

# 환형배열센서를 이용한 근거리 표적의 효율적인 3차원 위치추정 알고리즘

## Efficient 3-D Near-field Source Localization Algorithm Using Uniform Circular Array

이 정 훈\*, 박 규 태\*, 박 도 현\*\*, 이 균 경\*\*

(Jung Hoon Lee\*, Gyu Tae Park\*, Do Hyun Park\*\*, Kyun Kyung Lee\*\*)

\*LG 이노텍(주), \*\*경북대학교 전자전기공학부

(접수일자: 2004년 2월 16일; 수정일자: 2004년 3월 23일; 채택일자: 2004년 4월 6일)

본 논문에서는 등간격으로 배치된 환형배열센서를 이용하여 근거리 표적의 3차원 위치를 추정하기 위한 효과적인 기법을 제안한다. 원거리 표적의 입사각 추정 알고리즘으로 추정된 근거리 표적의 입사각 (고각, 방위각)과 근거리 표적의 실제위치 (거리, 고각, 방위각)와의 대수적인 관계를 유도하고, 이를 3차원 MUSIC 스펙트럼의 극대값을 찾기 위한 경로로써 이용한다. 기존의 3차원 MUSIC 기법을 이용한 근거리 표적의 위치추정 기법에서는 3차원 탐색이 필요하나, 제안한 기법을 이용하면 경로를 초기화하기 위한 1번의 2차원 탐색과 경로를 추종하기 위한 1번의 1차원 탐색만이 요구되므로 연산량을 크게 감소시킬 수 있다.

**핵심용어:** 배열신호처리, 근거리, 표적위치추정, 대수적 경로추종기법, 환형배열센서

**투고분야:** 수중음향 분야 (5.6)

A computationally efficient algorithm is presented for 3-D near-field source localization using a uniform circular array (UCA). Algebraic relations are demonstrated between the incident angles (elevation angle and azimuth angle) under the far-field assumption and the actual near-field location (range, elevation angle, and azimuth angle). Using these relations as paths to follow to the peak of the 3-D MUSIC spectrum, the proposed algorithm replaces the 3-D search required in the conventional 3-D MUSIC with a 1-D path following after a 2-D initialization, thereby reducing the computational burden.

**Key words:** Array signal processing, Near-field, Source localization, Algebraic path-following, Uniform circular array

**ASK subject classification:** Underwater acoustics (5.6)

## I. 서 론

3차원 공간상에서 표적의 위치추정은 소나, 레이더, 스타트 안테나, 영상 및 음성신호처리, 통신 등의 많은 분야에서 매우 중요한 문제이며, 선배열센서, 평면배열센서, 환형배열센서 등의 배열센서를 이용해서 이루어진다[1-8]. 표적의 3차원 위치는 거리, 고각, 방위각으로 대표되며, 표적은 배열센서와의 거리에 따라서 원거리 표적과 근거리 표적으로 나누어진다. 원거리 표적의 경우 표적신호가 평

면파로 배열센서에 도달하므로 표적신호의 센서간의 시간 지연은 입사각 (고각, 방위각)만의 함수로 주어진다. 그러나 근거리 표적의 경우 표적신호는 구면파로 배열센서에 도달하므로 각 센서간의 표적신호의 시간지연은 거리와 입사각의 함수가 된다. 따라서 근거리 표적의 위치를 추정하기 위해서는 원거리 표적의 입사각 추정기법과는 다른 방법이 필요하다[3-8].

일반적으로 표적의 위치추정에 많이 이용되고 있는 선배열센서는 센서간의 시간지연이 일정하여 위치추정이 간단하다는 장점이 있으나, 조향방향에 따라서 다른 빔폭과 부엽준위를 가지고 180° 만을 조향할 수 있으며, 표적이 원 거리에 존재하는 경우 표적의 방위각만을 추정한다. 이에

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

반해 환형배열센서는 빔폭과 부엽준위의 변화없이 360° 전 방향으로 빔을 조향할 수 있으며, 표적이 원거리에 존재하는 경우 표적의 방위각 뿐만 아니라 고각도 추정할 수 있다는 장점을 가진다. 현재까지의 환형배열센서를 이용한 위치추정에 대한 연구는 표적이 원거리에 위치한 경우의 1차원 방위각 또는 2차원 입사각 추정기법이 대부분이다[1,2].

배열센서와 근거리 표적이 동일 평면상에 위치하는 경우 거리와 방위각의 2차원 위치만을 추정할 수 있으며, 이를 위해서 많은 기법들이 제안되어 왔다[3-6]. 그 중 최근 Lee 등이 제안한 선배열센서를 이용한 대수적 경로추정기법이 효과적이라고 알려져 있다[4-6]. 이는 원거리 표적의 방위각 추정 기법으로 근거리 표적의 방위각을 추정하면 추정된 방위각은 실제 근거리 표적의 방위각과 거리의 대수적 관계식으로 주어짐을 이용하여 이 대수적 관계식을 2차원 MUSIC 스펙트럼의 극대값을 찾기 위한 경로로 사용하였다. 따라서 기존의 2차원 탐색을 2번의 1차원 탐색으로 해결함으로써 연산량을 감소시킬 수 있었다.

실제 상황에서 표적은 3차원 공간상에 위치하게 되므로 2차원 근거리 표적의 위치추정기법을 직접 적용할 수 없다. 3차원 근거리 표적의 위치를 추정하기 위해 사용되는 대표적인 기법인 3차원 MUSIC 기법은 배열센서의 구조와 상관없이 사용할 수 있으나, 거리, 고각, 방위각에 대한 3차원 격자탐색을 요구한다. 이를 해결하기 위해 최근에 Lee 등은 Y자 형태의 세 개의 부분센서배열에 대수적 경로추정기법을 응용하여 3차원 근거리 표적의 위치를 추정하기 위한 기법을 제안하였다[7,8]. 이는 3차원 탐색을 3번의 1차원 탐색으로 감소시킬 수 있었으나, 배열센서를 3개의 부분센서배열로 나눔으로 인해 분해능이 감소하고, 동시에 탐지할 수 있는 다중표적의 수가 1/3로 감소한다.

따라서 본 논문에서는 한 개의 환형배열센서를 이용하여 3차원 근거리 표적의 위치를 효과적으로 추정하는 기법을 제안한다. 원거리 표적의 입사각 추정기법으로 추정한 근거리 표적의 원거리 입사각은 원거리 표적으로 가정했을 때의 시간지연과 실제 근거리 표적의 시간지연의 평균제곱 오차를 최소화 만드는 해로 볼 수 있으므로, 이를 이용하여 근거리 표적의 원거리 입사각과 실제 근거리 표적의 입사각과 거리의 대수적 관계식을 유도한다. 이 대수적 관계식과 추정한 근거리 표적의 원거리 입사각을 이용하여 근거리 표적의 실제 위치를 추정하기 위한 경로를 설정하고, 이 경로를 따라 1차원 탐색을 통하여 근거리 표적의 위치를 추정한다. 경로탐색으로 얻은 위치를 초기값으로 이용하여 3차원 MUSIC 스펙트럼의 국부탐색을 수행하여 정확한 표적의 위치를 추정한다.

기존의 3차원 MUSIC 기법에서는 3차원 탐색이 요구되나, 제안한 기법에서는 원거리 표적의 입사각 추정 기법을

이용하여 경로를 초기화하기 위한 1번의 2차원 탐색과 유도한 대수적인 관계식을 추종하여 3차원 MUSIC 스펙트럼의 극대값을 찾기 위한 1번의 1차원 탐색만이 필요하다. 또한 제안한 기법은 기존의 3차원 표적의 위치추정 기법에서 발생하는 연관문제가 발생하지 않는 장점이 있다.

## II. 문제 설정 및 MUSIC 알고리즘

그림 1은 표적과 환형배열센서의 구조이다. 환형배열센서는  $xy$  평면상에 반지름이  $R$  인 원의 원주상에 등간격으로 배치되어 있으며,  $M$  개의 동일한 전방향성 센서로 구성되어 있다. 근거리 표적은 환형배열센서의 중심으로부터 거리  $r$ ,  $z$  축으로부터 고각  $\theta$ ,  $x$  축으로부터 방위각  $\phi$  에 위치하고 있다. 이때 센서출력은 다음과 같다.

$$\mathbf{x}(t) = \mathbf{a}(r, \theta, \phi) s(t) + \mathbf{n}(t) \tag{1}$$

여기서  $s(t)$  는 표적신호,  $\mathbf{n}(t)$  는 잡음벡터이며,  $\mathbf{a}(r, \theta, \phi)$  는 조종벡터 (steering vector)로서 다음의 식과 같다.

$$\mathbf{a}(r, \theta, \phi) = [1 \quad e^{-j2\pi\tau_1(r, \theta, \phi)} \quad \dots \quad e^{-j2\pi\tau_{M-1}(r, \theta, \phi)}]^T \tag{2}$$

여기서  $f$  는 표적신호의 전송주파수이며,  $\tau_k(r, \theta, \phi)$  는 환형배열센서의  $k$  번째 센서와 중심 사이의 시간지연항으로서 다음의 식과 같이 정의된다.

$$\tau_k(r, \theta, \phi) = \frac{r - r_k(r, \theta, \phi)}{c_0} \tag{3}$$

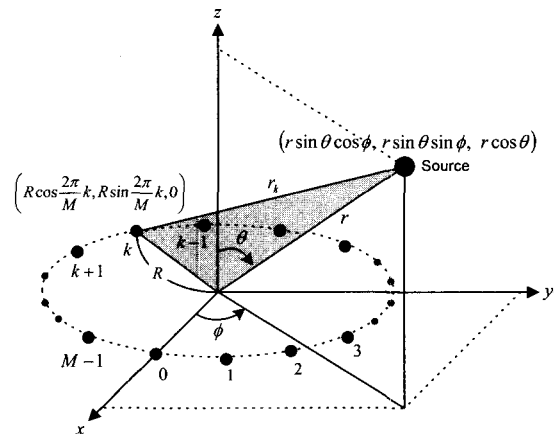


그림 1. 환형배열센서와 표적의 기하학적 구조  
Fig. 1. Geometry of a UCA and source.

여기서  $c_0$ 는 표적신호의 전송속도이며,  $r_k(r, \theta, \phi)$ 는 환경배열센서의  $k$  번째 센서와 중심으로부터  $(r, \theta, \phi)$ 에 위치한 표적과의 거리로서 다음의 식과 같다.

$$r_k(r, \theta, \phi) = \sqrt{r^2 + R^2 - 2rR \sin \theta \cos \left( \frac{2\pi}{M} k - \phi \right)} \quad (4)$$

표적의 3차원 위치를 추정하기 위해 일반적으로 사용되는 3차원 MUSIC 알고리즘은 식 (5)와 같은 3차원 MUSIC 스펙트럼을 극대화시키는  $(r, \theta, \phi)$ 를 찾음으로써 표적의 위치를 추정한다.

$$P(r, \theta, \phi) = \frac{1}{\mathbf{a}^H(r, \theta, \phi) \mathbf{E}_N \mathbf{E}_N^H \mathbf{a}(r, \theta, \phi)} \quad (5)$$

여기서 위치자  $H$ 는 복소 공액 전치를 의미하며,  $\mathbf{E}_N$ 은 식 (1)의 센서출력을 이용하여 구한 공분산행렬의 잡음 부분공간이다. 3차원 MUSIC 알고리즘은 먼저  $(r, \theta, \phi)$ 에 대한 3차원 격자탐색을 수행한 후 격자탐색의 결과를 초기치로 이용하여 국부탐색을 수행한다. 따라서 3차원 MUSIC 알고리즘의 연산량은 격자의 수에 의존하며, 인접한 표적을 분리추정하기 위해서는 격자의 수가 증가하게 되어 연산량도 증가한다.

### III. 제안한 알고리즘

원거리 표적의 입사각 추정 알고리즘으로 추정된 근거리 표적의 입사각은 실제 근거리 표적의 방위각과 오차가 발생하지만, 근거리 표적의 위치에 관한 정보를 포함하고 있다(4). 본 논문에서는 이를 이용하여 환경배열센서에서 3차원 근거리 표적의 위치를 추정하기 위한 효과적인 알고리즘을 제안한다.

근거리 표적이 원거리  $(\bar{\theta}, \bar{\phi})$ 에 위치하고 있다고 가정했을 때, 환경배열센서의 중심에 도달하는 신호와  $k$  번째 센서에 입사하는 신호와의 시간지연은 다음 식과 같다.

$$\tau_k(\bar{\theta}, \bar{\phi}) = \frac{1}{c_0} R \sin \bar{\theta} \cos \left( \frac{2\pi}{M} k - \bar{\phi} \right) \quad (6)$$

근거리 표적이 원거리에 있다고 가정하여 추정된 원거리 입사각  $(\hat{\theta}, \hat{\phi})$ 은 식 (3)에서 구한 실제 인접한 센서사이

의 출력신호의 시간지연과 식 (6)에서 구한 원거리 표적으로 가정했을 때의 시간지연의 차를 최소화 하는 해로 간주할 수 있다.

$$F(\bar{\theta}, \bar{\phi}) = \sum_{k=0}^{M-1} \left[ \tau_k(\bar{\theta}, \bar{\phi}) - \tau_k(r, \theta, \phi) \right]^2 \\ = \sum_{k=0}^{M-1} \left[ \frac{1}{c_0} R \sin \bar{\theta} \cos \left( \frac{2\pi}{M} k - \bar{\phi} \right) - \frac{r - r_k(r, \theta, \phi)}{c_0} \right]^2 \quad (7)$$

식 (7)의 극소값을 구하기 위해  $\bar{\phi}$ 와  $\bar{\theta}$ 에 대하여 미분하여 정리하면 다음 식과 같다.

$$\frac{\partial F}{\partial \bar{\phi}} = \frac{2R \sin \bar{\theta}}{c_0^2} \sum_{k=0}^{M-1} \sin \left( \frac{2\pi}{M} k - \bar{\phi} \right) r_k(r, \theta, \phi) \quad (8)$$

$$\frac{\partial F}{\partial \bar{\theta}} = \frac{2R \cos \bar{\theta}}{c_0^2} \sum_{k=0}^{M-1} \left( \frac{1}{2} R \sin \bar{\theta} + \cos \left( \frac{2\pi}{M} k - \bar{\phi} \right) r_k(r, \theta, \phi) \right) \quad (9)$$

식 (8)과 (9)에서  $k$  번째 센서와  $(r, \theta, \phi)$ 에 위치한 표적과의 거리를 나타내는  $r_k(r, \theta, \phi)$ 는 3차 테일러 (Taylor) 근사화 방법을 이용하면 다음과 같이 근사화할 수 있다.

$$r_k(r, \theta, \phi) \approx r \left[ 1 - p_k \frac{R}{r} + \frac{1}{2} (1 - p_k^2) \left( \frac{R}{r} \right)^2 + \frac{1}{2} p_k (1 - p_k^2) \left( \frac{R}{r} \right) \right] \quad (10)$$

여기서  $p_k = \sin \bar{\theta} \cos \left( \frac{2\pi}{M} k - \bar{\phi} \right)$ 이다.

식 (10)의 테일러 근사화된  $r_k(r, \theta, \phi)$ 를 이용하여 식 (8)이 0이 되도록  $\bar{\phi}$ 에 관해 정리하면, 원거리 표적으로 가정하여 추정한 방위각  $\hat{\phi}$ 과 실제 근거리 표적의 방위각  $\phi$ 와의 대수적 관계식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\phi = \hat{\phi} \quad (11)$$

식 (11)으로부터 환경배열센서에서 실제 근거리 표적의 방위각은 거리와 방위각에 관계없이 원거리 표적으로 가정하여 추정한 방위각과 동일하다는 것을 알 수 있다.

식 (11)의 결과와 식 (10)의 테일러 근사화된  $r_k(r, \theta, \phi)$ 를 이용하여 식 (9)가 0이 되도록  $\bar{\theta}$ 에 관해 정리하면, 원거리 표적으로 가정하여 추정한 고각  $\hat{\theta}$ 과 실제 근거리

표적의 고각  $\theta$ , 거리  $r$  과의 대수적 관계식을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\sin \hat{\theta} \approx \frac{3}{8} \left( \frac{R}{r} \right)^2 \sin^3 \theta + \left( 1 - \frac{1}{2} \left( \frac{R}{r} \right)^2 \right) \sin \theta \quad (12)$$

이를  $\theta$  에 대해 정리하면, 근거리 표적의 고각  $\theta$  는 거리  $r$  과 원거리 표적으로 가정하여 추정된 고각  $\hat{\theta}$  의 함수로써 다음과 같이 얻어진다.

$$\theta = \sin^{-1} \left( \frac{2^{1/3} (2a - 4 + 2^{1/3} z^2)}{3az} \right) \quad (13)$$

여기서  $z = \left[ 9a \sin \hat{\theta} + \sqrt{(81a^2 \sin^2 \hat{\theta} - 4(a^2 - 2)^3)} \right]^{1/3}$  이고,  $a = R/r$  이다.

식 (11)과 (13)은 근거리 표적의 실제 위치  $(r, \theta, \phi)$  와 원거리 표적으로 가정하여 추정된 입사각  $(\hat{\theta}, \hat{\phi})$  과의 대수적인 관계식을 제공한다. 이 대수적 관계식들은 원거리 표적으로 가정하여 추정된 입사각을 초기치로 이용하여 3차원 MUSIC 스펙트럼의 극대값을 찾기 위한 경로로써 이용된다. 식 (13)의 고각  $\theta$  에 대한 대수적 관계식을 그림 2에서 나타내었다. 그림 2에서 가로축은 sine 영역에서 근거리 표적의 고각을 나타내고, 세로축은 환형배열센서의 반지름으로 정규화한 표적의 거리를 나타낸다. 원거리 표적의 입사각 추정 알고리즘은 2차원 MUSIC을 이용하였으며, 이를 이용하여 추정된 원거리 입사각  $\sin \hat{\theta}$  을 0에서 1까지 0.1간격으로 바꾸어가면서 각각의 값에 해당하는 대수적 관계식을 그래프로 표현하였다. 근거리 표적을 원거리 표적으로 가정하여 원거리 표적의 입사각 추정 알고리즘으로 입사각을 추정하면, 실제 근거리 표적의 방위각은 원거리 표적으로 가정하여 추정된 방위각과 동일하며,

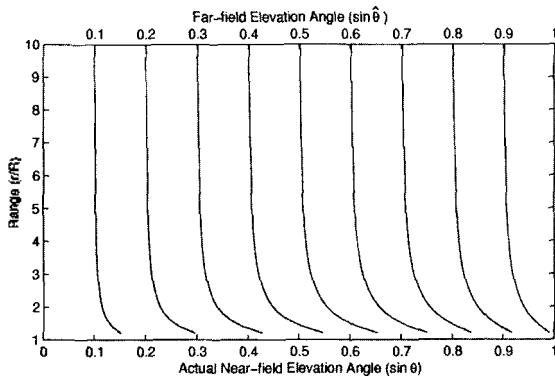


그림 2. 추정된 고각과 실제 표적의 위치와의 관계  
Fig. 2. Relation of estimated elevation angles and actual near field locations.

고각은 그림 2와 같이 식 (13)을 만족하는 대수적 경로 위에 존재한다.

제한한 환형배열센서를 이용한 근거리 표적의 3차원 위치추정 알고리즘을 요약하면 다음과 같다.

1 단계 : 초기화

빔형성기법, MUSIC 등과 같은 원거리 표적의 입사각 추정 알고리즘을 이용하여 근거리 표적의 원거리 입사각을 추정한다. 본 논문에서는 국부탐색을 위해 이용되는 3차원 MUSIC과 동일한 구조를 가지는 2차원 MUSIC을 이용하였다. 이는 다음 식으로 주어진 2차원 MUSIC 스펙트럼의 극대값을 찾음으로써 근거리 표적을 원거리 표적으로 가정하여  $n$  개의 근거리 표적의 고각  $\hat{\theta}_i$  와 방위각  $\hat{\phi}_i$  를 추정한다.

$$P(\hat{\theta}_i, \hat{\phi}_i) = \frac{1}{\mathbf{a}^H(\hat{\theta}_i, \hat{\phi}_i) \mathbf{E}_n \mathbf{E}_n^H \mathbf{a}(\hat{\theta}_i, \hat{\phi}_i)} \quad (14)$$

여기서  $\mathbf{a}(\hat{\theta}_i, \hat{\phi}_i)$  는 표적이 원거리에 존재하는 경우의 조종벡터로  $\mathbf{a}(\infty, \hat{\theta}_i, \hat{\phi}_i)$  와 같다.

2 단계 : 경로 설정

식 (11)과 같이 근거리 표적의 방위각  $\hat{\phi}_i$  를 원거리로 가정하여 1단계에서 추정된 방위각  $\hat{\phi}_i$  와 같도록 설정하고, 식 (13)을 이용하여 1단계에서 원거리로 가정하여 추정한  $n$  개의 고각  $\hat{\theta}_i$  로부터  $n$  개의 경로를 설정한다.

3 단계 : 위치추정

2단계에서 설정한 경로를 따라 거리  $r$  을 바꾸어가면서 격자탐색을 하여 식 (5)의 3차원 MUSIC 스펙트럼이 최대가 되는 점을 찾고, 이를 국부탐색을 위한 초기값으로 설정한다.

4 단계 : 국부탐색

3단계에서 설정한 초기값으로부터 일반적인 최적화 기법을 이용하여 3차원 MUSIC 스펙트럼의 극대값을 얻음으로써 근거리 표적의 위치를 추정한다.

IV. 모의 실험

제한한 알고리즘의 성능을 검증하기 위하여 모의실험을 수행하였다. 그림 1에 나타낸 바와 같이 협대역 표적 신호 파장의 1/2의 등간격으로 배열된 16개의 센서로 이루어진 환형배열센서를 사용하여 근거리 표적의 거리, 고각, 방위각으로 나타나는 3차원 위치를 추정하였다. 반지름이  $R$  인 환형배열센서에 대해서 두 개의 표적이  $(2.5R, 45^\circ, -10^\circ)$ ,

(3R, 55°, 20°)에 위치하고 있으며, 표적신호는 협대역 복소 가우시안 확률변수로 구성하였다. 센서잡음은 센서간에 상호독립인 복소 가우시안 확률변수로 하였고, 256 표본을 사용하여 표본 센서출력 공분산 행렬을 구성하였다.

제안한 알고리즘을 이용하여 3차원 근거리 표적의 위치를 추정하는 과정을 그림 3~5에서 보여주고 있다. 근거리 표적을 원거리 표적으로 가정하여 원거리 입사각을 추정하기

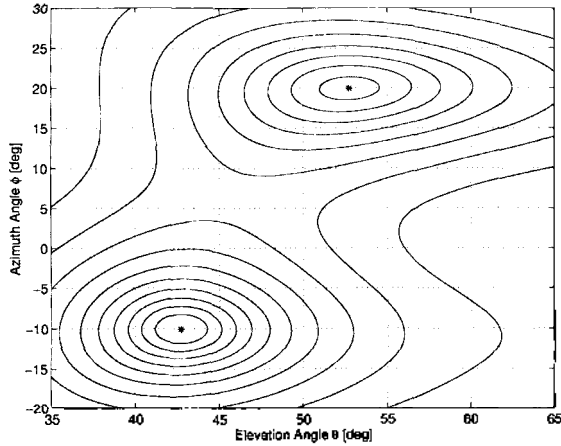


그림 3. 원거리입사각을 추정하기 위한 2차원 MUSIC 스펙트럼  
Fig. 3. 2-D MUSIC spectrum to estimate the far field incident angles.

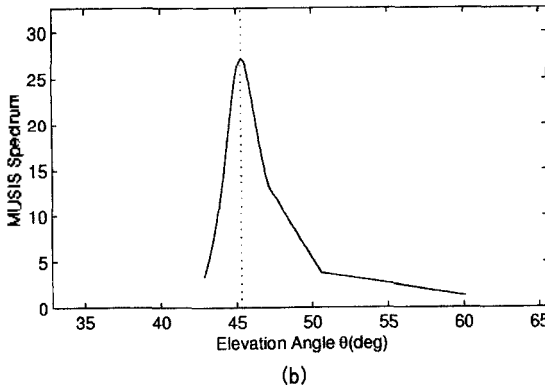
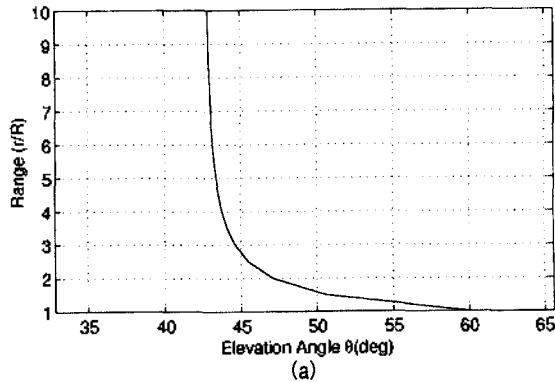


그림 4. (2.5R, 45°, -10°)에 위치한 표적에 대한 제안한 대수적 경로  
(a) 고각에 대한 대수적 경로  
(b) 대수적 경로상에서 1차원 MUSIC 스펙트럼  
Fig. 4. Proposed algebraic path  $(r, \theta, \phi) = (2.5R, 45^\circ, -10^\circ)$ .  
(a) Algebraic path for elevation angle.  
(b) 1 D MUSIC spectrum obtained by following path.

위한 2차원 MUSIC 스펙트럼을 그림 3에서 보여준다. 2차원 MUSIC 스펙트럼의 극대값은  $(\hat{\theta}, \hat{\phi}) = (42.68^\circ, -10.08^\circ), (52.73^\circ, 19.94^\circ)$ 로써 표적의 실제 입사각과 방위각은 유사하나 고각은 오차를 가짐을 알 수 있다. 이를 초기값으로 이용한 고각에 대한 제안한 대수적 경로와 경로상에서 MUSIC 스펙트럼을 그림 4와 5에서 보여주고 있다. 제안한 경로를 따라가면서 MUSIC 스펙트럼의 극대값을 탐색함으로써 3차원 근거리 표적의 위치를 추정할 수 있다.

제안한 대수적 경로, 3차 테일러 근사화를 하지 않고 최적화 방법을 통해 구한 경로, MUSIC 스펙트럼을 그림 6에 함께 나타내었다. 원거리 위치추정 알고리즘으로 추정된 고각 42.68°와 52.73°에 대한 제안한 대수적 경로를 실선으로 나타내었으며, 3차 테일러 근사화를 하지 않고 최적화 방법을 통해 구한 경로를 'x'로 나타내었다. 또한 MUSIC 스펙트럼의 크기는 등고선으로 나타내었다. 제안한 대수적 경로가 3차 테일러 근사화를 하지 않은 경로와 거의 일치함을 볼 수 있으므로, 제안한 알고리즘에서 대수적 관계식을 유도하기 위해 사용한 근사화가 합당함을 알 수 있다. 또한 MUSIC 스펙트럼의 극대값이 제안한 대수

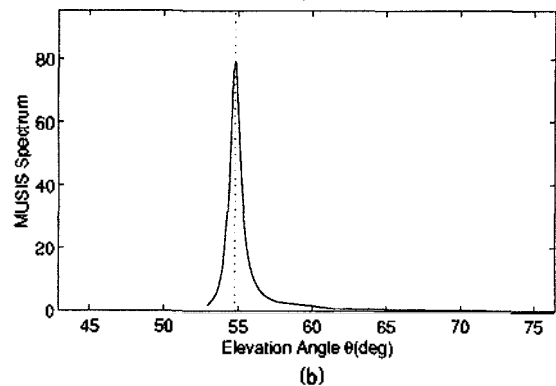
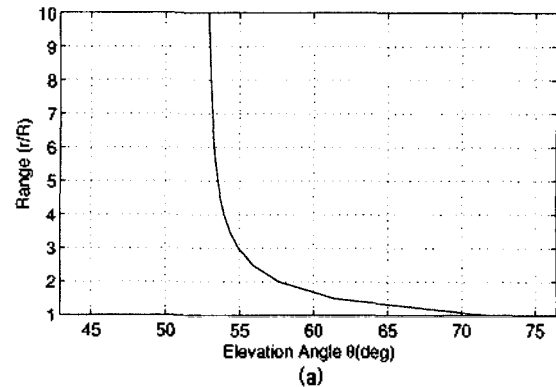


그림 5. (3R, 55°, 20°)에 위치한 표적에 대한 제안한 대수적 경로  
(a) 고각에 대한 대수적 경로  
(b) 대수적 경로상에서 1차원 MUSIC 스펙트럼  
Fig. 5. Proposed algebraic path  $(r, \theta, \phi) = (3R, 55^\circ, 20^\circ)$ .  
(a) Algebraic path for elevation angle.  
(b) 1 D MUSIC spectrum obtained by following path.

표 1. 3차원 MUSIC 추정값에 대한 제안한 알고리즘 추정값의 제공근 평균제곱오차

Table 1. Mean and variance of distance between peak of 3-D MUSIC spectrum and estimate of proposed algorithm.

SNR(dB)		0	3	6	9
Range ( $r/R$ )	Mean	0.00514	0.00707	0.00394	0.00379
	Var.	0.00026	0.00023	0.00017	0.00012
Elevation angle (Deg.)	Mean	0.03973	0.02831	0.02925	0.02289
	Var.	0.00095	0.00042	0.00038	0.00022
Azimuth angle (Deg.)	Mean	0.05117	0.03679	0.02775	0.02612
	Var.	0.00122	0.00095	0.00049	0.00033

표 2. 부동소수점 연산회수

Table 2. Number of floating point operations.

No. of range grids	10	20	40	80
2 D MUSIC	93,266,396 (Independent of range grid)			
Proposed	93,708,033	93,733,493	93,784,738	93,887,264
3 D MUSIC	823,058,689	1,645,699,148	3,290,951,896	6,581,350,220

적 경로 근처에 존재함을 알 수 있다. 따라서 제안한 대수적 경로를 따라 가면서 격자탐색을 통하여 3차원 MUSIC

스펙트럼이 최대가 되는 점을 찾고, 이를 초기값으로 하여 국부탐색을 수행하면 표적의 정확한 위치를 추정할 수 있다.

신호 대 잡음비에 따른 표적의 위치추정 성능을 분석하기 위하여 신호 대 잡음비를 0dB에서 9dB까지 3dB씩 변화시키면서 3차원 MUSIC과 제안한 알고리즘의 제공근 평균제곱오차를 표 1에서 분석하였다.  $(3R, 55^\circ, 20^\circ)$ 에 위치한 표적에 대해서 300번의 몬테카를로 시뮬레이션을 수행하였다. 3차원 MUSIC의 경우  $(R, \theta, \phi)$ 에 대하여 격자탐색을 하여 초기치를 설정한 후 이 초기치로부터 Quasi-Newton 최적화 기법을 적용하여 국부탐색을 수행한 결과이다. 반면 제안한 기법은 국부탐색을 수행할 경우 3차원 MUSIC과 동일한 해를 얻게 되므로 국부탐색을 수행하지 않고, 제안한 대수적 경로를 따라가면서 최대가 되는 점을 찾은 결과이다. 이를 통하여 제안한 기법의 국부탐색을 수행하지 않은 추정치는 3차원 MUSIC 스펙트럼의 극대값과 매우 근접함을 알 수 있으므로, 국부탐색을 통하여 표적의 위치를 빠르고 정확하게 추정할 수 있음을 알 수 있다.

위의 모의실험과 같은 상황에서 3차원 MUSIC과 제안한 기법을 이용하여 근거리 표적의 위치를 추정하는데 필요한 연산량을 비교하기 위하여 부동소수점 연산량을 계산하였고, 그 결과를 표 2에 나타내었다. 격자탐색 과정에서 거리에 대한 격자수를 변화시켜 가면서 Matlab의 내장함수 FLOPS로부터 부동소수점 연산회수를 얻었다. 제안한 알고리즘의 경로를 초기화하는 과정인 2차원 MUSIC 스펙트럼의 극대값을 찾기 위해서 Quasi-Newton 최적화 기법을 사용하였다. 2차원 MUSIC과 3차원 MUSIC 모두 입사각의 격자크기는  $(\Delta\theta, \Delta\phi) = (1^\circ, 1^\circ)$ 로 설정하였다. 제안한 알고리즘의 연산량이 3차원 MUSIC에 비해

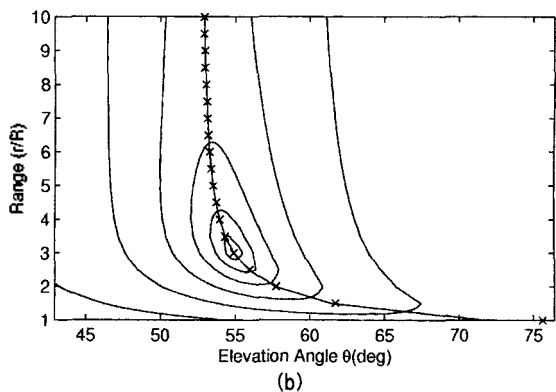
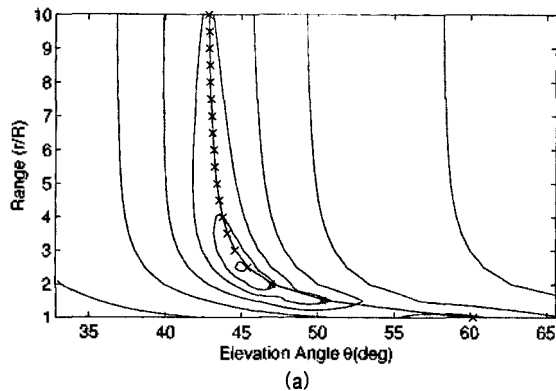


그림 6. 고각에 대한 제안한 경로와 근사화를 하지 않은 경로 및 MUSIC 스펙트럼

(a) 표적 1 :  $(r, \theta, \phi) = (2.5R, 45^\circ, -10^\circ)$ .

(b) 표적 2 :  $(r, \theta, \phi) = (3R, 55^\circ, 20^\circ)$ .

Fig. 6. Proposed algebraic elevation paths, the elevation paths without approximation and MUSIC spectrum.

(a) Source 1 :  $(r, \theta, \phi) = (2.5R, 45^\circ, -10^\circ)$ .

(b) Source 2 :  $(r, \theta, \phi) = (3R, 55^\circ, 20^\circ)$ .

현저히 적음을 알 수 있다. 또한 제안한 알고리즘은 2차원 MUSIC에 의해 경로를 초기화하는데 대부분의 연산량을 필요로 함을 알 수 있다. 따라서 표적의 거리에 대한 해상도를 높이기 위하여 거리에 관한 격자수를 늘여도 제안한 알고리즘의 연산량은 크게 영향을 받지 않는다.

### V. 결론

본 논문에서는 환형배열센서를 사용하여 근거리 표적의 3차원 위치추정을 위한 효율적인 기법을 제안하였다. 원거리 표적의 입사각 추정 알고리즘으로 추정된 근거리 표적의 입사각과 근거리 표적의 실제 위치와의 대수적 관계식을 유도하였다. 이 대수적 관계식을 이용하여 근거리 표적의 위치를 추정하기 위한 경로를 설정하고, 설정된 경로를 탐색하여 3차원 국부탐색을 위한 초기값을 얻었다. 기존의 3차원 MUSIC에서는 거리, 고각, 방위각에 대하여 3차원 탐색을 해야 하는 반면, 제안한 기법은 원거리 표적의 입사각 추정 알고리즘을 이용하여 경로를 초기화하기 위한 1번의 2차원 탐색과 유도한 대수적인 관계식을 추종하여 3차원 MUSIC 스펙트럼의 극대값을 찾기 위한 1번의 1차원 탐색만이 필요하므로 연산량을 감소시켰으며, 이를 모의실험을 통하여 입증하였다.

### 감사의 글

이 논문은 2002년도 경북대학교특성화사업팀 (KNURT) 연구비에 의하여 지원되었음.

### 참고 문헌

1. R.O. Schimdt, "Multiple emitter location and signal parameter estimation," IEEE Trans. Antennas Propag. 34(3), 276-280, 1986.
2. A.Y.J. Chan, and J. Litva, "MUSIC and maximum likelihood techniques on two dimensional DOA estimation with uniform circular array," IEE Proc.-Radar, Sonar Navig. 142

- (3), 105-114, 1995.
3. D. Storer, and A. Nehorai, "Passive localization of near field sources by path-following," IEEE Trans. Signal Process. 42 (3), 677-680, 1994.
4. J.H. Lee, C.M. Lee, and K.K. Lee, "A modified path following algorithm using a known algebraic path," IEEE Trans. Signal Process. 47 (5), 1407-1409, 1999.
5. 이종환, 이균경, "대수적 경로 추종에 의한 근거리 표적의 수동형 위치 추정," 한국음향학회지, 제 17권, 제4호, pp. 54-59, 1998.
6. J.H. Lee, C.M. Lee, and K.K. Lee, "Nonlinear triangulation ranging of near field sources," Electron. Lett. 34 (23), 2207-2208, 1998.
7. C.M. Lee, K.S. Yoon, J.H. Lee and K.K. Lee, "Efficient algorithm for localizing 3-D narrowband multiple sources," IEE Proc.-Radar, Sonar Navig. 148 (1), 23-26, 2001.
8. 이철묵, 이종환, 윤경식, 이균경, "합대역 다중표적의 효과적인 3차원 위치추정 알고리즘," 한국음향학회지, 19 (1), 61-66, 2000.

### 저자 약력

#### • 이 정 훈 (Jung Hoon Lee)



1997년 2월: 경북대학교 공과대학 전자공학과(공학사)  
 1999년 2월: 경북대학교 대학원 전자공학과(공학석사)  
 2004년 2월: 경북대학교 대학원 전자공학과(공학박사)  
 2000년 3월~2004년 4월: 수중음향특화연구센터 연구원  
 2004년 4월~현재: LG 이노텍㈜ 선임연구원  
 \* 주관심분야: 수중음향신호처리, 표적위치추정, 표적탐지 및 추적

#### • 박 규 태 (Gyu Tae Park)



1997년 2월: 경북대학교 공과대학 전자공학과(공학사)  
 1999년 2월: 경북대학교 대학원 전자공학과(공학석사)  
 2004년 2월: 경북대학교 대학원 전자공학과(공학박사)  
 2004년 2월~현재: LG 이노텍㈜ 선임연구원  
 \* 주관심분야: 수중음향신호처리, 표적위치추정, 표적탐지 및 추적

#### • 박 도 현 (Do Hyun Park)

현재: 경북대학교 대학원 전자공학과 박사과정 수료  
 한국음향학회지 제20권 제8호 참조

#### • 이 균 경 (Kyun Kyung Lee)

현재: 경북대학교 전자전기공학부 교수  
 한국음향학회지 제17권 제4호 참조