

어레이 형상 추정을 통한 ETAM 기법의 3차원 확장

박민수, 도경철*, 오원천*, 이충용, 윤대희
연세대학교 전자공학과 음향·음성 및 신호처리 연구실
*국방과학연구소

The 3D Extension of ETAM Method using Array Shape Estimation

Minsu Park, Kyeong Cheol Dho*, Won Tcheon Oh*, Chungyong Lee and Dae-Hee Youn
ASSP Lab., Dept. of Electronic Eng., Yonsei Univ.
*Agency for Defense Development

요약

본 논문에서는 칼만 필터 방법을 이용하여 견인 어레이의 3차원 형상을 추정하고, 어레이 합성 기법인 ETAM 방법이 추정된 3차원 형상에서도 적용 가능함을 입증한다. 기존의 합성 기법들은 모두 견인 어레이가 직선 형태를 유지하고 있다는 가정을 필요로 하지만, ETAM 방법은 3차원 형상 추정이 가능한 경우에 그러한 가정이 필요 없게 된다. 단, 3차원 어레이 형상에서 어레이를 확장하기 위해서는 절대 좌표를 추정할 수 있으며, 어레이가 동일한 견인 경로를 따라간다는 가정이 필요하다. 컴퓨터 모의 실험 결과 신호원의 입사각을 추정하였을 때, 주엽폭과 부엽레벨이 감소하는 등 합성이 가능함을 확인하였다.

1. 서론

수중에서 매우 낮은 신호 대 잡음 비와 저주파 대역의 특성을 나타내는 음원 환경에서 기존의 고정된 길이를 갖는 능동, 수동 소나 검출방식은 검출거리, 분해능면에서 한계에 이르게 되었다. 이러한 저주파 신호를 검출하고 신호의 방향을 알아내는데 있어서는 어레이의 길이가 길수록 성능이 향상되지만 물리적으로 무한히 긴 길이를 갖는 어레이를 이용한다는 것은 불가능하다. 이를 해결하기 위해 실제로는 한정된 길이를 갖는 어레이를 견인 하면서 입력된 신호를 합성함으로써 긴 어레이를 사용하는 효과를 내는 기술을 SAA(Synthetic Aperture Array) 소나 기술이라 하며, 이 기술을 이용함으로써 신호의 주파수 특성, 입사각 등을 추정하여 표적의 방향, 상대속도 등의 정보 분해능을 크게 향상시킬 수 있다[1].

Stergiopoulos 와 Sullivan 은 어레이를 견인하면서 입사신호가 겹치는 부분에 대하여 위상 보정 값을 얻어냄으로써 합성 어레이 출력신호를 만들어냈다[2,3]. 이 방법을 ETAM(Extended Towed Array Measurements)기법이라 하며 직접 입력된 데이터로부터 합성 어레이를 만들어냄으로써 견인 어레이의 위치 불안정으로 인한 오차가 없고 특히 표적신호의 주파수를 미리 알 필요가 없는 장점 있다. 이 방법에서 사용하는 견인 어레이는 일정한 깊이의 수심에서 직선을 유지하며 이동한다는 가정하에 음원의 방향을 탐지하기 위한 각종 어레이 신호처리 기법이 적용되어 왔다. 그러나 그러한 가정은 견인선의 속도와 운항 경로, 해류 및 파도등과 어레이의 길이, 두께 등으로 인해 실제 상황에서는 성립하지 않으며, 이로 인해 등간격 선형 어레이를 가정한 기존의 시스템은 심각한 성능 저하를 가져오게 된다. 이러한 문제점을 해결하기 위하여, 견인 어레이의 형상 변화를 추정하려는 노력이 진행되어 왔다. 견인 어레이의 형상 추정 방법에는 어레이에 수심센서나 방위센서, 혹은 경사 센서 등의 비음향 센서를 보조 센서로 장착하여 형상을 추정하는 방법[4-6]과, 하이드로폰으로부터 받아들인 데이터만으로 형상을 추정하는 방법이 있다[7-8]. 다수의 보조 센서를 사용하는 경우 비용에 문제가 있고, 하이드로폰으로부터 받아들인 데이터만을 이용하는 경우 많은 계산량을 요구하므로, 적은 수의 보조센서로 적절한 계산량을 가지는 방법이 필요하다. 본 논문에서는 그러한 방법에 가장 가까운 칼만 필터 방법 사용하여 3차원 어레이 형상을 추정하고, 이를 이용하여 ETAM 방법을 3차원 어레이 형상에 적용하는 것이 가능함을 보인다. 2장에서는 칼만 필터 방법을 이용하여 3차원 어레이 형상을 추정하는데 필요한 부분을 간략히 설명하고, 3장에서는 3차원 어레이 형상에서도 ETAM 방법이 성립함을 보이며, 4장에서는 추정된 형상을 바탕으로 ETAM 방법이 적용 가능함 시뮬레이션을 통해 검증하고 5장에서 결론을 맺는다.

본 연구는 수중음향특화연구센터의 연구비 지원으로 이루어 졌습니다. (과제번호 : UA-22)

2. 칼만 필터를 이용한 전인 어레이의 3차원 형상 추정

전인 어레이가 3차원 형상을 가질 때, 어레이의 수평 변화와 수직 변화는 독립적으로 취급할 수 있다[9]. 따라서 water pulley 모델하에서 2차원 형상을 추정하는데 사용되었던 칼만 필터 기법[4,5]을 수평, 수직 어레이의 형상 추정에 적용하는 것이 가능하다.

3차원 어레이 형상을 추정하는 과정에서는 방위센서와 경사센서를 각각 수평 및 수직 보조 센서로 사용한다는 가정하에, 보조 센서가 장착된 어레이 위치에서 순간적인 수평 및 수직 각이 측정된다. 이 측정 값과 어레이의 유도항(driving term)이 그림 1과 같이 칼만 필터의 입력으로 사용되며, 칼만 필터는 보조센서로부터 측정된 순간 각 정보와 유도항으로부터 하이드로폰 위치에서의 순간 기울기에 해당하는 각 정보를 추정하게 된다.

위에서 추정된 각 하이드로폰의 수평 순간 각을 $(\hat{\phi}_1, \hat{\phi}_2, \dots, \hat{\phi}_m)$, 수직 각을 $(\hat{\theta}_1, \hat{\theta}_2, \dots, \hat{\theta}_m)$ 이라 하면, 각 정보로부터 하이드로폰의 좌표를 다음 식 (1)과 같이 복원한다.

$$\begin{aligned} x_i &= x_{i-1} + d \cos \phi_{si} \cos \theta_{si} \\ y_i &= y_{i-1} + d \cos \phi_{si} \sin \theta_{si} \\ z_i &= z_{i-1} + d \sin \phi_{si} \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 $x_1 = 0, y_1 = 0, z_1 = 0$ 으로 전인점의 좌표를 원점으로 설정하며, d 는 하이드로폰 사이의 거리이고, i 는 2, 3, ..., M 의 값을 가진다. ϕ_{si} 와 θ_{si} 는 각 하이드로폰 좌표 사이의 수평 및 수직 기울기에 해당하는 각으로써, 다음 식 (2)와 같이 표시된다.

$$\begin{aligned} \theta_{si} &= \frac{(\hat{\theta}_i + \hat{\theta}_{i-1})}{2} \\ \phi_{si} &= \frac{(\hat{\phi}_i + \hat{\phi}_{i-1})}{2} \end{aligned} \quad (2)$$

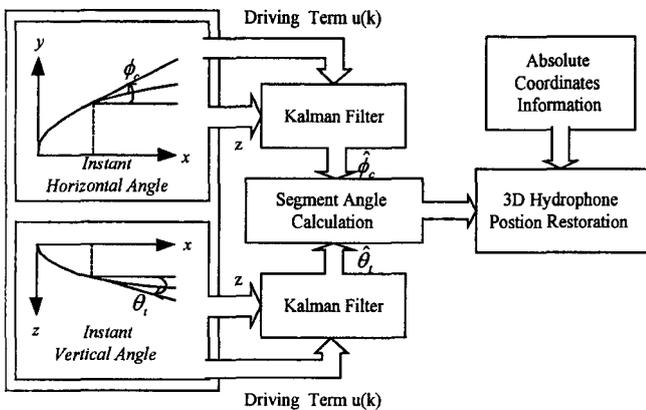


그림 1. 칼만 필터를 이용한 3차원 어레이 형상 추정 방법

3. 3차원 어레이 형상에서의 ETAM

신호원에서 발생하는 신호가 진폭이 A , 도플러 라디안 주파수가 w_d 인 협대역 음향 신호 $s(t) = A \exp(jw_d t)$ 로 표현될 때, 어레이의 전인 속도를 v 라 하고, 음원의 입사각 방향 속도 성분은 무시할 수 있을 정도로 작다고 가정하면, 라디안 중심 주파수 w_0 를 갖고 입사되는 음원의 도플러 주파수는 $w_d = w_0(1 \pm v \cos \theta \cos \phi / c)$ 로 표현된다. 여기서 ϕ 는 방위각, θ 는 고도각이며 c 는 수중에서의 음파 전달 속도이다. 신호원으로부터 발생된 음원이 어레이에 방위각과 고도각을 가지고 입사할 때, 배경 잡음이 없는 이상적인 상황에서 n 번째 하이드로폰에서 입사되는 신호는 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} x_n(t_i) &= A \exp \left\{ jw_d \left(t_i - \frac{x_n \cos \theta \cos \phi + y_n \cos \theta \sin \phi + z_n \sin \theta}{c} \right) \right\} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서 (x_n, y_n, z_n) 은 n 번째 하이드로폰의 좌표이고, 총 샘플 수가 L 일 때, 시간을 나타내는 인덱스는 $t_i = i\Delta t$ ($i = 0, 1, 2, \dots, L-1$)이며, n 은 1, 2, ..., M 값을 갖는 하이드로폰 인덱스이다.

하나의 동일한 경로를 따라 일정한 속도 v 로 이동하는 어레이의 n 번째 하이드로폰에 τ 초 후에 입사된 신호 $x_n(t_i + \tau)$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} x_n(t_i + \tau) &= A \exp \left\{ jw_d \left(t_i + \tau - \frac{x'_n \cos \theta \cos \phi + y'_n \cos \theta \sin \phi + z'_n \sin \theta}{c} \right) \right\} \end{aligned} \quad (4)$$

여기서 (x'_n, y'_n, z'_n) 은 τ 초 후의 n 번째 하이드로폰 좌표이며, 다음 식 (5)로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} x'_n &= x_{n+q} + v\tau + \Delta l_x \\ y'_n &= y_{n+q} + \Delta l_y \\ z'_n &= z_{n+q} + \Delta l_z \end{aligned} \quad (5)$$

Water pulley 모델에서는 파형이 전파되는 속도가 어레이의 이동속도와 같고, 이동 거리 또한 하이드로폰 사이의 거리와 일치하게 된다. 파형의 전파 방향도 절대 좌표계를 사용하므로 x 축 방향이 되며, 따라서 총 τ 초 동안 이동한 거리에 의해 좌표는 위 식 (5)에서 표현된 것처럼 x 좌표만이 $v\tau + \Delta l_x$ 만큼 이동하게 되고, 나머지 y, z 좌표는 $\Delta l_y, \Delta l_z$ 만큼 이동하게 된다. 여기서 q 는 총 τ 초 동안 이동한 거리에 속하는 하이드로폰의 개수이다. x 좌표에 대한 변화는 그림 2와 같다.

식 (5)에 의하여 식 (4)는 다음 식 (6)과 같이 표현된다.

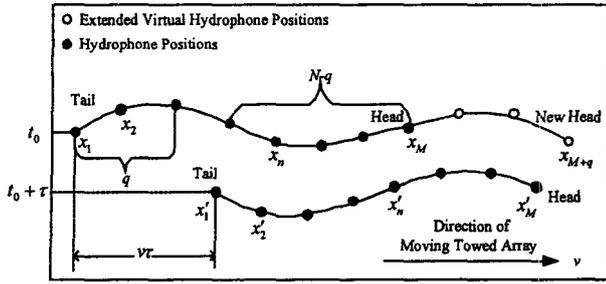


그림 2. 어레이 형상이 변화할 때의 ETAM 개념도

$$\begin{aligned}
 x_n(t_0 + \tau) &= A \exp(j\omega_d(\tau - \Delta_{\text{bys}})) \times \\
 &\exp\left\{j\omega_d\left(t_0 - \frac{x_n \cos \theta \cos \phi + y_n \cos \theta \sin \phi + z_n \sin \theta}{c}\right)\right\} \\
 &= \exp(j\omega_d(\tau - \Delta_{\text{bys}})) x_{n+q}(t_0), \\
 \Delta_{\text{bys}} &= \frac{(v\tau + \Delta l_x) \cos \theta \cos \phi + \Delta l_y \cos \theta \sin \phi + \Delta l_z \sin \theta}{c}
 \end{aligned} \quad (6)$$

어레이 사이의 위상 보정 성분을 Ψ_n 이라 하면, 그 식은 다음과 같이 중첩된 부분의 샘플들간의 상관관계로부터 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 \Psi_n &= \arg\{x_{n+q}(t_0)x_n^*(t_0 + \tau)\} \\
 &= \arg\{A^2 \exp(-j\omega_d(\tau - \Delta_{\text{bys}}))\} \\
 &= -\omega_d(\tau - \Delta_{\text{bys}})
 \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 “*”는 공액 복소연산자를 의미하고, 하이드로폰 인덱스는 $n=12, \dots, N-q$ 이다. 식 (7)에서 구한 위상 보정 성분에 의해 시간의 변화에 따라 하이드로폰에 들어오는 신호들이 보상되어 그림 2에 표현된 것과 같이 확장된다. 이와 같은 방식으로 3차원 형상에서도 ETAM 방법이 적용 가능하게 된다.

4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

3차원 어레이 형상 추정 환경에서 모의 실험을 위해 water pulley 모델을 사용한다. 어레이의 길이는 150 m이며, 하이드로폰의 수는 25개이고, 24개의 세그먼트로 나뉘어진다. 방위 센서와 경사 측정기는 어레이의 첫번째 세그먼트와 20번째 세그먼트에 위치해 있고, 깊이 정보를 제공하는 압력 측정기는 첫번째 세그먼트에 있다고 가정한다. 여기서 보조 센서는 하이드로폰과 매우 가까운 위치에 장착되어 있으며, 측정된 각(angle)은 그 세그먼트에 속하는 하이드로폰에서의 순간 각으로 가정한다. 또한 절대 좌표를 추정하는 것이 가능하다고 가정한다. 뿐만 아니라 어레이는 견인점의 이동 경로를 동일하게 따라간다고

가정되며, 입사각을 추정하는 데 있어서 신호원은 충분히 먼 거리에 위치되어 있어 견인선이 이동함에 따라 그 방향 추정에 커다란 영향을 미치지 않는다고 가정한다. 견인 속도는 2.0833m/s이며 이는 대략 4 knots 정도에 해당한다. 시간 간격은 $\rho=1$ 이 되도록 선택되어 3 초가 된다. 수평 최대 변위는 30m, 수직 최대 변위는 15m이며 이는 실제 실험 환경에서 관찰된 변위와 동일하게 설정한 것이다[14]. 두 경우 모두 동일한 주기 500 초를 갖는다.

그림 3은 첫번째 시간 세그먼트에서의 어레이 형상이다. Water pulley 모델에서는 견인점의 움직임이 전파되는 속도가 어레이의 이동속도와 동일하기 때문에, 모의 실험 환경에서 하나의 시간 세그먼트를 대략 4 knots(2.0833m/s)의 속도로 이동하는 거리는 6.25 m가 된다.

중첩되는 하이드로폰의 수는 13개로 설정했으며 ETAM 과정에서 매 측정(measurement)마다 확장되는 하이드로폰의 수는 12개가 된다. 본 모의 실험에서는 총 4번의 측정을 통하여 48개의 가상 하이드로폰이 만들어지며, 결과적으로 73개의 하이드로폰을 사용하는 효과를 얻게 된다. 이 때의 어레이 형태는 그림 4에 나타나 있다. 그림 5와 그림 6은 그림 3과 그림 4에 있는 추정된 하이드로폰 좌표를 이용하여, 각각 SNR이 10dB, 0dB 인 경우에 대해 신호원의 입사각 가운데 방위각을 추정한 것이다. 이 때 신호원의 입사 방향은 방위각 90° , 고도각 -5° 이며, 중심 주파수는 120 Hz인 톤(tone) 신호이다. 참고로 그림 5와 6은 방위각과 고도각이 모두 표현되어 있는 2차원 빔 전력 패턴에서 고도각 -5° 인 부분의 단면도이다. 합성된 결과는 빔 폭이 좁아져 해상도가 향상되었고, 부엽 레벨 역시 감소되었음을 볼 수 있다. 즉 3차원 형상에서도 ETAM 방법이 적용 가능함을 의미한다. 또한 0dB 이하에서는 성능이 저하되는 것으로 모의 실험 결과 확인되었다.

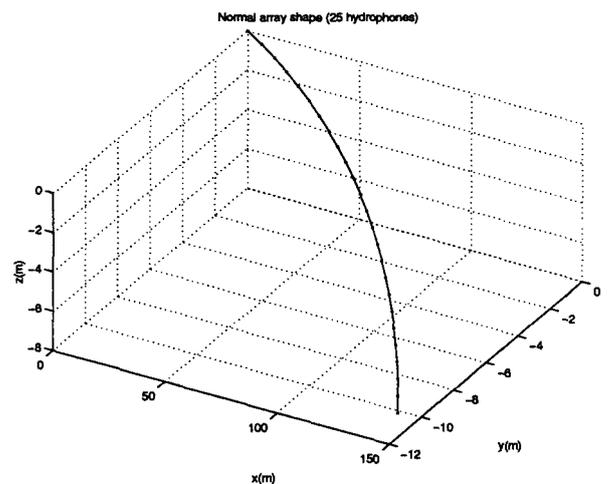


그림 3. 첫번째 시간 세그먼트에서의 3차원 어레이 형상

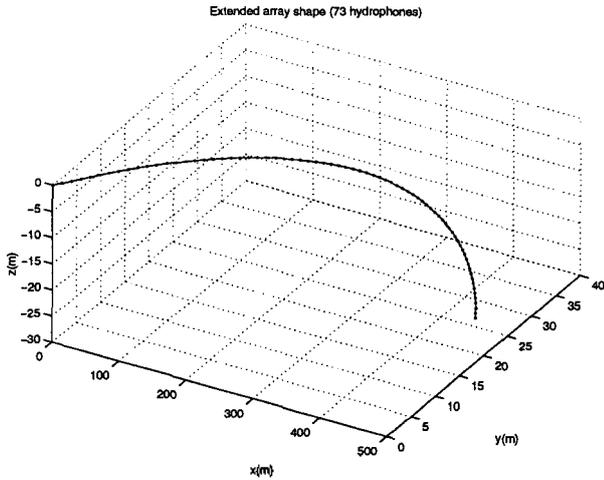


그림 4. 확장된 3 차원 어레이 형상

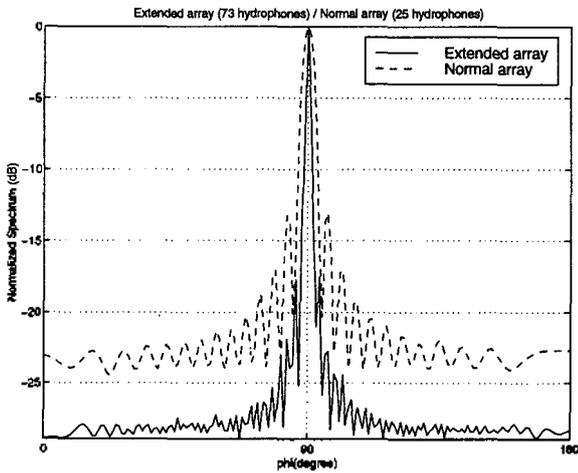


그림 5. 방위각에 대한 빔 전력패턴(10dB)

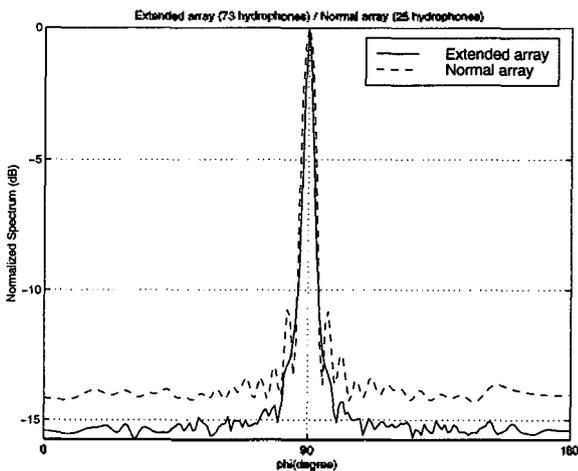


그림 6. 방위각에 대한 빔 전력패턴(0dB)

5. 결론

본 논문에서는 견인 어레이가 실제로 3차원 형상을 가질 때 어레이 합성 기법인 ETAM 방법이 적용 가능함을 입증하였다. 이를 위하여 3차원 어레이 형상을 추정하는 과정이 반드시 필요하며, water pulley 모델하에서 기존의 칼만 필터를 이용한 형상 추정 방법을 3차원으로 확장하였다. 이 과정에서 보조센서는 하이드로폰의 수직 수평 모양의 순간 각을 추정하게 되며, 추정된 순간 각과 하이드로폰 사이의 등간격 정보를 이용하여 3차원 좌표가 복원된다. ETAM 방법은 이렇게 추정된 3차원 형상을 이용하여 연속된 절대좌표를 추정하는 것이 가능하다는 가정하에 하이드로폰의 확장된 절대좌표를 바탕으로 입사신호를 합성한다. 신호원의 입사각을 추정하는 모의 실험을 통해 ETAM 방법이 3차원 형상에서 적용 가능함을 확인하였다.

6. 참고문헌

- [1] Samuel W. Autrey, "Passive Synthetic Arrays," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 84, no. 2, pp. 592-598, Aug. 1988
- [2] S. Stergiopoulos and E. J. Sullivan, "Extended towed array processing by an overlap correlator," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 86, no. 1, pp. 158-172, Jul. 1989.
- [3] S. Stergiopoulos, "Optimum bearing resolution for a moving towed array and extension of its physical aperture," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 87, no. 5, pp. 2128-2140, May 1990.
- [4] D. A. Gray, B. D. O. Anderson, and R. R. Bitmead, "Towed array shape estimation using Kalman filters - theoretical models," *IEEE J. of Ocean. Eng.*, vol. 18, pp. 543-556, Oct. 1993.
- [5] J. L. Riley and D. A. Gray, "Towed array shape estimation using Kalman filters - experimental investigations," *IEEE J. of Ocean. Eng.*, vol. 18, pp. 572-581, Oct. 1993.
- [6] P. Felisberto and S. M. Jesus, "Towed-array beamforming during ship's manoeuvring," *IEE Proc.-Radar, Sonar Navig.*, Vol. 143, pp. 210-215, June 1996.
- [7] Daniel E. Wahl, "Towed array shape estimation using frequency-wavenumber data," *IEEE J. of Ocean. Eng.*, vol. 18, pp. 582-590, Oct. 1993.
- [8] B. G. Quinn, R. F. Barrett, P. J. Kootsookos and S. J. Searle, "The estimation of the shape of an array using a hidden Markov model," *IEEE J. of Ocean. Eng.*, vol. 18, pp. 557-564, Oct. 1993.
- [9] Jeffrey Ketchman, "Vibration induced in towed linear underwater array cables," *IEEE J. of Ocean. Eng.*, vol. OE-6, pp. 77-87, Oct. 1981.