2000年度 第13回 信號處理合同學術大會 論文集 第13卷 1號

다중경로환경에서 해저고정형 선배열센서를 이용한 근거리표적의 위치추정기법

이수형, 류창수, 이철목, 이균경
경북대학교 전자공학과

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

Su Hyoung Lee, Chang Soo Ryu, Chul Mok Lee, Kyun Kyung Lee
Kyungpook National University
email: kklee@ee.knu.ac.kr

요 약

본 논문에서는 해저 고정형 선배열센서를 이용하여 다중경로 신호를 이용한 근거리표적의 위치 추정 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.

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. 한편 표적이 근거리표적의 경우 표적신호가 구면파로 도달하게 되므로 입사각과 거리를 동시에 추정해야 되며, 최근 활발한 연구가 진행되고 있다[3-5,10]. 특히 근거리표적의 깊이까지 고려한 3차원 위치추정기법은 기하학적인 제약으로 인하여 대부분 평면센서나 Y형 배열센서[6]와 같은 2차원 공간상의 배열센서를 이용하고 있다.

표적신호가 다중경로를 통하여 센서에 도달하는 경우, 각 경로신호들이 도달하는 입사각과 이들 사이의 시간차(time-difference)를 이용하여 표적신호의 전달경로를 구하여 표적의 위치를 추정하며[7-10] 여기에서 사용하는 선배열센서는 수직 선배열센서와 수평 선배열센서가 있다. 수직 선배열센서를 이용하는 경우 표적신호의 고각(elevation angle)이 다른 점을 이용하여 표적의 거리와 깊이를 추정할 수 있다[9,10]. 또한 최근에는 근거리표적의 위치추정에 관한 연구도 수행되고 있다[10]. 수평 선배열센서를 이용하는 경우 표적의 방위각(azimuth angle)은 추정할 수 있으나 각 경로를 통하여 들어온 신호들의 시간차만을 이용하여 표적의 거리를 추정하므로 표적의 거리와 깊이를 동시에 추정할 수 없다는 단점이 있다.

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. ESPRIT(Estimation of Signal Parameters via Rotational Invariance Techniques)기법을 응용하여 각 경로신호들의 원추각과 시간차를 추정하였으며, 이 원추각과 시간차를 표적의 위치에 대한 대수방정식을 유도하고, 이들을 연립하여 해를 구함으로써 표적의 위치를 추정하였다.

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

II. 다중경로모델과 문제설정

표적에서 발생한 신호가 수면이나 해저면에 여러 번 반사되는 경우, 일반적으로 산란 또는 흡수로 인해 신호의 감쇠가 매우 크다. 따라서 본 논문에서는 수면에 한번 반사되는 경우만을 고려하기로 한다.

2.1 해저고정형 선배열센서와 다중경로모델

표적신호가 다중경로를 통하여 해저면에 고정된 배열센서에 도달하는 구조를 그림 1에 나타내었다. 등간격으로 배치한 M개의 선배열센서의 중심을 기준으로 하였으며 그림 1과 같이 표적의 방위각 β, 표적의 수평거리 R, 그리고 표적의 수심 z를 표적의 위치로 설정하였다. 표적에서 직접 센서에 도달하는 직접경로(direct path)와 수면에 반사되어 센서에 도달하는 수면반사경로(surface reflected path)는 각각 아래첨자 D와 S를 이용하여 정의하였다. 각 경로신호를 $s_D(t)$와 $s_S(t)$로 정의하였으며 방위각이 같은 이 신호들의

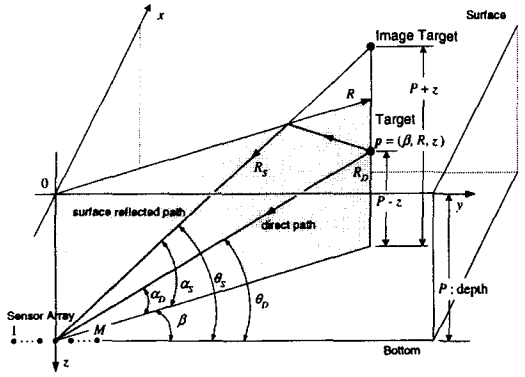

그림 1. 해저고정형 선배열센서와 근거리표적의 환경

고각 α_D와 α_S에 따라 원추각 θ_D와 θ_S도 달라지게 된다.

각 경로를 통하여 도달하는 신호들의 시간차 τ는 그림 1의 기하학적인 관계에서 다음과 같다.

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

여기서 c는 수중에서의 음속이다. 또한 각 신호는 원추각 θ_D와 θ_S로부터 입사되며, 원추각은 삼각법에 의하여 다음과 같다.

$$\cos\theta_D = \cos\alpha_D \cdot \cos\beta \tag{2}$$

$$\cos\theta_S = \cos\alpha_S \cdot \cos\beta \tag{3}$$

2.2 신호 모델

그림 1에서 M개의 배열센서에서 측정된 센서출력벡터 $\boldsymbol{x}(t_n)$는 식 (4)와 같이 나타난다.

$$\boldsymbol{x}(t_n) = \sum_{k\in\{D,S\}} s(t_n - \tau_k) b_k \boldsymbol{a}(\theta_k, R_k) + \boldsymbol{e}(t_n) \tag{4}$$

여기서 집합 $\{D, S\}$는 도달한 신호의 경로를 나타낸다. $s(t)$는 표적에서 발생한 신호이며 τ_k는 k번째 경로를 통해서 신호가 도달할 때 걸리는 시간을 나타낸다. b_k는 k번째 경로에서 신호가 반사될 때의 신호의 감쇠와 위상의 변화를 나타내는 복소수이다. $\boldsymbol{e}(t_n)$는 센서잡음 벡터로서 백색잡음으로 가정한다. $\boldsymbol{a}(\theta_k, R_k)$는 k번째 표적신호가 방향이 θ_k이며 신호의 경로길이가 R_k인 신호에 대한 방향모드 벡터로서 다음과 같다.

$$\boldsymbol{a}(\theta_k, R_k) = [e^{-j2\pi f_d \tau_1(\theta_k, R_k)}, \ldots, e^{-j2\pi f_d \tau_M(\theta_k, R_k)}]^T \tag{5}$$

여기서 f_d는 표적신호의 중심주파수이며 $\tau_m(\theta_k, R_k)$는 k번째 신호의 m번째 센서와 배열센서의 중심 사이의 시간 지연항으로서 식 (6)과 같이 정의된다.

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

여기서 $R_{k,m}$은 m번째 센서와 k번째 표적신호와의 거리로서 다음과 같이 나타난다.

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

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

센서출력신호를 N번 샘플링하여 $N \times M$차원의 신호행렬 X를 다음과 같이 구성할 수 있다.

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

여기서,

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

$$\Psi = \mathrm{diag}[b_D,\ b_S]$$

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

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

$$s(t-\tau_k) = [s(t_1-\tau_k),\ s(t_2-\tau_k),\ \ldots,\ s(t_N-\tau_k)]^T.$$

표적신호 $s(t)$는 중심주파수가 f_d인 협대역 신호성분으로 크기(amplitude)는 정규분포를 가지며 잡음 $\boldsymbol{e}(t_n)$는 원형 가우시안(circular Gaussian) 분포를 가진다.

III. 제안한 알고리즘

제안한 알고리즘은 신호들의 원추각과 시간차 추정, 다중경로신호의 효과를 고려한 표적의 위치추정, 마지막으로 ML 기법을 이용한 국부탐색의 3단계로 구성된다.

3.1 원추각과 시간차 추정

본 절에서는 Q. Zhang 등[11]이 제안한 원거리표적의 위치추정 기법을 이용하여 각 경로신호들의 원추각과 시간차를 추정한다. 이들은 일반적인 ESPRIT 기법과 달리 식 (9), (10)과 같은 형태의 신호 공분산행렬을 구성한다.

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

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

여기서 $\hat{S}(\tau) = S(\tau)\Psi$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, 고유치와 고유벡터를 구함으로써 신호의 원추각과 그 방향의 신호들을 추정할 수 있다.

$$Y_0 \hat{S}(\tau)\Phi^H = Y_1 \hat{S}(\tau) \tag{11}$$

여기에서 Φ는 식 (12)와 같으며 원추각 θ_D와 θ_S의 정보를 포함하고 있다.

$$\Phi = \mathrm{diag}\left[e^{j2\pi f_d \frac{d\cos\theta_D}{c}},\ e^{j2\pi f_d \frac{d\cos\theta_S}{c}}\right] \tag{12}$$

식 (11)에서 구한 고유벡터(eigenvector)는 고유치 방향의 신호를 의미한다. 따라서 크기가 가장 큰 두 개의 고유치와 그에 해당하는 고유벡터 $\boldsymbol{u}_1$, $\boldsymbol{u}_2$를 구함으로써 경로신호들의 원추각과 그 방향의 신호를 동시에 추정할 수 있다. 또한 고유벡터들의 상호상관관계(cross-correlation)의 첨두치를 구하여 $\hat{\tau}$를 추정하며 첨두치의 부호를 이용하여 먼저 도달하는 경로신호를 찾을 수 있다.

3.2 표적의 위치 추정

식 (1)에서 각 신호의 경로길이 R_D와 R_S를 R과 z의 함수로 나타내면 τ는 다음과 같이 나타난다.

$$\tau = \frac{1}{c}(\sqrt{R^2+(P+z)^2} - \sqrt{R^2+(P-z)^2}) \quad (13)$$

또한 원추각 식 (2)-(3)에서 삼각법을 이용하면 다음과 같이 θ_D와 θ_S를 (β, R, z)의 함수로 나타낼 수 있다.

$$\cos\theta_D = \frac{R\cos\beta}{\sqrt{R^2+(P-z)^2}} \quad (14)$$

$$\cos\theta_S = \frac{R\cos\beta}{\sqrt{R^2+(P+z)^2}} \quad (15)$$

각 경로신호의 원추각과 시간차가 주어질 때 식 (13)-(15)를 연립하여 풀면 다음과 같이 표적의 위치를 구할 수 있다.

$$z = \frac{c^2\tau^2(\cos\hat{\theta}_D + \cos\hat{\theta}_S)}{4P(\cos\hat{\theta}_D - \cos\hat{\theta}_S)} \quad (16)$$

$$R = \frac{1}{2}\sqrt{c^2\tau^2 + \frac{16P^2z^2}{c^2\tau^2} - 4(P^2+z^2)} \quad (17)$$

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

또는,

$$\cos\beta = \frac{\sqrt{R^2+(P+z)^2}}{R}\cos\hat{\theta}_S \quad (18b)$$

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 β가 90° 에 근접하거나 수심 z가 작은 경우 각 경로신호들의 원추각 θ_D, θ_S가 가까워지며, 이 경우 원추각의 분리추정에 실패하거나 추정오차가 커지므로 식 (16)-(18)에서 제시한 기법을 사용하지 못하게 된다. 그러므로 원추각의 분리추정의 성공여부와 원추각들이 근접하는 경우를 판단하여야 하며, 이 경우에는 추가적인 1차원 탐색으로 표적의 위치를 추정한다.

원추각의 분리추정이 실패하는 경우에는 하나의 고유벡터에 경로신호들이 모두 포함되므로, 이 고유벡터의 자기상관관계의 $\tau = 0$을 제외한 첨두치가 두 고유벡터의 상호상관관계의 첨두치보다 큰 값을 가진다. 이런 경우에 이 원추각을 $\hat{\theta}_D$로 선택하고 자기상관관계에서 $\hat{\tau}$를 추정한다.

각 경로신호의 원추각이 근접하는 경우의 판단은 기하학적인 성질을 이용한다. z가 0에 근접하거나 β가 90°에 가까워지면 원추각들이 서로 근접하므로 식 (19)와 같이 $\hat{\theta}_D$와 $\hat{\tau}$를 이용하는 판별식을 제안한다. 식 (19)를 만족하면 식 (16)-(18)를 사용하는 A영역이 되며 만족하지 않은 경우에는 B영역으로 정의한다.

$$\hat{\tau}\cdot|\hat{\theta}_D - 90^\circ| > H_{AB} \quad (19)$$

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

B영역에서는 θ_D가 주어지는 경우 표적의 위치와 θ_D는 식 (18)을 만족하므로 이를 만족하는 경로를 따라 국부탐색에서 제시하는 F_{ML}의 값을 최소화하는 지점을 탐색하여 표적의 위치를 추정한다. 그러나 원추각 $\hat{\theta}_D$의 추정오차를 고려하여 $\hat{\theta}_D$ ±3°내에서 5개 정도의 원추각을 θ_D로 선택한 후 식 (18)의 제한조건을 만족하는 경로를 따라 탐색한다.

3.4 국부탐색

ML(Maximum Likelihood) 기법은 여러 분야에서 파라미터를 추정하는 대표적인 기법으로 연산량이 큰 단점을 가지고 있으나 가장 좋은 추정성능을 기대할 수 있다. 따라서 ML 기법을 사용한 국부 탐색으로 추정성능을 높일 수 있다.

국부탐색에서 추정해야 하는 θ_D, θ_S, R_D, R_S는 식 (13)-(15)에 의해 표적위치 (β, R, z)의 함수로 나타나며, z는 식 (13)에 의해 다음과 같이 R의 함수로 나타난다[2].

$$z = \frac{1}{2}\sqrt{\frac{c^4\tau^4 - 4c^2\tau^2(P^2+R^2)}{c^2\tau^2 - 4P^2}} \quad (20)$$

따라서 2차원 방향모드 벡터 $\boldsymbol{a}(\theta_D, R_D)$, $\boldsymbol{a}(\theta_S, R_S)$는 β와 R의 함수로 나타난다.

식 (4), (5)의 신호모델에서 식 (21)과 같은 음의 로그-우도함수(negative log-likelihood function)를 얻을 수 있으며[2], 이 함수를 최소화하는 β와 R의 2차원 탐색으로 표적의 위치를 추정한다.

$$F_{ML} = \mathrm{Tr}[(I - A(A^HA)^{-1}A^H)\hat{R}_{xx}] \quad (21)$$

여기서 $\hat{R}_{xx} = X^HX$로서 센서 신호로부터 구한 공분산행렬이며 방향모드행렬 A는 식 (8)의 $A(\theta, R)$에서 θ와 R을 생략한 것이다.

IV. 모의실험

제안한 알고리즘의 성능을 분석하기 위하여 다음과 같은 환경에서 모의실험을 수행하였다. 배열센서는 수심 400 m의 해저면에 등간격으로 배치된 32개의 선배열센서로 가정하였다. f_d는 100Hz, f_s는 f_d의 2.56배인 256Hz로 설정하였다. 음속 c는 1500m/s, $\bar{d}$는 f_d의 반 파장으로 설정하였다. 따라서 배열센서의 길이는 232.5m가 된다. 수면에 반사되는 경우 위상이 반전되며 감쇠지수는 0.8이 되도록 설정하였다. 표적신호는 협대역 복소 가우시안 확률변수로 구성하였으며 150개의 표본을 사용하였으며, 센서잡음은 센서간에 상호독립인 복소 가우시안 확률변수로 하였다.

신호 대 잡음비는 0dB, β는 50°, R은 배열센서의 길이의 약 4.3배인 1000m, z는 수심의 중간인 200m로 설정하여 100번의 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다. 제안한 알고리즘을 사용한 표적의 위치추정 결과를 그림 2에 나타내었다. 실제 표적의 위치를 각 평면으로 수직선을 그어 나타내었으며 각 평면에는 그 평면을 이루는 두 파라미터에 대한 99% 신뢰구간을 타원으로 표시하였다. 방위각의 추정오차는 거의 없으

며 거리 추정오차는 40m이내이며 깊이의 추정오차도 10m이내임을 알 수 있다.

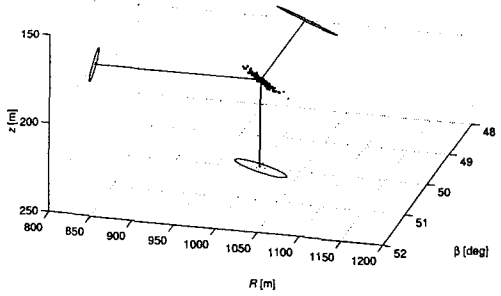

그림 2. 표적 위치 추정 결과

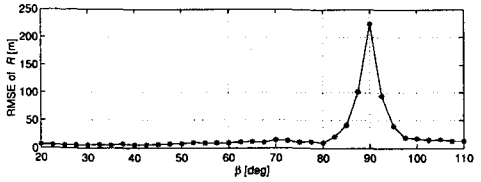

그림 3. 거리 추정 제곱근 평균 제곱 오차

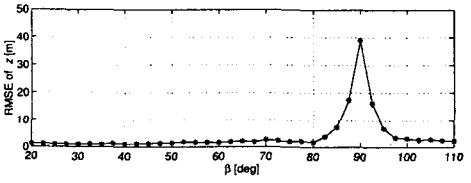

그림 4. 깊이 추정 제곱근 평균 제곱 오차

두 번째로 위와 같은 환경에서 β를 20°~110°로 변화시키면서 추정오차를 분석하였다. β가 90°인 곳을 기준으로 센서와 표적이 기하학적으로 대칭을 이루기 때문에 추정결과도 90°를 기준으로 대칭으로 나타난다. 이때 A영역과 B영역을 구분하는 H_{AB}는 2.5를 사용하였다. 제안한 알고리즘을 사용한 표적의 위치추정 결과를 그림 5에서 그림 7에 나타내었다. 다중경로의 효과가 거의 사라지는 90°근처에서 전체적인 추정오차가 큰 결과를 보이고 있다. 그러나 80°~100°를 제외하고는 거리의 추정오차는 최대 15.9m이고 깊이의 추정오차도 최대 2.8m로서 제안한 알고리즘이 신뢰할만한 값을 추정함을 알 수 있다.

V. 결 론

본 논문에서는 근거리표적의 신호가 다중경로를 통하여 해저면에 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 얕아서 다중경로의 효과가 사라지는 경우, 원추각의 추정오차가 커지므로 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 제곱근 평균 제곱 오차는 각각 15.8m와 2.8m로 나타났다. 따라서 제안한 알고리즘이 표적의 3차원 위치추정에 신뢰할만한 추정성능을 보임을 확인하였다.

참고문헌

[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] 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.

[4] 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.

[5] 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.

[6] 이철목, 이종환, 윤경식, 이균경, "협대역 다중표적의 효과적인 3차원 위치추정 알고리듬," *한국음향학회지*, 제19권, 제1호, pp. 61-66, 2000.

[7] 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.

[8] 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.

[9] 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.

[10] 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.

[11] Q. Zhang and J. Huang, "Joint Estimation of DOA and Time-Delay in Underwater Localization," *ICASSP 1999*, pp. 2817-2820, 1999