

다중경로환경에서 바닥고정형 선배열센서를 이용한 근거리표적의 위치추정기법

Near-field Target Localization Using Bottom-mounted Linear Sensor Array in Multipath Environment

이 수 형*, 류 창 수*, 이 균 경*

(Su-Hyoung Lee*, Chang-Soo Ryu*, Kyun-Kyung Lee*)

*경북대학교 대학원 전자공학과

(접수일자: 2000년 8월 10일; 수정일자: 2000년 9월 26일; 채택일자: 2000년 10월 9일)

본 논문에서는 바닥고정형 선배열센서를 이용하여 다중경로 신호를 이용한 근거리표적의 위치추정 알고리즘을 제안하였다. 다중경로를 통하여 근거리 표적의 신호가 센서에 도달하는 경우 각 신호의 원추각이 다르므로 신호들의 원추각과 시간차를 추정해서 3차원 표적의 위치를 추정할 수 있다. 원거리표적으로 가정하고 추정한 원추각과 신호들의 시간차에 대한 관계식을 유도하였으며 이들을 연립하여 표적의 위치를 추정하였다. 그러나 표적이 위치한 기하학적인 위치에 따라 신호들의 원추각이 거의 같아지는 지점이 존재한다. 이 경우 부가적인 1차원 탐색으로 표적의 위치를 추정하였다.

핵심용어: 다중경로, 근거리표적, 선배열센서, 3차원 위치추정, 수중음향

투고분야: 수중음향 분야 (5.6)

In this paper, we propose a near-field target localization algorithm using a bottom-mounted linear sensor array in a multipath environment. In a multipath environment, the conic angles of a target signals through each path are different, and the position of the target can be estimated using these conic angles and the time difference of these signals. We derive equations on the relation of time-difference of signals and conic angles estimates under the far-field assumption, and estimate the position of target by simultaneously solving these equations. For a certain geometry of a target and the sensor array, there exist cases when the conic angles are very close. In such a case, we estimate the position of the target using an additional 1-D search.

Key words: Multipath, Near-field target, ULA, 3D localization, Underwater sound

Subject classification: Underwater acoustics (5.6)

I. 서 론

수중환경에서 표적의 위치를 추정하는 일은 매우 중요한 분야이며 오랜 연구가 진행되어 왔다. 기본적으로 배열센서에 도달한 표적신호의 센서사이의 시간지연을 이용하여 표적의 위치를 추정한다[1]. 표적의 위치추정은 크게 원거리표적과 근거리표적의 위치추정 문제로 나누어진다. 원거리표적인 경우 표적신호를 평면파로 가정하게 되므로 센서신호는 입사각 정보만 나타낸다. 표적의 입사각을 추정하는 많은 기법들이 연구되었으며 대표적으로 빔형성 기법, MUSIC(MULTiple Signal Classification) 기법, ESPRIT(Estimation of Signal Parameters via Rotational

Invariance Techniques) 기법 등이 있다[2-4]. 한편 표적이 근거리에 있다고 가정하는 경우에는 센서에 대하여 파면이 구면파로 도달하게 되므로 입사각과 거리를 동시에 추정해야 되며, 최근 활발한 연구가 진행되고 있다[5-8, 13]. 특히 근거리표적의 깊이까지 고려한 3차원 위치추정기법은 기하학적인 제약으로 인하여 대부분 평면센서나 Y형 배열센서[9]와 같은 2차원 공간상의 배열센서를 이용하고 있다.

수중환경에서 표적에서 발생한 신호는 대부분 수면이나 바닥에 반사되는 다중경로를 통하여 센서에 도달한다. 각 경로를 통하여 도달한 경로신호들의 입사각과 이들 사이의 시간차(time difference)를 이용하여 표적신호의 전달경로를 구하여 표적의 위치를 추정하며 이에 대한 연구도 많이 진행되고 있다[10-13]. 이러한 다중경로환경에서 사용하는 선배열센서는 수직 선배열센서와 수평 선배열센서가 있다. 수직 선배열센서를 이용하는 경우 표적의

책임저자: 이균경 (kklee@ee.knu.ac.kr)
702-701 대구광역시 북구 산격동 1370 경북대학교 전자전기공학부
(전화: 053-950-5546; 팩스: 053-950-5505)

방위각(azimuth angle)은 알 수 없으나 센서에 도달하는 신호들의 고각(elevation angle)이 다르므로 표적의 위치를 추정할 수 있다[12, 13]. 최근에는 근거리표적의 위치추정에 관한 연구도 수행되고 있다[13]. 수평 선배열센서를 이용하는 경우 표적의 방위각은 추정할 수 있으나 각 경로를 통하여 들어온 신호들의 시간차만을 이용하여 표적의 거리를 추정하므로 표적의 거리와 깊이를 동시에 추정할 수 없다는 단점이 있다. Blanc-Benon 등은 수평 선배열센서를 이용하여 아합과 표적이 계속 이동하는 환경에서 방위각과 시간차를 이용하여 표적 위치를 추적하는 기법을 제안하였으나, 여러 시점에서 방위각과 시간차의 측정치가 필요하므로 위치를 추정하는데 시간이 오래 걸린다는 단점이 있다[14].

본 논문에서는 수동소나 환경에서 수평 선배열센서를 이용하여 다중경로를 통하여 도달하는 근거리표적의 위치를 추정하는 기법을 제안하였다. 근거리표적에서 각 경로를 통하여 도달하는 신호들의 원추각을 분리 추정하는 것이 가능하다는 점을 이용하였으며, 각 경로신호들의 원추각(conic angle)과 시간차를 이용하여 표적의 방위각, 거리, 깊이의 3차원 위치를 추정하였다. 변형된 신호 공분산행렬(covariance matrix)을 이용한 ESPRIT 기법을 사용하여 각 경로를 통하여 도달하는 신호들의 원추각과 시간차를 추정하였다. 추정된 신호들의 원추각과 시간차를 표적의 위치에 대한 대수방정식을 유도하였으며, 이들을 연립하여 해를 구함으로써 표적의 위치를 추정하였다.

2장에서 바닥에 고정된 센서와 표적사이의 기하학적인 관계와 다중경로에 관한 신호모델을 설명하였으며, 제안한 추정기법을 3장에서 설명하였다. 4장에서는 다양한 모의실험을 통하여 제안한 알고리즘의 성능을 분석하였다.

II. 다중경로모델과 문제설정

근거리표적신호가 다중경로를 통하여 센서에 도달하는

경우 동일한 신호가 경로에 따른 시간차를 두면서 센서에 도달하게 된다. 표적신호가 수중에서 수온이나 밀도의 변화 등에 따라 음속이 변할 수 있으나, 본 논문에서는 이러한 점을 고려하지 않고 음속이 일정한 이상적인 다중경로환경(ideal multipath environment)이라고 가정한다. 또한 수면이나 바닥에 반사되는 경우 2회 이상 반사되는 경우에는 산란 또는 흡수로 인한 신호의 감쇠가 매우 크다. 따라서 본 논문에서는 수면에 한번 반사되는 경우만을 고려한다.

2.1. 바닥고정형 선배열센서와 다중경로모델

수심이 P 이며 수평 선배열센서가 바닥에 고정되어 있으며 표적신호가 다중경로를 통하여 센서에 도달하는 기하학적인 구조를 그림 1과 같이 설명할 수 있다. 표적의 위치는 기준 센서가 위치한 곳에서 바라본 표적의 방위각(azimuth angle) β , 수평면상에서의 기준센서와 표적과의 거리 R , 그리고 표적의 수심 z 로 설정하였다. 등간적으로 배치한 M 개의 선배열센서의 중심을 표적 위치의 기준으로 하였으며, 아래첨자 D 와 S 를 이용하여 각각 표적에서 직접 센서에 도달하는 직접경로(direct path)의 경우와 수면에 반사되어 도달하는 수면반사경로(surface reflected path)를 구분하였다. 각 경로신호는 각각 $s_D(t)$, $s_S(t)$ 로 정의하였으며 표적의 방위각 β 는 같으나 고각(elevation angle) α_D 와 α_S 가 다르므로 센서에서 바라보는 원추각(conic angle) θ_D 와 θ_S 도 달라지게 된다.

그림 1에서 배열센서의 중심과 표적이 존재하는 수직 단면을 그림 2에 나타내었다. 센서에 직접 도달하는 직접 경로신호와 수면에 반사되어 도달하는 수면반사신호는 서로 다른 경로를 따라서 센서에 도달하므로 경로에 따른 시간차 τ 는 다음과 같다.

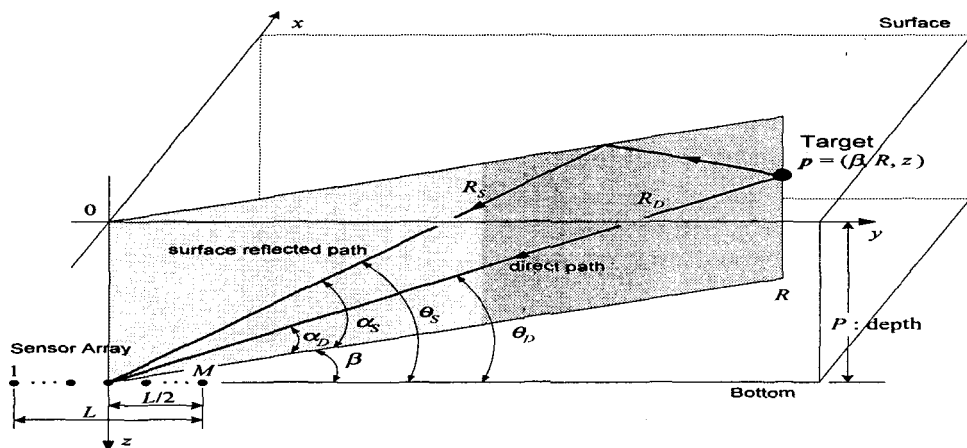


그림 1. 바닥고정형 선배열센서와 근거리표적의 환경
Fig. 1. Bottom-mounted linear sensor array and near-field environment.

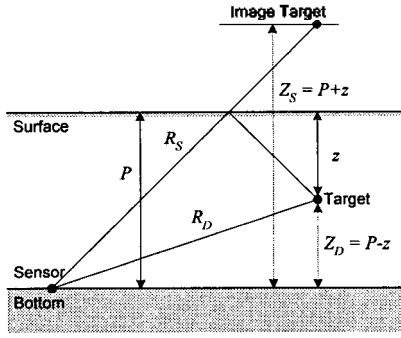


그림 2. 다중경로신호
Fig. 2. Multipath signals.

$$\tau = \frac{1}{c}(R_S - R_D) \quad (1)$$

여기서 c 는 수중에서의 음속이다. 또한 각 신호는 원추각 θ_D 와 θ_S 로부터 입사되며, 원추각은 삼각법에 의하여 다음과 같다.

$$\cos \theta_D = \cos \alpha_D \cdot \cos \beta \quad (2)$$

$$\cos \theta_S = \cos \alpha_S \cdot \cos \beta \quad (3)$$

2.2. 신호 모델

센서의 개수가 M 개이고 근거리표적에서 발생한 신호가 두 개의 다중경로를 통하여 센서에 들어오는 경우 센서에서 측정된 신호는 식 (4)와 같다.

$$\mathbf{x}(t_n) = \sum_{k \in \{D, S\}} s(t_n - \tau_k) b_k \exp(j\varphi_k) \mathbf{a}(\theta_k, R_k) + \mathbf{e}(t_n) \quad (4)$$

여기서 $\mathbf{x}(t_n)$ 는 $M \times 1$ 인 센서출력벡터이고 집합 $\{D, S\}$ 는 도달한 신호의 경로를 나타낸다. $s(t)$ 는 표적에서 발생한 신호이며 τ_k 는 k 번째 경로를 통해서 신호가 도달할 때 걸리는 시간을 나타낸다. b_k 와 φ_k 는 k 번째 경로에서 신호가 반사될 때의 신호의 감쇠와 위상의 변화를 나타낸다. 일반적으로 수면에 반사될 때 위상이 반전되고 신호의 감쇠가 존재하므로 직접 도달하는 신호보다 신호의 크기가 작다. $\mathbf{e}(t_n)$ 은 센서잡음 벡터로서 백색잡음으로 가정한다. $\mathbf{a}(\theta_k, R_k)$ 는 k 번째 표적신호가 방향이 θ_k 이며 기준센서로부터 거리가 R_k 에서 발생한 신호에 대한 방향도드 벡터이며 다음과 같다.

$$\mathbf{a}(\theta_k, R_k) = [e^{-j2\pi f_d \tau(\theta_k, R_k)}, \dots, e^{-j2\pi f_d t(\theta_k, R_k)}]^T \quad (5)$$

여기서 f_d 는 표적신호의 중심주파수이며 $\tau_m(\theta_k, R_k)$ 는 k 번째 신호의 m 번째 센서와 배열센서의 중심간의 시간 지연항으로서 식 (6)과 같이 정의된다.

$$\tau_m(\theta_k, R_k) = \frac{1}{c}(R_{k,m} - R_k), \quad m = 1, 2, \dots, M \quad (6)$$

여기서 $R_{k,m}$ 은 m 번째 센서와 k 번째 표적신호와와의 거리로서 다음과 같이 나타난다.

$$R_{k,m} = \sqrt{R_k^2 - 2d_m R_k \cos \theta_k + d_m^2 R_k^2} \quad (7)$$

여기서 $d_m = [m - (M+1)/2] \bar{d}$ 로 $|d_m|$ 은 배열센서의 중심과 m 번째 센서와의 간격이며 \bar{d} 는 인접한 센서 사이의 간격이다.

센서출력신호를 N 번 표본화하여 $N \times M$ 차원의 신호 행렬 X 를 다음과 같이 구성할 수 있다.

$$X = [\mathbf{x}(t_1) \ \mathbf{x}(t_2) \ \dots \ \mathbf{x}(t_N)]^T = S(\boldsymbol{\tau}) \Psi A^T(\boldsymbol{\theta}, R) + E \quad (8)$$

여기서

$$A(\boldsymbol{\theta}, R) = [\mathbf{a}(\theta_D, R_D), \mathbf{a}(\theta_S, R_S)]$$

$$\Psi = \text{diag}[b_D e^{j\varphi_D}, b_S e^{j\varphi_S}]$$

$$S(\boldsymbol{\tau}) = [s(t - \tau_D), s(t - \tau_S)]$$

$$E = [\mathbf{e}(t_1), \mathbf{e}(t_2), \dots, \mathbf{e}(t_N)]^T$$

$$s(t - \tau_k) = [s(t_1 - \tau_k), s(t_2 - \tau_k), \dots, s(t_N - \tau_k)]^T \text{이다.}$$

표적신호 $s(t)$ 는 중심주파수가 f_d 인 협대역 신호성분으로 크기(amplitude)는 가우시안(Gaussian)분포를 가지며 잡음 $\mathbf{e}(t_n)$ 은 원형 가우시안(circular Gaussian)분포를 가진다.

III. 제안한 알고리즘

제안한 알고리즘은 신호들의 원추각과 시간차 추정, 표적의 위치추정, 국부탐색의 3단계로 구성된다. 먼저 원거리표적으로 가정하고 ESPRIT 기법을 이용하여 신호들의 원추각과 시간차를 추정한다. 다음으로 추정된 원추각과 시간차를 이용하여 표적의 위치추정을 위한 대수방정식을 유도하고 그 해를 구한다. 마지막으로 원거리표적으로 가정하고 추정한 원추각의 추정오차에 기인한 표적의 위치추정오차를 줄이기 위하여 ML(Maximum Likelihood) 기법을 이용한 국부탐색을 수행한다.

3.1. 원추각과 시간차 추정

본 절에서는 Q. Zhang 등[15]이 제안한 원거리표적의 위치추정 기법을 이용하여 각 경로신호들의 원추각과 시간차를 추정한다. 이들은 일반적인 ESPRIT 기법과 달리 식 (9), (10)과 같은 형태의 신호 공분산행렬을 구성하였다.

$$Y_0 = X_1 X_1^H = \hat{S}(\boldsymbol{\tau}) A_1^T(\boldsymbol{\theta}) A_1^*(\boldsymbol{\theta}) \hat{S}^H(\boldsymbol{\tau}) \quad (9)$$

$$Y_1 = X_1 X_2^H = \tilde{S}(\tau) A_1^T(\theta) A_1^*(\theta) \Phi^H \tilde{S}^H(\tau) \quad (10)$$

여기서 $\tilde{S}(\tau) = S(\tau)\Phi$ 이며 $A_1(\theta)$ 는 $A(\theta)$ 에서 마지막 열이 빠진 $A(\theta)$ 의 부분행렬이다. 위 식들은 다음과 같은 일반화된 고유치 문제(generalized eigenvalue problem)로 나타낼 수 있으며, 고유치를 구함으로써 신호의 원추각들을 추정할 수 있다.

$$Y_0 \tilde{S}(\tau) \Phi^H = Y_1 \tilde{S}(\tau) \quad (11)$$

여기에서 Φ 는 식 (12)와 같으며, 여기에 신호의 원추각 정보를 포함하고 있다.

$$\Phi = \text{diag} \left[e^{j2\pi f_s \frac{d \cos \theta_D}{c}}, e^{j2\pi f_s \frac{d \cos \theta_S}{c}} \right] \quad (12)$$

식 (11)에서 구한 고유벡터(eigenvector)는 고유치 방향의 신호를 의미한다. 따라서 크기가 가장 큰 두 개의 고유치와 그에 해당하는 고유벡터 u_1, u_2 를 구함으로써 경로신호들의 원추각과 그 방향의 신호를 동시에 추정할 수 있다. 식 (11)을 이용하면 포본 수만큼의 큰 행렬의 고유치 문제를 계산하므로 연산량이 커지게 되나 크기가 가장 큰 두 개의 고유치와 고유벡터만을 계산하여 이 문제를 해결하였다. 행렬에서 가장 크거나 작은 일부분의 고유치만을 계산하는 수치적인 알고리즘은 [16]에 정리되어 있다.

각 고유벡터들은 각 경로신호를 의미하므로 식 (13)과 같이 이들의 상호상관관계(cross-correlation)를 이용하여 시간차를 추정한다.

$$\hat{\tau} = \arg \max_{\tau} |R_{1,2}(\tau)| \quad (13)$$

여기서 $R_{1,2}(\tau)$ 는 u_1 과 u_2 의 상호상관관계이며 다음과 같다.

$$R_{1,2}(\tau) = \left[\frac{1}{N-\tau} \sum_{n=-N+1}^{N-1} u_1^*(n) u_2(n+\tau) \right], \quad (14)$$

두 신호 중에서 먼저 도달하는 신호를 직접경로신호라고 볼 수 있으므로 $\hat{\tau}$ 의 부호를 이용하여 각 신호의 경로를 판단한다.

3.2. 표적의 위치추정

각 신호의 경로 길이 R_D 와 R_S 는 기하학적인 구조에 의하여 다음과 같이 표현된다.

$$R_D = \sqrt{R^2 + (P-z)^2} \quad (15)$$

$$R_S = \sqrt{R^2 + (P+z)^2} \quad (16)$$

식 (15), (16)을 식 (1)에 대입하면 시간차는 다음과 같이 R 과 z 의 함수로 나타난다.

$$\tau = \frac{1}{c} (\sqrt{R^2 + (P+z)^2} - \sqrt{R^2 + (P-z)^2}) \quad (17)$$

또한 원추각 식 (2)-(3)에서 삼각법을 이용하면 다음과 같이 θ_D 와 θ_S 를 (β, R, z) 의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\cos \theta_D = \frac{R \cos \beta}{\sqrt{R^2 + (P-z)^2}} \quad (18)$$

$$\cos \theta_S = \frac{R \cos \beta}{\sqrt{R^2 + (P+z)^2}} \quad (19)$$

각 경로신호의 원추각과 시간차가 주어질 때 식 (17)-(19)를 연립하여 풀면 다음과 같이 표적의 위치를 구할 수 있다.

$$z = \frac{c^2 \tau^2 (\cos \theta_D + \cos \theta_S)}{4P(\cos \theta_D - \cos \theta_S)} \quad (20)$$

$$R = \frac{1}{2} \sqrt{c^2 \tau^2 + \frac{16P^2 z^2}{c^2 \tau^2} - 4(P^2 + z^2)} \quad (21)$$

$$\cos \beta = \frac{\sqrt{R^2 + (P-z)^2}}{R} \cos \theta_D \quad (22a)$$

또는,

$$\cos \beta = \frac{\sqrt{R^2 + (P+z)^2}}{R} \cos \theta_S \quad (22b)$$

이와 같이 각 경로신호의 원추각과 신호들의 시간차를 이용하면 탐색 없이 표적의 위치를 추정할 수 있다.

3.3. 원추각의 영향

표적과 센서의 기하학적인 구조에 따라 표적의 방위각 β 가 90° 근처인 경우 또는 표적의 수심 z 가 작은 경우 각 경로신호들의 원추각 θ_D, θ_S 가 가까워지며, 이 경우 원추각의 분리추정에 실패하거나 추정오차가 커지므로 식 (20)-(22)에서 제시한 기법을 사용하지 못하게 된다. 그러므로 원추각의 분리추정의 성공여부와 원추각들이 근접하는 경우를 판단하여야 하며, 이 경우에는 추가적인 1차원 탐색으로 표적의 위치를 추정한다.

원추각 분리추정의 성공여부를 판단하는 기준으로 식 (14)의 고유벡터들의 상관관계(correlation)를 이용한다. 원추각의 분리추정이 실패하는 경우 하나의 고유벡터가 허위 신호를 포함하게 되며, 나머지 고유벡터에는 두 경로신호가 모두 포함되어 있으므로 자기상관관계(auto-correlation)에서 $\tau = 0$ 을 제외한 다른 지점의 첨두치가 상호상관관계의 첨두치보다 큰 값을 가진다. 따라서 이 원추각을 $\hat{\theta}_D$ 로 선택하고 자기상관관계를 이용하여 $\hat{\tau}$ 를 추정하며 $\hat{\theta}_S$ 는 추정할 수 없다고 본다.

각 경로신호의 원추각이 근접하는 경우의 판단은 기하학적인 성질을 이용한다. z 가 0에 근접하면 r 가 0에 근접하게 되며 원추각도 서로 가까워진다. 또한 β 가 90° 에 가까워지면 각 경로신호의 원추각이 서로 근접하게 된다. 따라서 식 (23)과 같이 추정된 원추각 $\hat{\theta}_D$ 와 시간차 $\hat{\tau}$ 를 이용하는 판별식을 제안한다. 식 (23)을 만족하면 식 (20)-(22)를 사용하는 A영역으로, 만족하지 않은 경우에는 B영역으로 정의한다.

$$\hat{\tau} \cdot |\hat{\theta}_D - 90^\circ| > H_{AB} \quad (23)$$

여기서 H_{AB} 는 영역을 구분하는 문턱값으로 주어진 환경에 적절한 값을 설정하여 사용한다.

B영역에서 θ_D 가 주어지는 경우 표적의 위치와 θ_D 는 식 (18)을 만족하므로 이를 만족하는 경로를 따라 F_{ML} 의 값을 최소화하는 지점을 탐색하여 표적의 위치를 추정한다. 그러나 원추각 $\hat{\theta}_D$ 의 추정오차를 고려하여 $\hat{\theta}_D \pm 3^\circ$ 내에서 5개 정도의 원추각을 θ_D 로 선택한 후 식 (18)의 제한조건을 만족하는 경로를 따라 탐색한다.

3.4. 국부탐색

ML 기법은 여러 분야에서 파라미터를 추정하는 대표적인 기법이다. 추정하고자 하는 파라미터 수와 같은 차원을 탐색하여야 하므로 연산량이 큰 단점을 가지고 있으나 가장 좋은 추정성능을 기대할 수 있다. 따라서 ML 기법을 사용한 국부탐색으로 추정성능을 높일 수 있다.

국부탐색에서 추정해야 하는 θ_D , θ_S , R_D , R_S 는 식 (17)-(19)에 의해 표적위치 (β , R , z)의 함수로 나타나며, z 는 식 (17)에 의해 다음과 같이 R 의 함수로 나타난다.

$$z = \frac{1}{2} \sqrt{\frac{c^4 r^4 - 4c^2 r^2 (P^2 + R^2)}{c^2 r^2 - 4P^2}} \quad (24)$$

따라서 2차원 방향모드 벡터 $\mathbf{a}(\theta_D, R_D)$, $\mathbf{a}(\theta_S, R_S)$ 는 β 와 R 의 함수로 나타난다.

식 (4), (5)의 신호모델에서 식 (25)와 같은 음의 로그우도함수(negative log-likelihood function)를 얻을 수 있으며[2], 이 함수를 최소화하는 β 와 R 의 2차원 탐색으로 표적의 위치를 추정한다.

$$F_{ML} = \text{Tr}[(I - A(A^H A)^{-1} A^H) \hat{R}_{xx}] \quad (25)$$

여기서 $\hat{R}_{xx} = X^H X$ 로서 센서 신호로부터 구한 공분산행렬이며 방향모드행렬 A 는 식 (8)의 $A(\theta, R)$ 에서 θ 와 R 을 생략한 것이다.

3.5. 알고리즘 요약

제안한 다중경로환경에서 선배열센서를 이용한 근거리 표적의 위치추정기법은 다음과 같이 요약된다.

- Step 1. 초기화 : 표적이 원거리에 있다고 가정하고 다중경로를 통해서 도달한 두 신호의 방위각 $\hat{\theta}_D$, $\hat{\theta}_S$ 및 시간차 $\hat{\tau}$ 을 ESPRIT기법과 상관관계를 이용하여 추정한다.
- Step 2. 추정기법의 선택 : $|\hat{\tau} \cdot |\hat{\theta}_D - 90^\circ||$ 의 크기가 H_{AB} 보다 큰 경우 Step 3A로 이동하고 작을 경우 Step 3B로 이동한다.
- Step 3A. 위치추정 : 식 (21)-(23)을 이용하여 표적의 위치를 추정한다.
- Step 3B. 1차원 탐색 : $\hat{\theta}_D$ 근처의 5개 정도의 경로를 따라 식 (18)을 이용하여 1차원 탐색을 수행한다.
- Step 4. 국부탐색 : ML기법을 이용하여 국부탐색을 수행한다. 국부탐색에는 일반적인 비선형 가격함수에 대한 최적화 기법을 사용한다.

IV. 모의실험

제안한 알고리즘의 성능을 분석하기 위하여 다음과 같은 환경에서 모의실험을 수행하였다. 배열센서는 수심 400m의 바닥에 등간격으로 배치된 32개의 선배열센서로 가정하였다. 표적신호의 중심주파수 f_d 는 100Hz로 설정하였으며, 표본 주파수 f_s 는 f_d 의 2.56배인 256Hz로 설정하였다. 수중에서의 음속 c 는 1500m/s로 고정하였으며 인접한 센서간의 간격은 f_d 의 반 파장으로 설정하였다. 따라서 배열센서의 길이는 232.5m가 된다. 표적신호는 협대역 복소 가우시안 확률변수로 구성하였으며 150개의 표본을 사용하였으며, 센서잡음은 센서간에 상호독립인 복소 가우시안 확률변수로 하였다. 수면에서 반사된 신호는 위상이 반전되도록 하였으며 감쇠지수는 0.8로 설정하였다.

먼저 신호 대 잡음비는 0dB, 표적의 방위각은 50° , 표적과의 거리 R 은 배열센서의 길이의 약 4.3배인 1000m, 표적의 깊이 z 는 수심의 중간인 200m로 설정하여 100번의 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다. 제안한 알고리즘을 사용하여 표적의 위치추정 결과를 그림 3에 나타내었다. 실제 표적의 위치를 각 평면으로 수직선을 그어 나타내었으며 각 평면에는 그 평면을 이루는 두 파라미터에 대한 99% 신뢰구간을 타원으로 표시하였다. 방위각의 추정오차는 거의 없으며 거리 추정오차는 40m 이내이며 깊이의 추정오차도 10m 이내임을 알 수 있다.

두 번째로 위와 같은 환경에서 표적의 방위각을 20° 에서 110° 까지 변화시키면서 추정오차를 분석하였다. β 가 90° 인 곳을 기준으로 기하학적으로 대칭을 이루기 때문에 추정결과도 90° 를 기준으로 대칭으로 나타난다.

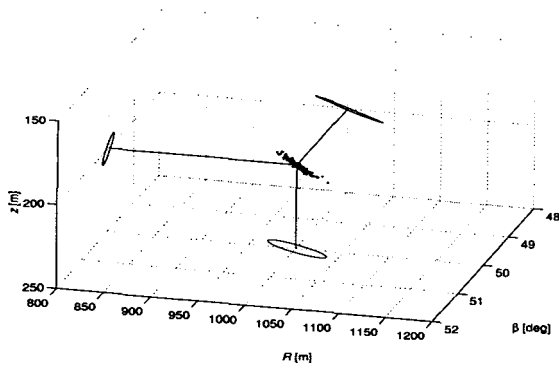


그림 3. 위치추정 결과
Fig. 3. Localization result.

이때 A 영역과 B 영역을 구분하는 H_{AB} 는 2.5를 사용하였다. 먼저 3.1절에서 추정된 두 원추각의 추정오차를 그림 4에 나타내었다. β 가 약 $65^\circ \sim 115^\circ$ 인 B 영역에 해당하는 경우 원추각의 추정오차가 커지며 90° 근처에는 분리추정이 실패하는 것을 볼 수 있다. 따라서 B 영역에서 식 (20)-(22)를 직접 사용하기 어려운 것을 알 수 있다. 제안한 알고리즘을 사용한 표적의 위치추정 결과를 그림 5에서 그림 7에 나타내었다. 다중경로의 효과가 거의 사라지는 90° 근처에서 전체적인 추정오차가 큰 결과를 보이고 있다. 방위각 추정오차가 90° 근처에서 거리추정오차와 함께 추정오차가 조금 증가하나 0.26° 이내로서 충분히 작은 값을 보인다. 정확히 90° 에서는 근거리표적의 효과가 없기 때문에 추정오차가 작게 나타난다. $80^\circ \sim 100^\circ$ 를 제외하고는 거리의 추정오차는 최대 15.9m이고 깊이의 추정오차도 최대 2.8m로서 제안한 알고리즘이 신뢰할만한 추정성능을 보여줄을 알 수 있다.

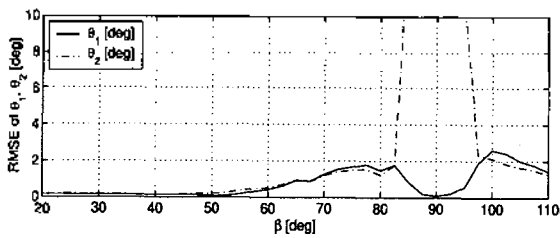


그림 4. β 에 따른 원추각 추정치의 제공된 평균 제공 오차
Fig. 4. RMSE in conic angles estimate with respect to β .

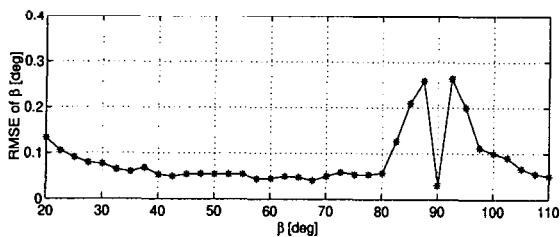


그림 5. β 에 따른 방위각 추정치의 제공된 평균 제공 오차
Fig. 5. RMSE in bearing estimate with respect to β .

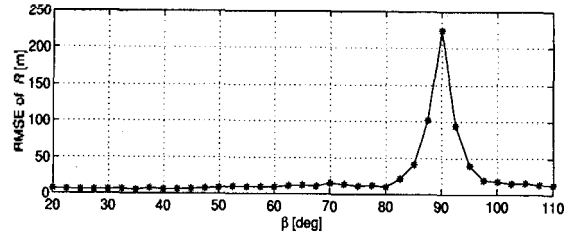


그림 6. β 에 따른 거리 추정치의 제공된 평균 제공 오차
Fig. 6. RMSE in range estimate with respect to β .

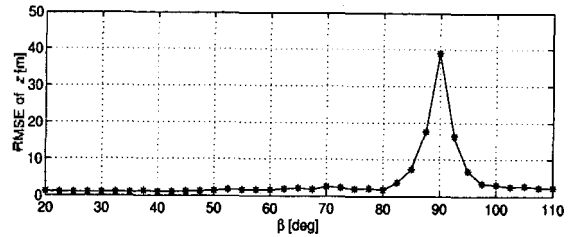


그림 7. β 에 따른 깊이 추정치의 제공된 평균 제공 오차
Fig. 7. RMSE in depth estimate with respect to β .

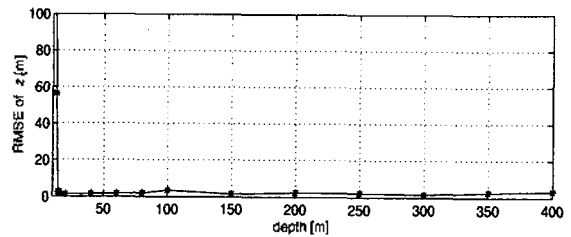


그림 8. z 에 따른 깊이 추정치의 제공된 평균 제공 오차
Fig. 8. RMSE in depth estimate with respect to z .

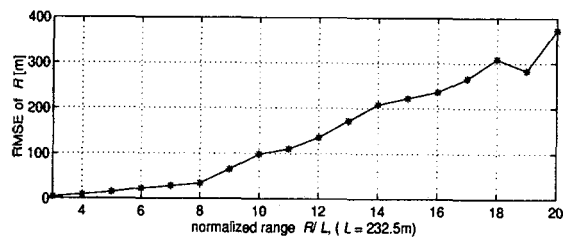


그림 9. R 에 따른 거리 추정치의 제공된 평균 제공 오차
Fig. 9. RMSE in range estimate with respect to R .

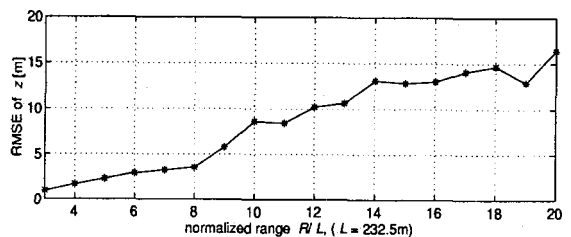


그림 10. R 에 따른 깊이 추정치의 제공된 평균 제공 오차
Fig. 10. RMSE in depth estimate with respect to R .

세 번째로 같은 환경에서 방위각이 60° 인 경우에 대하여 표적의 깊이에 따른 성능분석을 수행하였으며 깊이 추정오차를 그림 8에 나타내었다. 표적이 수면근처에 있는 경우에는 다중경로의 효과가 사라지게 되므로 추정오차가 매우 큼을 알 수 있다. 그러나 수심이 13m보다 큰 경우에는 추정오차가 큰 차이가 없으며 신뢰할만한 적은 추정오차를 보인다.

마지막으로 표적의 방위각이 60° 인 경우에 대하여 표적의 거리를 센서길이 L 의 3배(679.5m)에서 20배(4650m) 까지 변화시키면서 성능을 분석하였으며, 그 결과를 그림 9와 그림 10에 나타내었다. 표적의 거리가 $10L$ 인 경우에 깊이추정오차는 10m 이내로서 신뢰할만한 결과를 나타낸다. 그러나 표적의 거리가 $20L$ 정도가 되면 추정오차도 15m 이상이 되며, 음속이 상수가 아니라 수심에 따라 변하는 경우에는 수면반사경로신호가 직접경로신호보다 먼저 도달하거나 다른 경로들이 영향을 미치는 복잡한 경우가 발생하므로 제안한 알고리즘을 사용하지 못할 수도 있다. 따라서 알고리즘의 적용범위는 약 $10L$ 정도라고 판단된다.

V. 결론 및 토의

본 논문에서는 근거리표적의 신호가 다중경로를 통하여 바닥에 고정된 수평 선배열센서에 도달하는 경우 표적의 위치를 추정하는 기법을 제안하였다. 각 경로신호들의 원추각과 시간차의 추정치와 유도한 표적의 위치와의 관계식으로부터 표적의 위치를 추정하였다. 표적의 방위각이 90° 근처에 있거나 표적의 깊이가 알려져 다중경로의 효과가 사라지는 경우에는 추정오차가 커지게 되므로, 이런 경우 부가적인 1차원 탐색으로 표적의 위치를 추정하였다.

다양한 환경에서 몬테카를로 시뮬레이션을 통하여 제안한 알고리즘의 타당성을 분석하였다. 표적이 거리 1000m, 깊이 200m에 위치한 경우에 대하여 방위각을 변화시키면서 추정성능을 분석한 결과, 다중경로의 효과가 사라지는 90° 근처를 제외하고는 거리와 깊이 추정치의 최대 제공근 평균 제곱 오차는 각각 15.8m와 2.8m로 나타났다. 또한 깊이와 거리에 따른 성능분석에서도 표적의 수심이 13m보다 깊은 경우와 거리가 센서길이의 10배인 범위 내에서는 신뢰할만한 결과를 보였다.

본 논문에서는 음속이 일정한 이상적인 수중환경으로 가정하였으나 실제 해양환경에서는 음속이 일정하지 않으므로 음파도달시간이 음속구조(sound profile)의 함수가 된다. 이러한 환경에서는 보다 정확한 표적추정을 위하여 정합장 처리(matched field processing)가 필요하다.

감사의 글

이 논문은 수중음향특화센터와 2000년도 두뇌한국 21 사업에 의하여 지원되었음.

참고 문헌

1. G. C. Carter, ed., *Coherence and Time Delay Estimation - An Applied Tutorial for Research, Development, Test, and Evaluation Engineers.*, (Piscataway, IEEE Press, 1993).
2. Y. Bresler and A. Macovski, "Exact Maximum Likelihood Parameter estimation of Superimposed Exponential Signals in Noise," *IEEE Trans. Acoust. Speech Sig. Processing*, ASSP-34, pp. 1081-1089, Oct. 1986.
3. R. O. Schmidt, "Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation," *IEEE Trans. Ant. and Propa.*, 34, no. 3, pp. 276-280, March 1986.
4. R. Roy and T. Kailath, "ESPRIT-Estimation of signal Parameters by Rotational Invariance Techniques," *IEEE Trans. Acoust. Speech Sig. Processing*, 37, no. 3, pp. 984-995, July 1989.
5. Y. D. Huang and M. Barkat, "Near-Field Multiple Source Localization by Passive Sensor Array," *IEEE Trans. Ant. and Propa.*, 39, no. 7, pp. 968-975, July 1991.
6. D. Starer and A. Nehorai, "Passive Localization of Near-Field Sources by Path Following," *IEEE Trans. Sig. Processing*, 42, no. 3, pp. 677-680, March 1994.
7. 이종환, 이균경, "대수적 경로 추종에 의한 근거리표적의 수동형 위치추정," 한국음향학회지, 제17권 제4호, pp. 54-59, 1998.
8. Jong-Hwan Lee, Chul-Mok Lee, and Kyun-Kyung Lee, "A Modified Path-Following Algorithm Using a Known Algebraic Path," *IEEE Trans. Sig. Processing*, 47, no. 5, pp. 1407-1409, May 1999.
9. 이철복, 이종환, 윤경식, 이균경, "협대역 다중표적의 효과적인 3차원 위치추정 알고리즘," 한국음향학회지, 제19권, 제1호, pp. 61-66, 2000.
10. H. C. Schau and A. Z. Robinson, "Passive Source Localization Employing Intersection Spherical Surfaces from Time-of-Arrival Difference," *IEEE Trans. Acoust. Speech Sig. Processing*, ASSP-35, no. 8, pp. 1223-1225, Aug. 1987.
11. M. Rendas and J. Moura, "Cramer-Rao Bound for Location Systems in Multipath Environments," *IEEE Trans. Sig. Processing*, 39, no. 2, pp. 2593-2610, Dec. 1991.
12. M. Hamilton and P. M. Schultheiss, "Passive Ranging in Multipath Dominant Environments, Part I: Known Multipath Parameters," *IEEE Trans. Sig. Processing*, 40, no. 1, pp. 1-12, Jan. 1992.
13. Y. X. Yuan, G. C. Carter and J. E. Salt, "Near-Optimal Range and Depth Estimation Using a Vertical Array in a Correlated Multipath Environment," *IEEE Trans. Sig. Processing*, 48, no. 2, pp. 317-330, Feb. 2000.
14. P. Blanc-Benon and C. Jauffret, "TMA from bearings and multipath time delays," *IEEE Trans. Aeros. and Elect. Syst.*, 33, no. 3, pp. 813-824, July 1997.
15. Q. Zhang and J. Huang, "Joint Estimation of DOA and Time-Delay in Underwater Localization," *ICASSP 1999*, pp. 2817-2820, 1999.
16. G. H. Golub and C. F. Loan, *Matrix Computations*, (The John Hopkins Univ. Press, 1983).

▲ 이 수 협(Su-Hyoung Lee)



1994년 2월 : 경북대학교 공과대학
전자공학과(공학사)

1996년 2월 : 경북대학교 대학원 전자
공학과(공학석사)

현재 : 경북대학교 대학원 전자공학과
(공학석사)

※ 주관심분야: 수중음향신호처리, 표적
위치추정, 표적가동분석

▲ 류 창 수(Chang-Soo Ryu)



1992년 2월 : 경북대학교 공과대학
전자공학과(공학사)

1994년 2월 : 경북대학교 대학원 전자
공학과(공학석사)

1994년 3월~1997년 12월 : 국방과학
연구소 연구원

1998년 2월~현재 : 경북대학교 대학원
전자공학과(박사과정)

※ 주관심분야: 수중음향신호처리, 표적위치추정 및 추적

▲ 이 균 경(Kyun-Kyung Lee)

현재 : 경북대학교 전자전자공학부 교수

한국음향학회지 제17권 4호 참조