

다중 음원 환경에서의 수동 거리 추정

양인식 · 김준환 · 김기만

한국해양대학교 전파공학과

Passive Range Estimation Based on Towed Line Array in Multi-Target Environment

In-Sik Yang · Jun-Hwan Kim · Ki-Man Kim

Dept. of Radio Science & Eng., Korea Maritime University

E-mail : insic@shinbiro.com

요 약

수동형 거리 추정을 위해 다양한 기법들이 논의되고 있다. 바다 속과 같은 신호대 잡음비가 낮은 환경으로 인해 기존의 기법들은 오차발생으로 인한 정확한 음원의 거리 추정이 곤란하다. 그리하여 견인 어레이상에서 부어레이를 구성하여 부어레이의 빔 형성기를 가지고 다중 음원 환경에서 원하는 방향으로 표적과의 거리를 추정한다. 이 때 탐지 방향 이외의 음원 방향의 이득을 최소화시키는 null-constraint 기법을 사용하여 보다 향상된 거리 추정 기법을 제시한다.

ABSTRACT

Various methods of enhancing the performance of passive range sonar arrays have been discussed, triangulation, wavefront curvature method etc. But they are not appropriate to the methods because of very low SNR in underwater environment. We made appropriate sub-arrays in a linear array and applied to the beamformers such as a minimum variance with null constraints.

1. 서 론

다중 음원 환경에서 원하는 방향의 음원의 거리를 추정하는 문제에 있어서 그 동안 여러 분야에서 연구되어 오고 있다. 그러나 소나가 쓰이는 해양환경의 불안정성은 다중 음원 추적에 있어서 심각한 장애가 되고 있다. 특히 수동형 거리 추정 기법에 주로 쓰이는 방법 중에서 삼각기법은 두 개의 어레이 각각에 들어오는 신호가 코히어런스함을 요구한다. 다른 방법으로 wavefront-curvature 기법은 세 개의 어레이를 사용하는 것으로 인접 어레이간의 신호성분이 코히어런스함을 요구한다.[1] 따라서 열악한 수중 환경에서의 기존의 기법들은 위와 같은 특성으로 인해 거리 추정의 모호성이 생기게 된다.

본 논문에서는 어레이 중심을 기준으로 좌우

두 개의 빔 형성기를 가지고 동일한 방법으로 신호처리를 한다. 음원의 방향은 이미 알고 있다고 가정하고 빔 형성기들은 음원 데이터에 의존한 MV(Minimum Variance) 빔 형성기로 구성하고, 다중 음원 환경으로 인해 생기는 원하지 않는 방향의 음원의 파워 값을 null-constraint 기법으로 최소화시킨다.

II. 기존의 수동 거리 추정 기법

2.1 삼각 기법(Triangulation method)

그림 1로부터 각각의 삼각형에서 사인법칙을 적용하여 R_2 에 대한 두 가지 표현식을 유도하여

곱하면 식(1)과 같다.

$$R_2 = (R_{21}/R_{32})^{1/2} \cdot \left(\frac{\cos B_{32}}{\cos B_2} \frac{\cos B_{21}}{\cos B_2} \right)^{1/2} \quad (1)$$

그림 2는 시간 지연 분석에 이용되는 구조를 보여준다. A, C는 합에 부착된 각각의 센서그룹이고 F는 전인 어레이의 센서를 나타낸다.[2] l_1 과 l_2 는 각각의 그룹센서들간의 거리이며 $l_1 \gg l_2$ 이다. R_F, R 그리고 R_A 는 음원으로부터 각 센서들까지 도달하는 신호경로이다. 각각 인접한 그룹센서간의 시간 지연 차이 $\tau_1 = (R_F - R)/c$, $\tau_2 = (R - R_A)/c$ 와 같다. 여기서 c 는 수중에서의 음파속도이다. 음원과의 거리와 방향은 그룹센서 C를 기준으로 하고 R이 실제 거리가 된다. θ 는 C의 수직을 기준으로, 음원에 대한 실제 방향이다. τ_1, τ_2 를 가지고 각각의 삼각형에 코사인법칙을 적용하여 정리하면,

$$R_2 = \frac{L_1 + L_2}{2} \frac{\cos B_2}{\cos(B_{32} - B_{21})} \quad (2)$$

2.2 Wavefront-curvature 기법

그림 2는 시간 지연 분석에 이용되는 구조를 보여준다. A, C는 합에 부착된 각각의 센서그룹이고 F는 전인 어레이의 센서를 나타낸다.[2] l_1 과 l_2 는 각각의 그룹센서들간의 거리이며 $l_1 \gg l_2$ 이다. R_F, R 그리고 R_A 는 음원으로부터 각 센서들까지 도달하는 신호경로이다. 각각 인접한 그룹센서간의 시간 지연 차이 $\tau_1 = (R_F - R)/c$, $\tau_2 = (R - R_A)/c$ 와 같다. 여기서 c 는 수중에서의 음파속도이다. 음원과의 거리와 방향은 그룹센서 C를 기준으로 하고 R이 실제 거리가 된다. θ 는 C의 수직을 기준으로, 음원에 대한 실제 방향이다. τ_1, τ_2 를 가지고 각각의 삼각형에 코사인법칙을 적용하여 정리하면,

$$\tau_1 = \frac{-R + (R^2 + l_1^2 - 2Rl_1 \sin \theta)^{1/2}}{c} \quad \text{sec} \quad (3a)$$

$$\tau_2 = \frac{R - (R^2 + l_2^2 - 2Rl_2 \sin \theta)^{1/2}}{c} \quad \text{sec} \quad (3b)$$

위 (3)식을 Taylor 급수 전개를 이용하고 고차항들을 무시하면 다음과 같다.

$$c\tau_1 \approx -l_1 \sin \theta + \frac{1}{2} \frac{l_1^2}{R} \cos^2 \theta \quad (4a)$$

$$c\tau_2 \approx -l_2 \sin \theta - \frac{1}{2} \frac{l_2^2}{R} \cos^2 \theta \quad (4b)$$

위 식(4a),(4b)를 연립하여 풀면 실제 거리 R과 θ 를 구할 수 있다.

$$R = \frac{l_1 l_2 (l_1 + l_2) \cos^2 \theta}{2c(l_2 \tau_1 - l_1 \tau_2)} \quad (5)$$

$$\theta = \sin^{-1} \left[\frac{c(l_2^2 \tau_1 + l_1^2 \tau_2)}{-l_1 l_2 (l_1 + l_2)} \right] \quad (6)$$

삼각 기법과 wavefront-curvature 기법은 추정방법이 비슷하지만 방향에 따른 오차가 상이하게 나타난다.[3][4]

III. MV 빔 형성기를 이용한 다중 음원 환경에서의 거리 추정 및 null-constraint

기존의 삼각 기법과 wavefront-curvature 기법들은 근거리에서의 음원의 위치를 추정하는 방식으로서 본 논문에서도 근거리에 해당하는 어레이 길이의 약 10배에서의 다중 음원 환경에서의 위치 추정이 이루어진다.[5] 그리고 빔 형성기의 특성을 살리고 원하지 않는 방향의 음원의 파워 값을 최소화할 수 있는 주 빔에서의 빔 폭이 좁고 침예한 MV(Minimum Variance) 빔 형성기를 사용하였다.

3.1 null-constraint를 적용한 MV 빔 형성기

MV 빔 형성기는 기존의 빔 형성기와는 달리 수신된 데이터, 즉 음원 정보에 의존하는 방법으로 선형어레이의 n 번째 센서의 출력은 다음과 같다.

$$u_n(t) = x_n(t) + v_n(t) \quad n = 1, \dots, N$$

$$x_n(t) = \sum_{m=1}^M \phi^{(n-1)} S_m(t) \quad n = 1, \dots, N$$

이고 N은 센서 개수, M은 어레이에 도달하는 파수, $S_m(t)$ 는 파수에 따라 수신된 신호의 세기이고, $v_n(t)$ 는 n 번째 센서에서의 평균이 영인 백색잡음이고 어레이 응답 벡터는 다음과 같다.

$$\phi_m = e^{j2\pi(d/\lambda)\sin(\theta_m)} \quad (7)$$

수신된 신호의 공분산 행렬 R_x 은 $E[x(t)x(t)^H]$ 이고 $(\cdot)^H$ 은 Hermitian을 나타낸다. 이득에 대한 출력 파워를 최소화시키는 가중치 계수는 다음과 같다.

$$w = \frac{R_x^{-1} \phi^n}{(\phi^n)^H R_x^{-1} \phi^n} w_a \quad (8)$$

이 때, 가중치 계수 $w_a = [1 \ 0 \ 0 \ \dots]$ 로 두어 원하는 방향에서의 신호의 파워 값은 그대로 통과시키고 그 외 원하지 않는 방향에서는 null을 형성하게 된다.

최소화시킨 출력 파워는 다음과 같다.

$$P_{out} = w^H R_x w \quad (9)$$

3.2 다중 음원 환경의 빔 형성기 처리 과정

3.1 절에서는 null constraint 기법을 MV 빔 형성기에 적용시켜 원하지 않는 방향에서의 음원의 세기를 최소화시킨 출력 파워 값을 식(9)와 같이 나타내었다. 본 절에서는 그때의 P_{out} 을 가지고 음원의 거리를 추정하게 된다. 그림 4와 같이 좌, 우 두개의 부 어레이로 나누어 미리 음원의 방향은 알고 있다고 가정하고 그때의 음원 방향으로 가상의 선을 그어 하나의 단계가 $[m]$ 인 S개의 단계로 구성하였다. 그리고 임의의 가시거리를 약 어레이 길이의 10배로 두고 각각의 단계에 해당하는 셀에 좌, 우에 빔 형성기를 가지고 빔을 형

성하여 최대 파워 값을 찾는다. 그리고 제한된 범위한 빔 폭으로 인해 생기는 셀 간의 동일한 파워 값들을 보상하기 위해 보간법을 적용하여 적당한 함수 성분의 정보로 유도한다.

IV. 시뮬레이션 환경 및 결과 고찰

어레이 센서의 개수는 100개, 음원의 세기는 -10[dB], 센서간의 간격은 2[m], 음원의 주파수는 약 400[Hz]의 저주파 신호를 가지고 실험하였고, 잡음 성분은 가우시안 랜덤 신호를 첨가하였다. 음원의 거리는 어레이의 총 길이에 따른 길이의 약 10배 내에 해당하는 약 2[km]영역에서 음원의 거리 추정이 이루어졌다.

MV 빔 형성기의 특성상 데이터 수집 과정에서 근접한 방향에서의 고도의 분해능을 위해 다중 음원의 방향을 각각 어레이 수직면을 기준으로 30° , 35° , -60° 이다. 그림 3은 다중 음원 환경에서의 MV 빔 형성기를 이용하여 원하는 방향의 음원을 추정하는 것을 나타내고 있다. 점선은 다중 음원의 방향을 찾고 있고 실선은 원하지 않는 방향에서 나타나는 음원의 방향을 null-constraint 기법을 이용하여 원하는 방향의 빔을 형성하고 있다.

위 데이터를 기반으로 그림 4는 원하는 음원의 거리 추정을 나타내고 있다. 그림 4에서는 좌, 우 두 개의 선형으로 배열된 부 어레이로 구성된 MV 빔 형성기를 가지고 각각의 부 어레이의 가운데를 중심으로 원하는 방향의 음원으로부터 가상의 직선을 그어 일정한 셀 간격으로 빔을 형성하고 있다. 이 때 음원이 존재하는 셀에 해당되는 위치에서 음원의 거리 추정이 이루어지고 있다. 그리고 빔 파워 값들은 빔 폭에 따른 각 셀 간의 모호성을 줄이기 위해 보간법을 거친 후에 출력 값을 산출해 낸다.

그림 5는 관심 있는 영역에 따른 실제 거리를 기준으로 기존의 wavefront-curvature 기법과 MV 빔 형성기를 이용한 거리 추정을 비교한다. 0° - 60° 사이의 15° 간격의 관심 영역에서 실선은 실제 거리를 나타내고 있다. 각각의 음원의 세기는 -10[dB]이며 wavefront-curvature 기법에서의 거리 추정 능력이 불규칙하며 시간 지연에서 나타나는 오차로 인해 어려움을 알 수 있다. 그림 6은 다중 음원 환경에서의 원하는 방향에서 나타나는 음원의 파워 값을 나타내고 있다. 실제 거리는 (a) 1859[m], 음원의 방향은 30° 에서 나타나는 음원의 거리 추정 결과이고, (b) 그림은 실제 거리 1850[m], 음원의 방향 60° 에서의 거리 추정 결과이다.

V. 결 론

본 논문에서는 다중 음원 환경에서의 수동 거리 추정을 위해 MV 빔 형성기를 이용하여 기존의 삼각 기법과 wavefront-curvature 기법에서 나타나는 모호성, 낮은 신호대 잡음비로 인해 생기는 지연시간 오차 등의 문제를 해결하였다. 그리고 거리가 멀어질수록 열악한 바다 속 환경에서도 주 빔의 침예성, 좁은 빔 폭의 특성을 살릴 수 있는 MV 빔 형성기의 장점을 최대한 활용하였다. 또 다중 음원 환경에서 생기는 원하지 않는 방향에서의 음원을 null-constraint 기법을 가지고 그때의 빔 파워 값을 최소화시켰다.

앞으로 제안된 방법을 개선시키기 위해서는 신호대 잡음비가 낮은 열악한 수중 환경에서도 강력한 분해능을 가진 빔 형성기의 설계 및 수중 환경의 데이터 분석에 대한 연구가 요구되고 있다.

참고문헌

- [1] G. Clifford Carter, "Passive ranging errors due to receiving hydrophone position uncertainty," *J. Acoust. Soc. Amer.*, vol.65, no.2, pp. 528-530, Feb. 1979.
- [2] D. H. McCabe and R. L. Moose, "Passive source tracking using sonar time delay data," *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, vol. ASSP-29, pp.614-617, June 1981.
- [3] R. L. Moose and P. M. Godiwala, "Adaptive underwater target tracking using passive multipath time-delay measurements," *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, vol. ASSP-33, pp.777-787, Aug. 1985.
- [4] R. L. Moose and P. M. Godiwala, "Passive depth tracking of underwater manuvering targets," *IEEE Trans. Acoust., Speech, Signal Processing*, vol. ASSP-33, pp.1040-1044, Aug. 1985.
- [5] R. A. Kennedy, T. D. Abhayapala and D. B. Ward, "Broadband nearfield beamforming using a radial beampattern transformation," *IEEE Trans. Signal Processing*, vol. 46, no. 8, Aug. 1998.

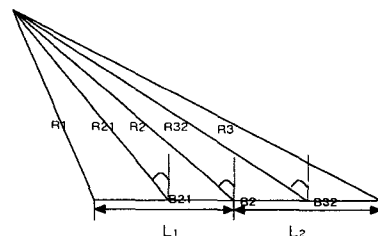


그림 1. Triangulation Method

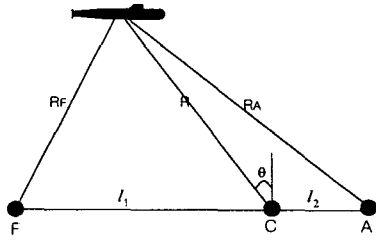


그림 2. Wavefront curvature Method

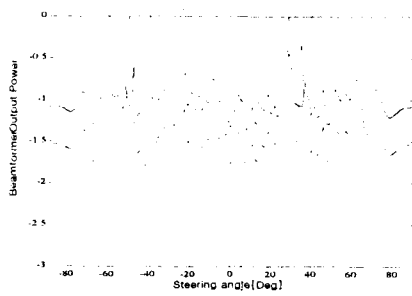


그림 3. MV beamformer output with null constraint (점선: 다중 음원 환경에서의 빔 출력, 실선: null-constraint 기법을 적용한 원하는 방향 30°에서의 빔 출력)

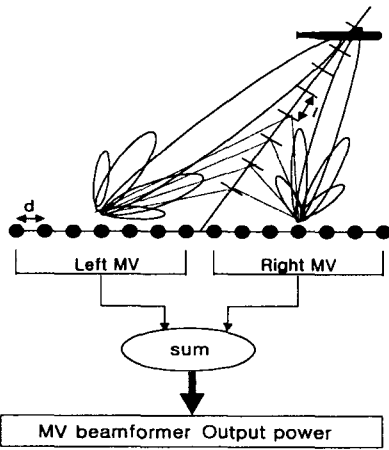


그림 4. MV 빔 형성기를 이용한 거리 추정

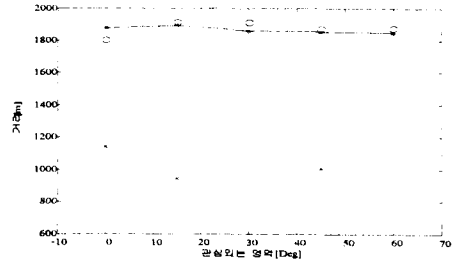


그림 5. Wavefront curvature 기법과 제안된 기법과의 관심 영역에 따른 거리 추정 비교 (실선: 실제 거리, 'x': wavefront-curvature 기법을 이용한 거리추정, 'o': MV 빔 형성기를 이용한 거리추정)

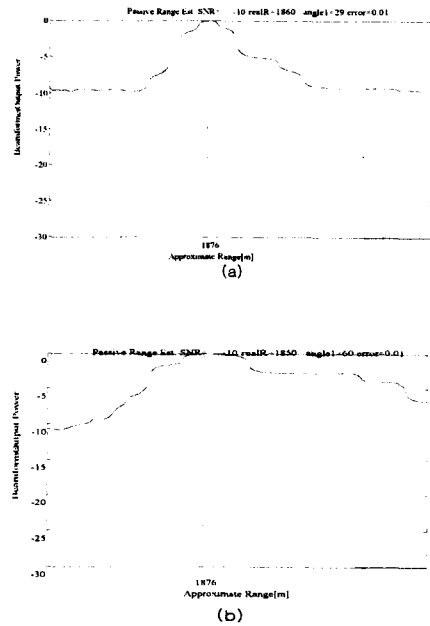


그림 6. MV with null-constraint 빔 형성기를 이용하여 거리 추정. (a) 음원의 방향이 30° 일 때 (b) 음원의 방향이 60° 일 때.