 B를 기준으로 측정하고 따라서 R 이 실제 거리가 된다. 그리고 θ 는 관측부로부터 수직 축을 기준으로 한 음원에 대한 실제 방향이다. 측정된 τ_1 , τ_2 와 음원까지의 거리 R , 방향 θ 사이의 관계를 정리하면 그림에서 τ_1 에 대한 삼각형 TFB, τ_2 에 대한 TBA를 코사인 법칙을 이용하여 $\tau_1 = (R_F - R)/c$, $\tau_2 = (R - R_A)/c$ 와 같이 나타내고 τ_1 과 τ_2 에 대한 것은 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\tau_1 = \frac{-R + (R^2 + l_1^2 - 2Rl_1 \sin \theta)^{0.5}}{c} \quad (1)$$

$$\tau_2 = \frac{R - (R^2 + l_2^2 - 2Rl_2 \sin \theta)^{0.5}}{c} \quad (2)$$

식 (1)과 (2)는 R 과 θ 에 관한 τ_1 과 τ_2 의 비선형 대수적인 표현이다. τ_1 과 τ_2 를 측정된 입력 매개 변수로서 시간 지연 τ_1 과 τ_2 에 대한 거리(R)과 방향(θ)로 구성된 식으로 (1)과 (2)로부터 다음과 같이 재정리된다.



$$\tau_1 = (R_F - R)/c$$

$$\tau_2 = (R - R_A)/c$$

그림 1. 센서와 음원 사이의 기하학적인 구조
Fig. 1. Geometrical structure between sensor and sound source.

$$c\tau_1 = -R + R(1 + \frac{l_1^2}{R^2} - \frac{2l_1}{R} \sin \theta)^{0.5} \quad \text{m} \quad (3)$$

$$c\tau_2 = R - R(1 + \frac{l_2^2}{R^2} + \frac{2l_2}{R} \sin \theta)^{0.5} \quad \text{m} \quad (4)$$

$|x| < 1$ 일 때, $\sqrt{1+x}$ 의 급수 전개는 $(1+x)^{0.5} \approx (1+x/2 - \frac{x^2}{8} + \frac{x^3}{16} \dots)$ 와 같다. 따라서 식(3)에 $x = ((l_1/R)^2 - (2l_1/R)\sin \theta)$ 와 식 (4)에 $x = ((l_2/R)^2 + (2l_2/R)\sin \theta)$ 를 대입하고(l/R)에서 3 차나 그 이상의 고차 항을 무시하면,

$$c\tau_1 \approx -l_1 \sin \theta + \frac{1}{2} \frac{l_1}{R} \cos^2 \theta \quad (5)$$

$$c\tau_2 \approx -l_2 \sin \theta + \frac{1}{2} \frac{l_2}{R} \cos^2 \theta \quad (6)$$

(5)에 l_2 와 (6)에 l_1 을 곱하고 난 후 첫번째 값으로부터 두번째 값을 감산하면 식(7)과 같이 음원까지의 거리를 구할 수 있고, (5)에 l_2 를 곱하고 (6)에 l_1 를 곱한 후에 빼면 식(8)과 같이 도래각을 추정할 수 있다.

$$R = \frac{l_1 l_2 (l_1 + l_2) \cos^2 \theta}{2c(l_2 \tau_1 - l_1 \tau_2)} \quad (7)$$

$$\theta = \sin^{-1} \left[\frac{c(l_2 \tau_1 + l_1 \tau_2)}{-l_1 l_2 (l_1 + l_2)} \right] \quad (8)$$

식(7)과 (8)로부터 시간 지연 τ_1 과 τ_2 의 완전한 측정치를 얻을 수 있다면 거리와 방향을 구할 수 있다. 시간 지연 차를 추정하는 과정은 기본적으로 상호 상관 함수를 추정하여 얻을 수 있다. 아에는 GCC (Generalized Cross Correlation), SCOT (Smoothed COherence Transform), CPSP 함수 등이 있다.

본 논문에서 적용된 시간 지연 차 추정기법은 CPSP 함수의 변형된 형태인 MCPSP 라는 함수를 추정함으로써 계산된다. 반향신호가 없을 경우 두 개의 센서로 수신되는 신호는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x_1(t) &= s(t - d_1) \\ x_2(t) &= s(t - d_2) \end{aligned} \quad (9)$$

이때, d_i 는 신호원으로부터 i 번째 센서까지의 도달시간이다. 따라서 아래와 같은 두 신호의 상호 상관도를 구하면 마이크로폰간의 도달시간차이인 $d_1 - d_2$ 에서 최대 값을 갖게 된다. 이것이 찾고자 하는 시간 지연 차이이며, 주파수 영역 변환을 통해 아래와 같이 계산할 수 있다.

$$R_{x_1 x_2}(d) = IDFT(X_1(w) \cdot X_2^*(w)) \quad (10)$$

그러나, 사전에 신호에 대한 아무런 통계적 특성을 갖고 있지 못한 경우, 단순한 상호 상관도 보다는 정규화된 값을 사용함으로써 성능을 높일 수 있다. 이렇게 정규화된 상관도를 MCPSP 라고 한다.

$$MCPSP_{x_1 x_2}(d) = IDFT \left(\frac{X_1(w) \cdot X_2^*(w)}{(|X_1(w)| |X_2(w)|)^\rho} \right) \quad (11)$$

식 (11)과 같은 MCPSP 함수의 최대값 위치로부터 시간지연차를 찾아낸다. 여기서 ρ 는 정규화 시키는 값을 의미한다. ρ 가 1일 경우 CPSP 함수와 동일하다. 이러한 값은 실제 실험 등을 통하여 환경에 따라 설정하도록 한다.

III. Pulsed CW 신호를 위한 위치 추정 기법

시간 지연 차 측정 방법은 음원의 특성이 주기성이 없는 광대역 신호일 경우 가장 이상적인 결과를 나타내지만 본 논문에서의 관심 대상은 Pulsed CW 신호이다. 핑 구간 내의 단일 주파수의 경우 센서간의 간격이 음원의 반파장의 길이를 갖는 경우 위상의 차이를 측정함으로써 음원의 도달 시간차를 계산 할 수 있다. 하지만 센서간의 간격 제한 조건으로 인하여 이러한 방법은 좋은 효과를 얻을 수 없다.

본 논문에서는 주기성이 있는 음원의 시간 지연 차를 구하고자 한다. 그림 2는 핑 신호에서 MCPSP 함수에 적용되는 신호의 기존의 방법과 본 논문에서 제안한 방법의 비교 그림이다. 그림 2에서 핑 구간내에서 2개의 센

서에 수신된 임의의 주파수 ω_0 를 갖는 pulsed CW 신호는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} x_1(t) &= \alpha_1 \sin \omega_0(t-d_1) + n_1(t) \\ x_2(t) &= \alpha_2 \sin \omega_0(t-d_2) + n_2(t) \end{aligned} \quad (12)$$

여기서, $x_1(t), x_2(t)$ 는 수신 신호, α_1, α_2 는 감쇄 상수이며, $n_1(t), n_2(t)$ 는 수신 잡음이다. 감쇄와 잡음의 영향이 없는 이상적인 경우 식(12)를 Fourier transform을 취하여 식(11)에 대입한 결과는 식(13)과 같다.

$$\begin{aligned} MCPSP_{x_1, x_2}(d) &= IDFT \\ &\left(\frac{|X_1(\omega)| \exp[j(\Phi_1(\omega) - \omega t_1)] \cdot |X_2(\omega)| \exp[-j(\Phi_2(\omega) - \omega t_2)]}{(|X_1(\omega)| |X_2(\omega)|)^e} \right) \end{aligned} \quad (13)$$

윗 식에서 초기 위상을 알 수가 없기 때문에 서로의 위상 차이를 알 수 없다. 따라서 각 센서에 도달된 ping 구간내의 신호 $x_1(t)$ 과 $x_2(t)$ 를 사용하여 MCPSP 함수를 구할 경우 정확한 결과를 추정할 수 없다. 본 논문에서는 이를 개선하기 위하여 단구간 에너지를 검출을 통해 센서에 수신된 ping 신호의 시작점을 찾고 이 시작점을 기준으로 앞부분에 일정 길이의 묵음 구간을 둔 세그먼트를 이용하여 MCPSP 함수를 계산하였다. 이 경우 계산을 위한 세그먼트는 그림 2(b) 형태로 나타내어지며 2개의 수신센서에 묵음 구간이 포함된 ping 신호 x_{m1}, x_{m2} 는 다음과 같이 모델링 된다.

$$\begin{aligned} x_{m1}(t) &= \alpha_1 (\sin \omega_0(t-d_1)(u(t-d_1) - u(t-l)) + n_1(t) \\ x_{m2}(t) &= \alpha_2 (\sin \omega_0(t-d_2)(u(t-d_2) - u(t-l)) + n_2(t) \end{aligned} \quad (14)$$

여기서, l 은 윈도우 크기이며 $u(t)$ 는 단위 계단 함수(unit step function)이다. 감쇄 상수를 무시하고 잡음이 없는 이상적인 경우 식 (14)의 Fourier transform 형태는 식 (15)와 같다.

$$\begin{aligned} X_{m1}(\omega) &= \frac{\pi}{2j} [e^{-j\omega d_1} - e^{j\omega d_1}] + \frac{W_0}{\omega_0^2 - \omega^2} e^{-j\omega d_1} \\ &\quad - \frac{\pi}{2j} [e^{-j\omega l} - e^{j\omega l}] - \frac{W_0}{\omega_0^2 - \omega^2} e^{-j\omega l} \\ X_{m2}(\omega) &= \frac{\pi}{2j} [e^{-j\omega d_2} - e^{j\omega d_2}] + \frac{W_0}{\omega_0^2 - \omega^2} e^{-j\omega d_2} \\ &\quad - \frac{\pi}{2j} [e^{-j\omega l} - e^{j\omega l}] - \frac{W_0}{\omega_0^2 - \omega^2} e^{-j\omega l} \end{aligned} \quad (15)$$

이를 식 (10)의 IDFT변환을 위하여 정리하면 식 (16)과 같다.

$$\begin{aligned} X_{m1}(\omega) \cdot X_{m2}^*(\omega) &= k(e^{-j\omega d_1} - e^{-j\omega l})(e^{-j\omega d_2} - e^{-j\omega l})^* \\ &= k^2 e^{-j\omega(d_1-d_2)} - k^2 e^{-j\omega(d_1-l)} - k^2 e^{-j\omega(l-d_2)} + 1 \end{aligned} \quad (16)$$

단, $k = \frac{W_0}{\omega_0^2 - \omega^2}$

식(16)을 정리하여 Inverse Fourier transform을 취하면 pulsed CW 신호의 시간차 $t_1 - t_2$ 를 얻을 수 있

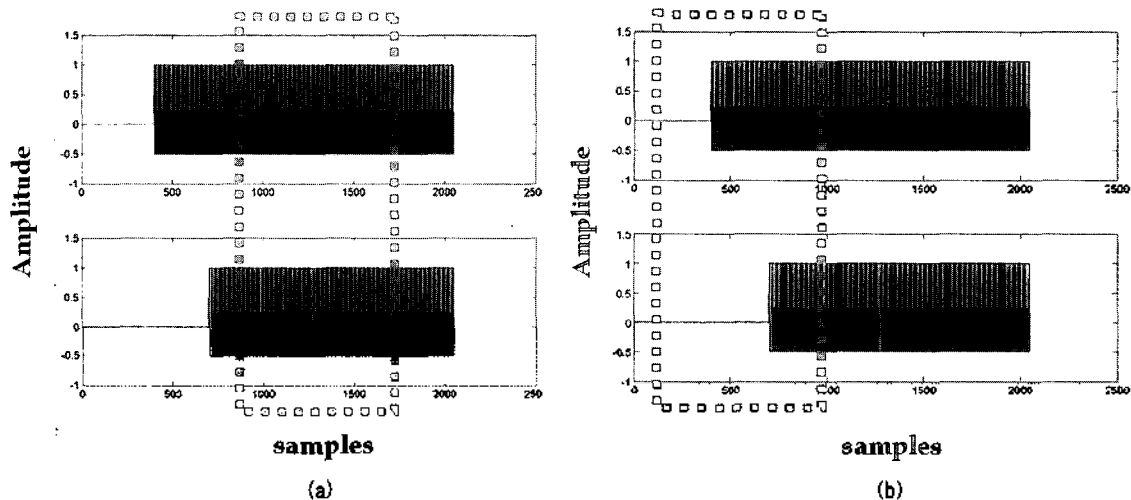


그림 2. 세그먼트 구성 방법 (a) 기존의 ping 구간 (b) 제안된 방법
Fig. 2. Segment composing method, (a) Previous ping duration, (b) Proposed method.

다. 핑 구간의 데이터로 상관도를 계산할 경우 신호의 반복적인 주기로 인하여 상관도 역시 주기 함수로 나오게 된다. 하지만 본 논문에서 제안한 방법은 핑의 경계 영역을 찾음으로써 상관도 계산에서 두 신호의 시간 지연 차를 얻을 수 있다.

IV. 모의실험 및 결과 고찰

본 논문에서 제안된 방법의 성능을 검증하고자 모의실험을 수행하였다. 모의실험에 사용된 신호는 Pulsed CW와 LFM 신호를 사용하였다. CW 신호는 중심 주파수 1kHz를 사용하고 샘플링 주파수는 48kHz를 사용하였으며 FFT 해상도는 2048 샘플로 하였다. LFM 신호는 CW 1kHz 신호로 사용하고 캐리어 주파수 10kHz를 사용하여 변조하였으며 주파수 편차는 5kHz, 대역폭은 12kHz로 하였다. 샘플링 주파수는 100kHz, FFT 해상도는 2048 샘플을 사용하였다. 센서간의 간격은 20m로 하였으며 선형 배열을 하였다. 모의 실험에 사용된 신호의 세그먼트는 단구간 에너지 검출을 통하여 추정된 시작점으로부터 200 샘플만큼 묵음 구간을 둔 신호를 센서 1에 도달하는 신호로 정의하고 센서 2에 도달하는 신호의 시간차를 600 샘플로 정의하였다.

그림 3, 4 모두 MCPSP 함수 기법을 이용하여 센서간의 도달 시간차를 계산한 결과이다. 그림 3(a)는 CW 신호의 핑 구간 내의 데이터를 이용하여 시간 지연 차를

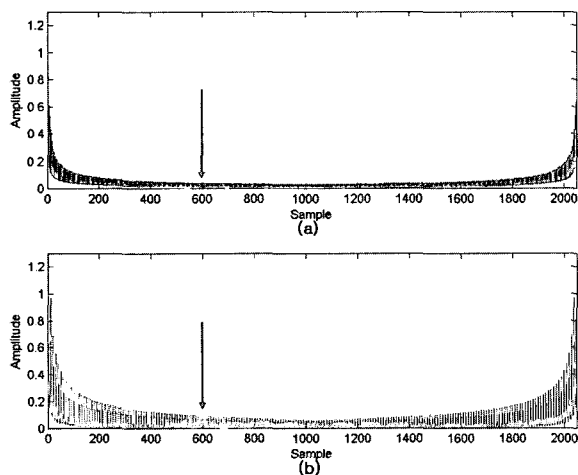


그림 3. 핑 구간 내의 데이터를 이용하여 시간 지연 차를 추정된 결과. (a) CW, (b) LFM

Fig. 3. Result for TDOA estimation using data on ping duration. (a) CW. (b) LFM.

추정한 결과이며, 그림 3(b)는 LFM 신호의 결과이다. MCPSP 함수의 특성상 크기 성분을 정규화 한 값들이며 두 신호 모두 정답인 600 샘플이 아닌 전혀 다른 지점에서 첨두치 (peak)가 나타나는 것을 확인 할 수 있다. 이 그림에서 알 수 있듯이 각 신호의 핑 구간 내의 데이터를 이용한 시간 지연 차 검출에는 문제점이 발생한다. 이러한 문제점을 보완하기 위하여 본 논문에서 제안된 방법으로 얻은 결과를 그림 4에 나타내었다. 그림 4 (a)와 (b)는 각각 CW 신호와 LFM 신호의 결과로서 두 신호의 시간 지연 차 600 샘플을 정확하게 검출하고 있다. 그림 3과 그림 4를 비교하면 제안된 방법으로 추정된 시간 지연 차의 값이 음원의 특성에 관계없이 정확한 값을 추정하고 있음을 알 수가 있다.

두 센서에 수신된 신호의 도달 시간차를 측정하는데 있어 본 논문에서 제안한 방법에 의한 결과를 살펴보면 시간 지연 지점에서 최대 값이 나타나지만 부엽의 첨두치도 함께 나타남을 알 수 있다. 이는 신호 세그먼트 구성시 임의로 설정한 묵음구간의 길이와 관계가 있으며 이 길이는 두 센서간의 최대 시간 지연 차 검출 영역 보다 먼 영역에서 부엽 첨두치를 나타내게 하는데 목적이 있다. 최대 도달 시간차 이상의 영역의 결과 값들은 고려 대상에서 제외가 된다.

그림 5는 Pulsed CW의 경우 SNR (신호 대 잡음비)에 따른 MCPSP 함수 검출 결과이다. 그림 5(a)는 SNR 0dB인 경우로서 잡음의 영향으로 인하여 정확한 지연 시간차를 검출하지 못하고 있다. 그림 5(b) ~ (d)는 각각 SNR 10dB, 20dB, 30dB에 대한 MCPSP 함수 검출

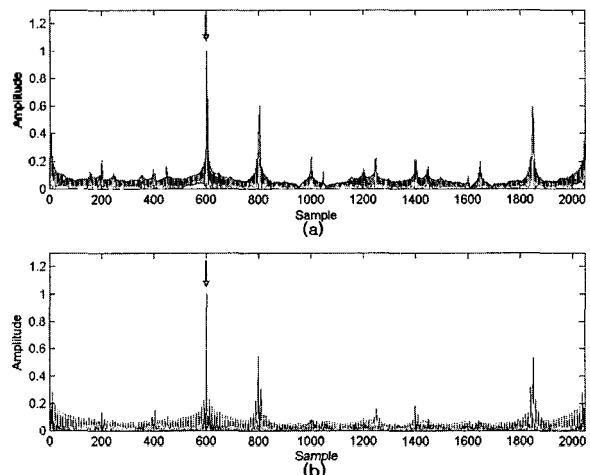


그림 4. 제안된 방법을 이용하여 시간 지연 차를 추정된 결과. (a) CW, (b) LFM.

Fig. 4. Result for TDOA estimation using proposed method. (a) CW. (b) LFM.

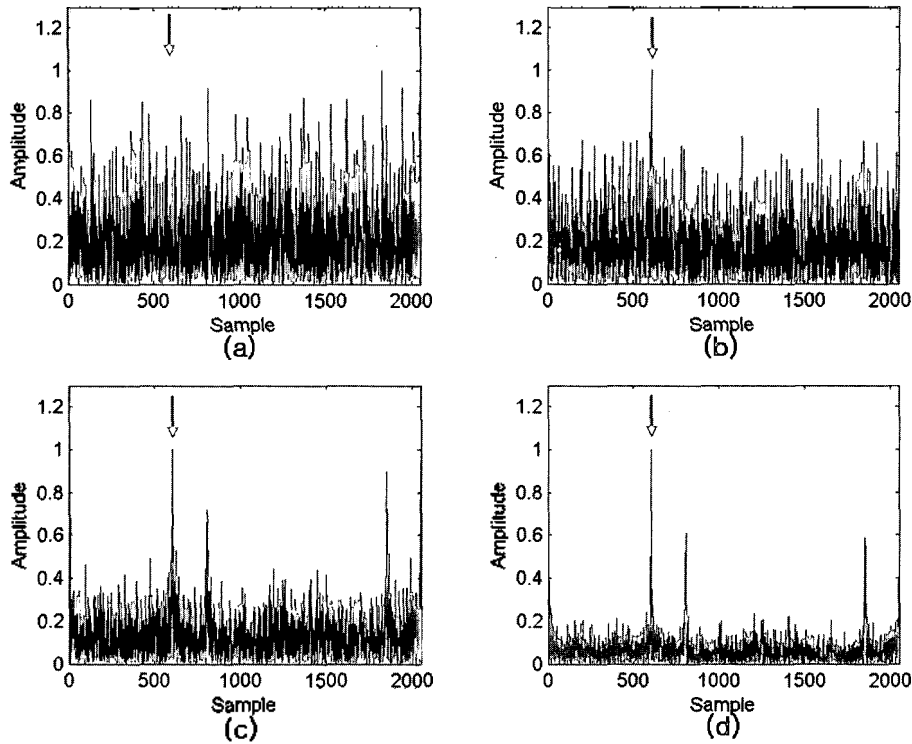


그림 5. 신호 대 잡음비에 따른 제안된 방법의 성능. (a) 0dB, (b) 10dB, (c) 20dB, (d) 30dB.
 Fig. 5. Performances of the proposed method according to SNR. (a) 0dB, (b) 10dB, (c) 20dB, (d) 30dB.

결과로서 잡음의 영향으로 인하여 부엽의 크기들이 나타나고 있지만 정확하게 신호의 지연차이를 검출하고 있음을 알 수 있다. 또한 SNR이 향상 될수록 부엽의 크기 값이 작아 지는 것을 알 수 있다. 이는 SNR이 무한대 즉, 이상적인 CW 함수일 경우 본 논문에서 제안한 방법으로 두 신호의 지연 시간차를 정확히 검출하고 있음을 알 수 있다.

그림 6은 본 논문에서 제안한 방법을 사용하여 Pulsed CW 신호를 대상으로 하여 SNR에 따른 시간 지연 차 추

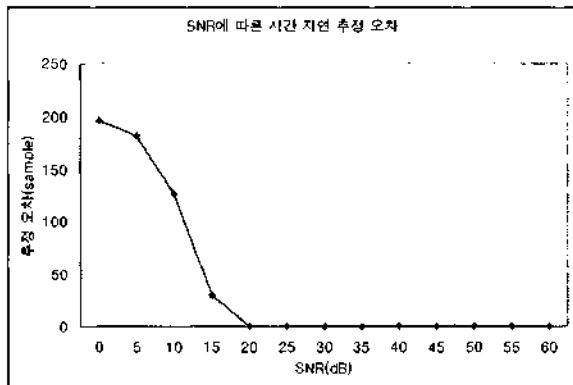


그림 6. 신호 대 잡음비에 따른 평균 추정 오차.
 Fig. 6. Average estimation error performance according to SNR.

정 성능을 나타낸 것이다. 각각의 SNR에 대하여 1000번의 독립 시행한 모의 실험 결과의 평균값이다. SNR이 20dB 이상일 경우 즉, 완전한 CW 신호에 가까운 경우에 시간 지연 오차는 0 샘플을 나타내며 정확한 추정을 하였다. 하지만 15dB 일 경우 평균 34 샘플의 오차를 나타내었으며 10dB 이하로 내려 갈수록 지연 시간 추정 오차는 크게 늘어나고 있음을 알 수 있다. 이것은 잡음으로 인한 영향으로 앞으로 극복해야할 문제이다. 이상의 결과들로 본 논문에서 제안한 수정된 창 함수를 사용한 기법을 이용한 Pulsed CW 신호의 도달 시간 지연 차를 MCPSP 함수를 통하여 정확히 추정할 수 있음을 알 수 있다.

V. 결론

본 논문에서는 수중에서 Pulsed CW 신호를 사용하는 음원의 위치를 추정하기 위한 개선된 TDOA 추정방법을 연구하였다. 연구된 기법은 음원과 고정 센서간의 시간 동기 없이도 음원의 위치를 추정하기 위하여 MCPSP 함수

수를 이용하여 시간 지연 차를 추정하였으며, 특히 단구 간 에너지 검출을 통하여 핑의 경계를 포함한 프레임으로부터 상관도를 구하였다. 이론적인 배경과 함께 다양한 환경에 대하여 모의실험을 수행한 결과 제안된 방법의 성능을 검증하였다. 추후 실제 해상 실험을 통하여 측정된 데이터를 이용하여 그 성능을 검증하여야 할 것이다.

• 손 권 (Kweon Son)
한국음향학회지 제18권 제8호 참조

• 도 경 철 (Kyeong-Cheol Dho)
한국음향학회지 제 18 권 제 8 호 참조

감사의 글

본 논문은 정보통신부 ITSoC 사업단의 연구비지원으로 이루어 졌습니다.

참고 문헌

1. Nielsen, R. O., *Sonar Signal Processing*. Boston, MA: Artech House, pp.51-94, 1991.
2. Zhuliang Yu, Susanto Rahardja, "DOA Estimation Using Two Closely Spaced microphones", *Proceedings of "the 2002 IEEE International Symposium on Circuits and Systems" 2*, 193-196, May 2002.
3. 박준석 외 6인, "수중환경에서 위치추적 시스템의 구현에 관한 연구", *한국음향학회 학술발표대회 논문집*, 22(1(s)), pp.433-436, 2003.
4. J. Benesty, "Adaptive eigenvalue decomposition algorithm for passive acoustic source localization" *J. Acoust. Soc. Am.* 107(1), January 2000.
5. D.V. Rabinkin, *Optimum sensor placement for microphone arrays*, Ph.D dissertation, Rutgers University, 1998.
6. M. Brandstein and D. Ward, *Microphone Arrays - Signal Processing Techniques and Applications*, Springer, 2001.
7. 최희열, 최승전, "A Time-Delay Correlation Matching to Source Separation", *제19회 한국음향학회 음성 통신 및 신호처리 학술대회 논문집*, pp. 221-224, 2002.
8. J. Benesty and S.L. Gay, *Acoustic signal processing for telecommunication*, Kluwer Academic Publishers, 2000.

저자 이력

• 최 영 근 (Young-Keun Choi)
한국음향학회지 제22권 제7호 참조

• 김 기 만 (Ki-Man Kim)
한국음향학회지 제22권 제5호 참조

• 이 상 국 (Sang-Kuk Lee)