

# 능동 소나망의 표적 탐지 성능 비교

박치현\* · 홍우영\*\* · 고한석\*

\*고려대학교 전자공학과, \*\*해군사관학교

## Comparison of Active Sonar Systems in Target Positioning Performance

Chee-hyun Park\*, Wooyoung Hong\*\*, Hanseok Ko\*

\*Dept. of Electronics Engineering, Korea University, \*\*Korea Naval Academy

E-mail : chpark@ispl.korca.ac.kr

### 요 약

본 논문에서는 능동 소나망의 구성 방법 및 관측 오차에 따른 위치 추정 성능에 대해서 다룬다. 능동 소나망의 구성 방법에 따라서 크게 Monostatic, Bistatic, Multistatic으로 분류될 수 있으며, 각각의 오차에 대한 특성이 서로 다르다. 본 논문에서는 각 수신기가 거리합 정보와 방위각 정보를 얻을 수 있다는 가정 하에 LS를 이용한 Multistatic 소나망 정보의 융합 방법을 제안하였으며, Monostatic, Bistatic 소나망과 비교를 수행하였다. 모의 실험 결과 Multistatic 소나망의 위치 추정 RMSE가 Monostatic, Bistatic 소나망에 비해 약 57% 우수했다.

### ABSTRACT

This paper deals with target positioning performance according to active sonar formation and measurement error. Generally, active sonar can be categorized into Monostatic, Bistatic and Multistatic cases and their error characteristics are different each other. In this paper, on the assumption that each receiver has two kinds of measurements; sum of distances, and a angle between receiver and target, we suggest least square(LS) method that combines the two measurements in Multistatic formation, and compare Multistatic case with Monostatic and Bistatic cases. Experimental results show that target positioning RMSE in Multistatic sonar is superior to those in Monostatic and Bistatic sonar by approximately 57%.

### 키워드

능동소나, Monostatic 소나, Bistatic 소나, Multistatic 소나, Least square, 거리 정보, 방위 정보

## 1. 서 론

수중 탐지 시스템에서 사용하는 소나는 크게 능동소나와 수동 소나로 분류될 수 있으며 탐지 성능면에서의 장점으로 인하여 능동 소나가 많이 사용되는 추세이다. 능동 소나는 수신기와 송신기의 구성 방법에 따라서 일체형 송/수신기로 구성된 Monostatic 소나망, 각각 하나의 송/수신기로 구성된 Bistatic 소나망, 한 개 이상의 송신기와 다중 수신기로 구성된 Multistatic으로 구분될 수 있다. 표적의 소음이 감소되는 추세에 힘입어 최근 들어 Multistatic 소나망에 대한 관심이 높아지고 있다.

Multistatic 소나망에서의 융합 방법으로는 Torrieri[1]가 ML(Maximum Likelihood)을 이용하였고, Foy[2]는 ILS(Iterative Least Square)를 적용하였

는데 두 방법 모두 Taylor 급수와 반복법으로 위치를 추정했다. 또한 Manolakis[3]는 거리정보만을 융합하여 표적의 위치를 추정했다.

본 논문에서는 각 수신기가 송신기-표적-수신기의 거리합과 수신각 정보를 얻을 수 있다는 가정 하에 해석적 LS(Least Square) 방법을 이용한 다중 수신기 정보 융합 방법을 제안하였다. 또한 이러한 상황에서 Monostatic과 Bistatic 소나망과의 비교를 통하여 다양한 오차 환경에서 Multistatic이 어떠한 특성 및 장점을 가지는가에 대하여 분석하였다.

2장에서는 세 가지 소나망 구성에 따른 모넨팅에 대하여 설명하며, 3장에서는 제안한 Multistatic 소나망 정보 융합 기법에 대하여 기술한다. 4장에서는

모의 실험을 통하여 센서 오차에 따른 각 소나망의 성능을 분석한다.

## II. 능동 소나망 모델링

위치 추정 문제는 거리정보와 방위정보를 이용한다. 그러나, 일반적으로 입력된 정보들은 센서의 잡음으로 인해 식 (1)과 같이 모델링된다. 방위 정보에는  $n_\theta$ 인 가우시안 잡음, 거리정보에는  $nR$ 인 Rayleigh 잡음이 첨가된다고 가정한다.

$$\begin{aligned} \theta_R &= \theta_i + n_\theta \\ R_R &= R_i + n_R \end{aligned} \quad (1)$$

$\theta_i$ : 실제 방위각,  $\theta_R$ : 관측 방위각  
 $R_i$ : 실제 거리,  $R_R$ : 관측 거리

그러므로, 이러한 잡음 성분을 감소시켜 정확한 표적의 위치를 추정해야 한다. 본 논문에서는 몇가지 가정 아래 추적 알고리즘을 전개하였다. 첫째, 송,수신기의 좌표는 이미 알고 있다. 둘째, 소나의 관측방위는 0~360도 성분을 갖는다.

### 1. Monostatic 소나

Monostatic 소나는 그림 1과 같이 송신기와 수신기가 동일지점에 위치하며 음파를 발사하여 표적에 의해 반사되어 돌아오기까지 시간을 측정하여 표적에서 송/수신기까지의 거리정보를 얻고 표적의 방위정보와 융합하여 위치를 추정하는 소나이다. Monostatic 소나의 위치 추정 방정식을 송/수신기의 위치와 거리정보( $R_R$ )와 방위정보

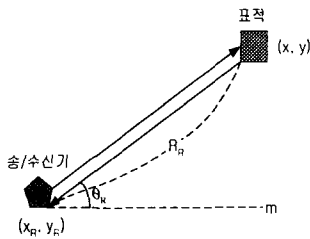


그림 1. Monostatic 소나 모델링

( $\theta_R$ )를 이용하여 표현하면 식 (2)와 같다.

$$\begin{aligned} \hat{x} &= x_R + R_R \cos \theta_R \\ \hat{y} &= y_R + R_R \sin \theta_R \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,  $x_R$ ,  $y_R$ 은 송,수신기의 x좌표와 y좌표이다.  $R_R$ 은 수신기와 표적간의 거리이고  $\theta_R$ 은 표적과 수신기와 직선  $m$ 이 이루는 각이고 식 (3)과 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$R_R = \sqrt{(x - x_R)^2 + (y - y_R)^2} + n_R \quad (3)$$

$$\theta_R = \tan^{-1} \left( \frac{y - y_R}{x - x_R} \right) + n_\theta \quad (4)$$

### 2. Bistatic 소나

Bistatic 소나는 그림 2와 같이 송신기와 수신기가 떨어져 존재하고 송신기와 표적, 수신기와 표적간의 거리의 합 ( $R_T + R_R$ )과 표적, 수신기, 송신기가 이루는 각( $\theta_R$ )을 측정하여 입력정보로 갖게 된다. Bistatic 소나의 위치 추정 방정식은 식(5)와 같다

$$\begin{aligned} \hat{x} &= x_R - R_R \cos(\theta_R - \theta') \\ \hat{y} &= y_R + R_R \sin(\theta_R - \theta') \end{aligned} \quad (5)$$

$R_R$ 은 수신기, 표적간 거리이고  $R_s$ 는 송신기와 표적,표적과 수신기간 거리의 합이고  $\theta'$ 은 직선  $m$ 과 송신기, 수신기가 이루는 각이다.

$L$ 은 송신기와 수신기간의 거리이다.

$$R_R = \frac{R_s^2 - L^2}{2(R_s - L \cos \theta_R)}, \quad R_s = R_T + R_R + n_R \quad (6)$$

$$\theta_R = \tan^{-1} \left( \frac{y_T - y_R}{x_T - x_R} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{y - y_R}{x - x_R} \right) + n_{\theta_R} \quad (7)$$

$$\theta' = \tan^{-1} \left( \frac{y_T - y_T}{x_R - x_T} \right) \quad (8)$$

$$L = \sqrt{(x_T - x_i)^2 + (y_T - y_i)^2} \quad (9)$$

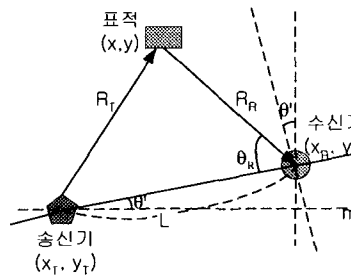


그림 2. Bistatic 소나 모델링

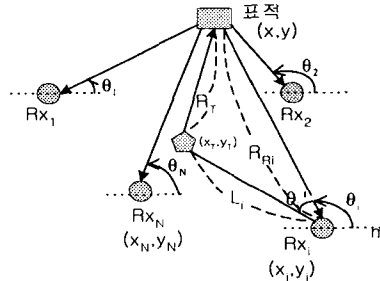


그림 3. Multistatic 소나 모델링

3. Multistatic 소나

Multistatic 소나는 송신기가 1개 이상, 수신기는 N개(N≥2)인 경우를 말한다. 그림 3은 송신기 1개, 수신기 N개인 Multistatic 소나 모델이다.

$$\mathbf{x} = (\mathbf{A}^T \mathbf{A})^{-1} \mathbf{A}^T \mathbf{b}, \quad \mathbf{x} = \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix} \quad (18)$$

III. 정보 융합 기법(LS)

그림 3에서 임의의 i번째 수신기  $R_{R_i}$ 에서 추정된 위치의 식을 수신기 위치와 표적과 수신기간 거리 ( $R_{R_i}$ )와 표적과 수신기가 이루는 각 ( $\theta_i$ )을 이용하여 나타내면 식 (10~11)과 같다.

$$\hat{x} = x_i + R_{R_i} \cos \theta_i, \quad (10)$$

$$\hat{y} = y_i + R_{R_i} \sin \theta_i,$$

$$(\hat{x} - x_i)^2 + (\hat{y} - y_i)^2 = R_{R_i}^2 \quad (11)$$

각 수신기와 기준 수신기의 위치추정식을 뺀 후 벡터 형태로 나타내면 식 (12)와 같다.

$$[\mathbf{x} - \mathbf{x}_M \quad \mathbf{y} - \mathbf{y}_M] \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} x^2 - x_M^2 + y^2 - y_M^2 + R_M^2 - R_R^2 \\ 2 \end{bmatrix} \quad (12)$$

$$\mathbf{x} = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ \vdots \\ x_N \\ x_T \end{bmatrix}, \quad \mathbf{y} = \begin{bmatrix} y_1 \\ y_2 \\ \vdots \\ y_N \\ y_T \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R}_M = \begin{bmatrix} R_{R_{ref}} \\ R_{R_{ref}} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{R}_R = \begin{bmatrix} R_{R_1} \\ R_{R_2} \\ \vdots \\ R_{R_N} \\ R_{R_i} \end{bmatrix}$$

$$\mathbf{x}_M = \begin{bmatrix} x_{ref} \\ x_{ref} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{y}_M = \begin{bmatrix} y_{ref} \\ y_{ref} \end{bmatrix}$$

$$\theta_i' = \tan^{-1} \left( \frac{y_T - y_i}{x_T - x_i} \right) - \tan^{-1} \left( \frac{y - y_i}{x - x_i} \right) + \pi_{\theta_i} \quad (13)$$

$$R_{R_i} = \frac{R_{s_i}^2 - L_i^2}{2(R_{s_i} - L_i \cos \theta_i')} \quad (14)$$

$$R_{R_{ref}} = \frac{R_{s_{ref}}^2 - L_{ref}^2}{2(R_{s_{ref}} - L_{ref} \cos \theta_{ref}')} \quad (15)$$

$$L_{ref} = \sqrt{(x_T - x_{ref})^2 + (y_T - y_{ref})^2} \quad (16)$$

$$L_i = \sqrt{(x_T - x_i)^2 + (y_T - y_i)^2} \quad (17)$$

여기서,  $x_i, y_i$  는 i번째 수신기의 x좌표, y좌표이고  $x_{ref}, y_{ref}$  는 기준수신기의 x좌표, y좌표이다.  $\theta_i'$  는 표적과 i번째 수신기, 송신기간 각도이다.  $R_{R_i}$  는 표적과 i번째 수신기간 거리,  $R_{R_{ref}}$  는 표적과 기준 수신기간 거리를 의미한다. 식 (12)를 보면 Multistatic 소나에서 위치추정의 해를 구하는 문제이고 A가 비정방행렬이므로 LS를 이용하여 근사해를 구하게 된다. 근사해는 식 (18)과 같다.

IV. 모의 실험 및 결과

이 장에서는 단일 표적 환경내에서 제시된 각 소나의 위치 추정 알고리즘을 이용하여 표적의 위치 추정 성능을 비교하였다. 본 실험에서는 표 1과 같은 시나리오를 가정하였으며 100회의 Monte carlo를 수행하였다.

표 1. 모의 실험 시나리오

위치	Monostatic	(0,0)	(0,0)
	Bistatic	(0,0)	(2km,0)
	Multistatic	(0,0)	(0,0.5km) (-0.87km,-0.5km) (0.87km,-0.5km)
잡음의 표준편차	거리합	방위각	
표적	Rayleigh(10m, 20m)	가우시안(0.3°, 0.7°, 1°)	
송신기	1개, 반경 5km내 0.5km 간격, 정지상태 지향성 빔 사용		

그림 4~7과 표 2는 Monostatic, Bistatic, Multistatic 소나의 탐지성능에 대한 결과이다. Bistatic 소나는 그림 5에서 보듯이 송,수신기 사이에서 위치 추정 오차가 크다. 그러나 송,수신기 사이구간을 제외한 영역에서는 그림 6과 같이 수신기 근방의 영역에서는 Bistatic 소나의 성능이 Monostatic 소나보다 향상되며, 송신기 근방에서는 Monostatic 소나와 비슷한 경향을 보인다. 그림 7은 Multistatic 소나의 위치 추정 오차 분포이다. Multistatic 소나는 Bistatic 소나의 경우와 달리 위치 추정 오차가 급격히 증가하는 영역이 존재하지 않으며 전체적으로 Monostatic 소나와 Bistatic 소나보다 위치 추정 에러가 감소하는 것을 볼 수 있다. 거리잡음 10m, 방위각 잡음 1도인 환경하에서 Multistatic 소나는 위치 추정 오차가 Monostatic, Bistatic 소나보다 평균 57% 감소하였다. 이것은 각 수신기의 관측정보를 융합함으로써 유도된 결과이다. 또한 표 3과 같이 Multistatic 소나는 다양한 잡음 환경에서도 나머지 두 소나망보다 성능이 우수하였다.

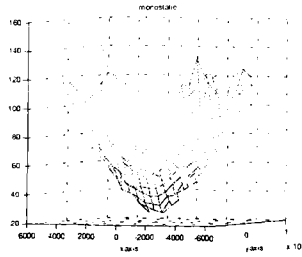


그림 4. Monostatic 소나 RMSE 분포

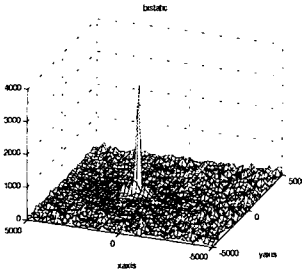


그림 5. Bistatic 소나 송,수신기 사이 RMSE 분포

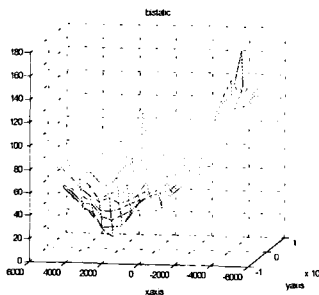


그림 6. Bistatic 소나 RMSE 분포

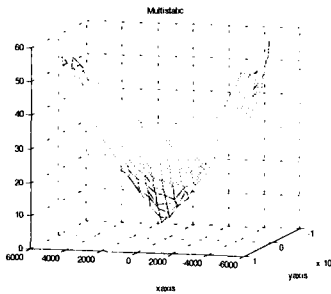


그림 7. Multistatic 소나 RMSE 분포

표 2. 능동 소나의 비교(거리합:10m, 방위각:1°)

	Monostatic	Bistatic	Multistatic
RMSE평균	79.05m	78.37m	29.97m

표 3. 관측잡음에 따른 전 구역의 RMSE 평균값 (단위: m)

거리합잡음	10m			20m		
	0.3	0.7	1	0.3	0.7	1
Monostatic	28.13	55.48	79.22	38.73	63.07	84.02
Bistatic	25.47	38.48	78.72	29.78	58.54	80.50
Multistatic	15.69	28.00	38.58	24.67	33.82	42.67

### V. 결론

본 논문에서는 Multistatic 소나와 Monostatic 소나, Bistatic 소나를 비교 분석하였다. Bistatic 소나는 송,수신기 사이의 직선 구간에서 성능이 매우 저하되나 그 이외의 구간에서는 Monostatic 소나보다 더 우수하였다. 그러나 가장 최적의 표적 탐지 성능을 갖는 것은 LS를 이용한 Multistatic 소나였다. 동일 환경하에(거리잡음 10m, 방위각 잡음 1도) Multistatic 소나는 위치 추정 오차가 Monostatic, Bistatic 소나보다 평균 57% 감소하였으며 센서의 관측잡음에 강인한 표적 탐지 성능을 보였다. 향후 계획은 전송신호의 손실, target strength 등의 요소를 반영할 것이다. 또한 Multistatic 소나에서 소나의 배열 형태 및 송,수신기 개수가 표적 탐지 성능에 어떠한 영향을 미치는 지에 대한 연구를 수행할 계획이다.

본 연구는 수중음향특화센터의 지원에 의하여 Multistatic 소나 신호처리 기술연구의 일환으로 수행된 것임.

### 참고문헌

- [1] Don J. T. , "Statistical Theory of Passive Location Systems," IEEE Transactions on aerospace and electronic systems Vol.20, No. 1983
- [2] Wade H. F. , "Position-Location Solutions by Taylor-Series Estimation," IEEE Transactions on aerospace and electronic systems Vol.12, No.2 1976
- [3] Manolakis D. E. , "Efficient Solution and Performance Analysis of 3-D Position Estimation by Trilateration," IEEE Transactions on aerospace and electronic systems, Vol.32, No.4 1996