

논문 2012-50-5-24

소나시스템 비분리 평면센서배열의 효율적인 분리 가중치 기법

(An Efficient Separable Weighting Method for Sonar Systems with Non-Separable Planar Arrays)

도 대 원*, 김 우 식*, 이 동 훈*, 김 형 문*, 최 상 문*

(Dae-Won Do[Ⓞ], Woo-Sik Kim, Dong-Hun Lee, Hyung-Moon Kim, and Sang-Moon Choi)

요 약

평면센서배열을 사용하는 소나시스템에서 송수신빔을 수평, 수직방향으로 분리하여 형성할 수 있다면, 빔형성에 필요한 연산량과 공간을 줄일 수 있는 장점이 있다. 하지만 일반적으로 소나시스템에서 사용되는 평면센서배열은 공간상 수평, 수직방향으로 분리되지 않는다. 따라서 기존의 수평, 수직방향 분리 가중치를 이용하여 송수신빔을 분리하여 형성하면 목표로 하는 수평, 수직 빔 특성과 차이가 발생된다. 본 논문에서는 공간상 분리가 되지 않는 평면센서배열에 대해 효과적으로 분리된 수평, 수직 가중치를 적용하여 목표로 하는 수평, 수직 빔 특성을 얻기 위한 새로운 기법을 제안하였다. 제안한 기법은 평면센서배열의 수평, 수직방향으로 영향을 미치는 유효센서수를 구해 분리된 수평, 수직 가중치에 적용시킨다. 이를 통해 목표로 하는 수평, 수직 가중치의 오차 합이 최소화되도록 반영시킴으로써 각 방향으로 목표로 하는 빔 특성을 가지도록 한다.

Abstract

When a beamforming can be processed separately in horizontal and vertical directions with the planar arrays used in sonar systems, there are several merits such as that practically reduce the required computations and volumes. However, the common planar arrays used in sonar systems are generally non-separable, so the beamforming with separable weighting results in the differences between the desired beam characteristics and the resultant beam characteristics. In this paper, we propose a new separable weighting method which can achieve the wanted beam characteristics by using the separable weights in horizontal and vertical directions for the non-separable planar arrays. In order to achieve the wanted beam characteristics, the proposed method minimizes the differences between the desired weights and the resultant weights based on the number of effective sensors in horizontal and vertical directions of the planar arrays.

Keywords : 소나시스템, 평면센서배열, 빔형성, 분리 가중치

I. 서 론

평면센서배열 (planar arrays)을 사용하는 소나시스템은 2차원 평면에 배열된 음향센서들을 이용하여 음향신호를 송수신함으로써 표적의 존재 유무를 검출하고, 거리 및 수평/수직 방위의 3차원 정보를 추정한다. 평면센서배열의 소나시스템에서 탐지 성능을 향상시키기 위해서는 고이득의 정밀한 송수신빔들을 형성하는 것이

필수적이다. 최근의 소나시스템에서는 많은 수의 음향센서들을 이용하며 고이득의 수신빔을 형성하며 정밀도에 따라 수신빔들을 형성하기 위한 연산량은 크게 증가하게 된다^[1-2]. 그리고 고이득의 송신빔을 형성하기 위해서는 단일 음향센서가 고출력의 음향신호를 발생시킬 수 있어야 하며, 또한 정밀한 송신빔을 형성하기 위해서는 다수의 센서들에서 발생하는 음향신호를 제어할 수 있는 송신 증폭제어회로가 구현되어야만 한다. 하지만 고출력 송신 증폭제어회로는 구현 시 부피가 크기 때문에, 다수의 음향센서들마다 구현할 경우 회로들이 차지하는 부피는 증가하게 된다. 따라서 평면센서배열을 사용하는 소나시스템에서는 수신빔 형성에 필요한

* 정회원, 국방과학연구소

(Agency for Defense Development)

Ⓞ Corresponding Author(E-mail:crinix@postech.ac.kr)

접수일자: 2012년12월3일, 수정완료일: 2013년4월24일

연산량을 줄이고, 송신빔 형성에 필요한 송신 증폭제어 회로의 수를 줄일 수 있어야만 고이득의 정밀한 송수신 빔을 형성하는 소나시스템을 실제 구현할 수 있다.

평면센서배열의 소나시스템에서 수신빔 형성에 필요한 연산량을 줄이기 위한 연구들 중^[3-5], 2차원 평면센서배열에 대한 빔형성을 수평, 수직방향으로 분리하여 형성하는 기법들이 제안되었다^[4-5]. 그리고 평면배열의 소나시스템에서 송신빔 형성에 사용되는 송신 증폭제어 회로들의 수를 줄이기 위한 연구들도 진행되었다^[6]. 이들은 음향센서들을 수평, 수직방향으로 분리하고 수평 또는 수직의 한 방향의 센서들과 대응되는 회로들을 연결시켜 스테이브 (stave)를 구성한다. 그리고 각 스테이브에 인가되는 전기신호를 제어하여 송신빔을 형성함으로써 송신 증폭제어회로들의 수를 줄여 제한된 부피를 효율적으로 이용한다. 요약하면, 평면배열의 소나시스템에서 송수신빔을 수평, 수직으로 분리하여 형성함으로써 송수신빔을 효율적으로 구현할 수 있게 하는 연구들이 많이 진행되었다.

하지만 위와 같이 송수신빔들을 수평, 수직으로 분리하여 형성하기 위해서는 평면센서배열이 공간상에서 수평, 수직방향으로 분리가 되어야만 한다. 그러나 실제 소나시스템에서 사용되는 평면센서배열은 공간상에서 수평, 수직방향으로 분리가 되지 않는 경우가 일반적이다. 이와 같이 분리가 되지 않는 평면센서배열에 대해 수평, 수직방향으로 분리된 가중치 (weight)를 이용하여 빔을 형성하게 되면 목표로 하는 빔 특성과 차이가 발생할 수밖에 없다.

본 논문에서는 비분리 평면센서배열을 사용하는 소나시스템에서 송수신빔을 수평, 수직방향으로 분리하여 효과적으로 형성하기 위한 분리 가중치 기법 (separable weighting method)을 제안한다. 제안하는 기법은 평면센서배열의 가중치를 구성하는 수평, 수직방향 분리 가중치에 각 방향으로 영향을 미치는 평면센서배열의 센서존재유무를 반영시킴으로써 목표로 하는 수평, 수직방향 가중치가 구현되도록 한다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. II장에서는 소나시스템에서 사용되는 일반적인 평면배열들에 대하여 소개하고, 이 배열들에 기존 분리 수평, 수직 가중치를 이용하여 빔을 형성하는 방법과 그에 따른 문제점을 기술한다. III장에서는 제안하는 기법을 설명하고, IV장에서는 시뮬레이션을 통해 제안하는 기법의 성능을 입증한다. 마지막으로 V장에서는 본 논문의 결론을 맺는다.

II. 기존 소나시스템의 분리 빔형성 기법

1. 소나시스템의 평면센서배열

소나시스템에서는 다양한 형태의 평면센서배열이 사용되나 일반적으로 센서를 배치할 수 있는 영역에 최대한 많은 수의 센서를 배치하여 송수신빔의 이득을 최대

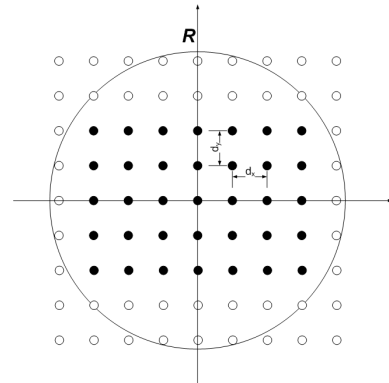


그림 1. 직사각형 영역에 직사각형 격자구조 평면배열
Fig. 1. A planar array with rectangular boundary and rectangular grid.

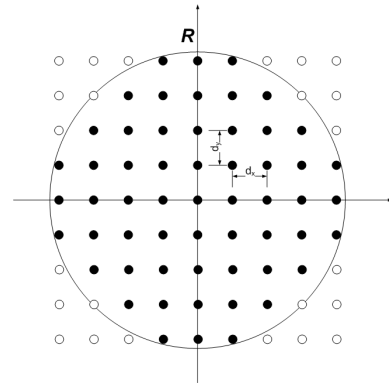


그림 2. 원형 영역에 직사각형 격자구조 평면배열
Fig. 2. A planar array with circular boundary and rectangular grid.

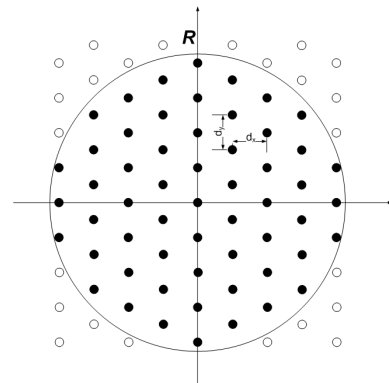


그림 3. 원형 영역에 삼각형 격자구조 평면배열
Fig. 3. A planar array with circular boundary and triangular grid.

화시킨다. 그림 1~3은 소나시스템에서 실제 사용되는 대표적인 평면센서배열들을 나타낸다^[2]. 그림들에서 문자 R 은 실제 센서들을 배치할 수 있는 영역을 나타내며, 일반적으로 영역 R 은 수평에서 소나시스템의 기동에 따른 물의 저항이나 조류의 영향을 최소화하고자 원형 영역(circular boundary)을 가진다. 그리고 그림에서 내부가 채워진 점은 해당 위치에 실제 센서가 존재함을 나타내며, 내부가 비워진 점은 센서가 존재하지 않음을 표현한 것이다. 그림에서 d_x, d_y 는 실제 배치된 센서간의 수평, 수직 방향으로의 거리를 나타내며, 이는 곧 센서 배치 방식인 격자(grid) 구조를 나타낸다.

그림 1의 평면센서배열에서 실제 센서가 배치되는 영역은 직사각형 영역(rectangular boundary)이며, 센서간의 배치 방식은 수평, 수직 방향으로 직사각형 격자(rectangular grid) 구조이다. 그림 2는 센서들을 영역 R 안에 직사각형 격자구조로 배치시킨 평면센서배열로, 그림 1과 비교하여 최대한 많은 수의 센서들을 영역 R 안에 배치시켜 송수신빔의 이득을 최대화시키고자 하였다. 그림 3은 그림 1, 2의 직사각형 격자구조와는 다르게, 센서들을 삼각형 격자(triangular grid) 구조로 영역 R 안에 배치시킨 것이다. 삼각형 격자구조는 동일한 영역 R 안에 센서들을 많이 배치시켜 이득을 향상시킬 수 있을 뿐만 아니라, 센서 간격을 조밀하게 할 수 있어 빔 특성을 향상시킬 수 있다고 알려져 있다. 그림 3의 삼각형 격자는 수직방향으로 센서 간격이 수평방향에 비해 조밀한 경우이다. 그림들에서 실제 존재하는 센서의 개수는 그림 1은 35개, 그림 2와 3은 57개이다.

센서들의 배열과 송수신빔의 특성을 조절하는 가중치(weights)를 정하고 적용하는 방법은 밀접한 연관을 가지며 각 평면센서배열에 수평, 수직 방향으로 분리시켜 가중치를 적용시키는 방법을 살펴본다.

2. 평면센서배열의 수평, 수직 분리 가중치 기법

소나시스템에서 사용하는 평면센서배열에 대해 수평, 수직방향으로 분리하여 가중치를 적용하였을 때의 문제점에 대해 다음의 수식을 이용해 자세히 살펴해보도록 한다. 수직으로 m 개, 수평으로 n 개의 센서배치가 가능한 평면센서배열의 2차원 가중치인 W_{2D} 는 일반적으로 식 (1)과 같이 나타낸다^[2].

$$W_{2D} = \begin{bmatrix} w_{11} & w_{12} & \cdots & w_{1n} \\ w_{12} & w_{22} & \cdots & w_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ w_{m1} & w_{m2} & \cdots & w_{mn} \end{bmatrix} \quad (1)$$

일반적으로 1차원 수평 가중치를 W_H 이라 하고 1차원 수직 가중치를 W_V 라고 식 (2), (3)과 같이 정의하였을 때,

$$W_H = [h_1 \ h_2 \ \cdots \ h_n] \quad (2)$$

$$W_V = [v_1 \ v_2 \ \cdots \ v_m]^T \quad (3)$$

평면센서배열의 2차원 가중치 W_{2D} 가 식 (4)와 같이 1차원 가중치인 W_H 과 W_V 의 행렬 곱으로 표현되면 가중치 W_{2D} 는 분리 가능(separable)하다고 한다.

$$W_{2D} = W_V W_H \quad (4)$$

이때 평면배열센서의 가중치가 분리 가능하기 위해서는 그림 1과 같이 직사각형 영역에 직사각형 격자로 센서가 배치된 경우에만 가능하다. 다시 말해, 센서들이 직사각형 영역에 직사각형 격자로 실제로 모두 존재하여야만 센서들이 수평, 수직방향으로 분리가 가능해지고, 평면센서배열의 가중치인 W_{2D} 가 수평, 수직 가중치인 W_H, W_V 의 곱과 동일하다. 예로 그림 2와 같이 직사각형 격자로 센서가 배치되어 있다하더라도, 센서가 존재하는 영역이 직사각형이 아닌 원형일 경우 식 (4)의 경우와 같이 가중치가 분리되지 않는다. 또한 센서가 그림 3과 같이 삼각형 격자로 배치될 경우 수직으로 센서가 존재하지 않는 위치에 의해 평면가중치가 식 (4)와 같이 분리되지 않는다. 그림 2, 3과 같이 수평, 수직으로 분리되지 않는 센서배열에 대해 1차원 수평, 수직 가중치의 곱으로 평면센서배열의 가중치를 구할 경우 센서 존재 유무에 따라 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} W_{2D} &= S_{2D} \otimes (W_V W_H) \\ &= \begin{bmatrix} s_{11} & s_{12} & \cdots & s_{1n} \\ s_{21} & s_{22} & \cdots & s_{2n} \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{m1} & s_{m2} & \cdots & s_{mn} \end{bmatrix} \otimes \left(\begin{bmatrix} v_1 \\ v_2 \\ \vdots \\ v_m \end{bmatrix} [h_1 \ h_2 \ \cdots \ h_n] \right) \\ &= \begin{bmatrix} s_{11}v_1h_1 & s_{12}v_1h_2 & \cdots & s_{1n}v_1h_n \\ s_{21}v_2h_1 & s_{22}v_2h_2 & \cdots & s_{2n}v_2h_n \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots \\ s_{m1}v_mh_1 & s_{m2}v_mh_2 & \cdots & s_{mn}v_mh_n \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (5)$$

위 식에서 연산기호 \otimes 는 Hadamard product를 나타내며, 행렬 S_{2D} 는 m 행 n 열의 2차원 행렬로 평면센서 배열에서 각 위치에서의 센서의 존재 유무를 나타낸다. 행렬 S_{2D} 의 값인 s_{ij} 는 센서가 존재하면 '1'이고 존재하지 않으면 '0'의 값을 가진다. 식 (5)의 s_{ij} 가 모두 '1'이면 식 (5)는 식 (4)와 동일하게 된다. 따라서 식 (5)는 평면센서배열의 가중치를 나타내는 일반적인 식이다.

식 (5)로부터 평면센서배열의 가중치에 따른 실제 수평, 수직 방향으로의 구현된 가중치를 구하면 다음과 같다. 먼저 수평 방향으로의 실제 구현된 가중치를 구하기 위해 식 (5)의 행렬을 수평방향으로 투영(projection)한 행렬인 W_H^P 을 구하면 다음과 같다.

$$W_H^P = [v_1^P h_1 \ v_2^P h_2 \ \dots \ v_n^P h_n], \quad (6)$$

$$\text{where } v_i^P = \sum_{k=1}^m s_{ki} v_k$$

여기서 수평방향으로 투영함은 2차원 행렬의 수직 방향으로 더함을 의미한다. 이때 각 행렬 값인 $v_i^P h_i$ 의 비(ratio)가 평면센서배열의 가중치에 의해 실제 구현된 수평방향으로의 가중치가 된다. 만약에 s_{ij} 가 모두 '1'이면 v_i^P 의 값이 모두 같게 되어 식 (6)의 각 행렬 값의 비와 식 (2)의 행렬 값의 비가 동일하며, 이는 1차원 수평 가중치와 동일하게 평면센서배열의 실제 수평 가중치가 구현됨을 나타낸다. 하지만 s_{ij} 가 모두 '1'이 아니면 평면센서배열을 구성하기 위해 적용한 1차원 수평 가중치와 평면센서배열의 실제 수평 가중치는 같지 않음을 알 수 있다. 수평방향과 동일하게 식 (6)의 행렬을 수직방향으로 투영한 1차원 행렬인 W_V^P 을 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$W_V^P = [h_1^P v_1 \ h_2^P v_2 \ \dots \ h_m^P v_m]^T, \quad (7)$$

$$\text{where } h_j^P = \sum_{l=1}^m s_{lj} h_l$$

이때 수직방향으로의 투영은 2차원 행렬의 수평 방향으로 더함을 의미하며, 행렬 값인 $h_j^P v_j$ 끼리의 비가 곧 수직방향으로의 가중치가 된다.

III. 유효센서수를 반영하는 분리 가중치 기법

II장에서 기술한 바와 같이 분리된 수평, 수직 가중치를 이용하여 평면센서배열의 가중치를 구현하였을 때,

그림 1과 같이 직사각형 영역에 직사각형 격자로 센서가 배열되어 수평, 수직으로 분리가 가능한 평면센서배열에서만 적용한 1차원 수평, 수직 가중치와 실제 수평, 수직 가중치가 동일하게 나타난다. 그림 2, 3과 같이 수평, 수직으로 분리가 가능하지 않은 평면센서배열에 대하여 수평, 수직 분리 가중치를 적용하면 실제 구현된 수평, 수직 가중치와는 차이가 발생된다. 따라서 분리가 되지 않는 평면센서배열에 수평, 수직 분리 가중치를 효과적으로 적용하기 위해서는 이 차이를 줄이기 위한 기법이 필요하며, 이 과정을 수식들을 이용하여 자세히 살펴해보도록 한다.

평면센서배열의 가중치를 구현하는 분리된 수평, 수직 가중치를 W_H^I , W_V^I 라 하였을 때, 평면센서배열의 가중치인 W_{2D}^I 는 식 (5)에서 W_H , W_V 대신에 W_H^I , W_V^I 를 대입한 식 (8)과 같이 나타난다.

$$W_{2D}^I = S_{2D} \otimes (W_V^I W_H^I) \quad (8)$$

또한 W_{2D}^I 에 의해 결과로 나타나는 수평, 수직 방향으로 투영한 행렬을 각각 W_H^P , W_V^P 라 한다. 목표로 하는 수평, 수직 방향의 가중치를 각각 W_H^O , W_V^O 라 하였을 때, 각각 행렬 W_H^P , W_V^P 과의 오차 $\|e_H\|^2$, $\|e_V\|^2$ 는 다음 식들과 같이 정의된다.

$$\|e_H\|^2 = \|W_H^O - \rho_H W_H^P\|^2 \quad (9)$$

$$\|e_V\|^2 = \|W_V^O - \rho_V W_V^P\|^2 \quad (10)$$

위의 연산 $\|\cdot\|^2$ 는 임의의 1차원 행렬 e 의 행렬 값 e_i 에 대해 다음과 같이 정의되며,

$$\|e\|^2 = \sum_{i=1}^n e_i^2 \quad (11)$$

식 (9)와 (10)에서 ρ_H , ρ_V 는 두 1차원 행렬의 차이를 비교하기 위해 크기를 맞춰주기 위한 상수이다. 상수 ρ_H 는 두 행렬 W_H^O 와 W_H^P 의 각 행렬 값들의 합이 동일하도록 식 (12)와 같이 정의하며, ρ_V 는 두 행렬 W_V^O 와 W_V^P 의 행렬 값들의 합이 동일하도록 식 (13)와 같이 정의한다.

$$\rho_H = \frac{\sum_{i=1}^n \{W_H^O(i)\}}{\sum_{i=1}^n \{W_H^P(i)\}} \quad (12)$$

$$\rho_V = \frac{\sum_{j=1}^m \{W_H^O(j)\}}{\sum_{j=1}^m \{W_H^P(j)\}} \quad (13)$$

평면센서배열의 2차원 가중치를 수평, 수직으로 분리하여 구현하였을 때, 목표로 하는 2차원 가중치와 실제 구현된 가중치와의 오차를 e_{2D} 라고 한다. 2차원 가중치 오차인 e_{2D} 는 수평, 수직 방향으로 분리하여 구현된 가중치에 대한 오차로, 각 수평, 수직 방향으로의 오차들을 합하는 것이 타당하며, 다음 식과 같이 정의된다.

$$e_{2D} = \|e_H\|^2 + \|e_V\|^2 \quad (14)$$

정의된 식들을 바탕으로 분리된 수평, 수직 가중치인 W_H^I , W_V^I 를 이용하여 평면센서배열의 가중치인 W_{2D}^I 를 구현하였을 때, 가중치 오차 e_{2D} 가 최소가 되도록 W_H^I , W_V^I 를 결정하면 목표로 하는 수평, 수직 가중치를 효과적으로 구현한 것으로 판단할 수 있다.

평면센서배열 가중치의 실제 수평, 수직 가중치를 나타내는 식 (6)과 (7)을 살펴보면, 센서 존재 유무를 나타내는 s_{ij} 에 따라 수평, 수직 가중치가 서로 영향을 주어 목표 가중치들과 차이가 발생된다. 따라서 센서 존재 유무인 s_{ij} 에 따른 영향을 최소화시키도록 분리된 수평, 수직 가중치를 정하여야 한다. 이를 위해 본 논문에서는 분리된 수평, 수직 가중치에 실제 센서 존재 유무를 반영하는 기법을 제안한다.

평면센서배열의 가중치로부터 수평, 수직 방향으로 구현되는 목표 가중치인 W_H^O , W_V^O 를 다음과 같이 정의한다.

$$W_H^O = [h_1^o h_2^o \dots h_n^o] \quad (15)$$

$$W_V^O = [v_1^o v_2^o \dots v_m^o]^T \quad (16)$$

그리고 평면센서배열의 센서 존재 유무를 나타내는 식 (5)의 2차원 행렬 S_{2D} 에서 i 번째 행에서 열 방향으로 실제 존재하는 센서들의 수를 더한 값을 N_{vi} 라고 하고 j 번째 열에서 행 방향으로 실제 존재하는 센서들의 수를 더한 값을 N_{hj} 라고 하면, N_{vi} 와 N_{hj} 는 식 (17), (18)과 같이 나타난다.

$$N_{vi} = \sum_{j=1}^n s_{ij} \quad (17)$$

$$N_{hj} = \sum_{i=1}^m s_{ij} \quad (18)$$

따라서 N_{vi} 와 N_{hj} 는 평면센서배열에서 수평, 수직 방향으로 센서 존재 유무에 따라 가중치에 영향을 주는 유효센서수를 의미한다. II장에서 설명한 바와 같이, 비분리 평면센서배열에 대해 수평, 수직으로 분리하여 가중치를 적용할 경우 센서 존재 유무에 따라 실제 구현되는 가중치와 목표로 하는 가중치가 다르게 된다. 수평, 수직으로 분리하여 가중치를 적용하는 경우에서 각 수평, 수직 방향으로 센서 존재 유무가 영향을 주는 것이 수평, 수직 방향 유효센서수인 N_{vi} 와 N_{hj} 이며, 이 유효센서수의 변화에 따라 각 수평, 수직 방향의 영향을 균일하게 하거나 최소화시켜야 한다. 이를 위해 각 유효센서수와 목표 가중치인 W_H^O , W_V^O 를 이용하여 분리된 수평, 수직 가중치인 W_H^I , W_V^I 를 다음 식들을 이용하여 구한다.

$$W_H^I = [h_1^o / (N_{h_1})^{\alpha_h} h_2^o / (N_{h_2})^{\alpha_h} \dots h_n^o / (N_{h_n})^{\alpha_h}] \quad (19)$$

$$W_V^I = [v_1^o / (N_{v_1})^{\alpha_v} v_2^o / (N_{v_2})^{\alpha_v} \dots v_m^o / (N_{v_m})^{\alpha_v}]^T \quad (20)$$

여기서 변수 α_h 와 α_v 는 각 수평, 수직 방향으로 유효센서수가 가중치에 반영되는 정도를 조절하는 변수로, 식 (8)을 통해 구한 평면센서배열의 가중치에 대해 2차원 가중치 오차인 e_{2D} 최소화되도록 한다. 만약 변수 α_h 와 α_v 가 '0'이면 유효센서수가 반영이 되지 않는 기존의 분리 가중치 기법과 동일하다.

요약하면, 본 논문에서 제안하는 분리된 수평, 수직 가중치를 적용하는 기법은 평면센서배열의 수평, 수직으로 영향을 미치는 유효센서수를 구해 분리된 수평, 수직 가중치에 반영시킨다. 유효센서수를 반영하는 정도는 구현되는 평면센서배열의 수평, 수직 방향으로 구현된 가중치와 목표로 하는 수평, 수직 가중치와의 오차 합이 최소화되도록 한다.

IV. 모의 실험 결과

이 장에서는 제안하는 기법의 성능을 확인하기 위해 모의 전산 실험을 수행한 결과에 대해 설명한다. 모의 전산 실험은 그림 1~3들 중에서 수평, 수직으로 분리가 가장 되지 않는 평면센서배열인 그림 3의 삼각형 격

| | | | | | | | | |
|---|---|---|---|---|---|---|---|---|
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 |
| 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 |
| 0 | 0 | 0 | 0 | 1 | 0 | 0 | 0 | 0 |

그림 4. 모의 실험 평면센서배열에 대한 행렬 S_{2D}
Fig. 4. The matrix, S_{2D} , of the planar array used in simulation.

자구조의 평면센서배열에 대해 수행하였으며, 센서 간격인 d_x 와 d_y 는 d 로 동일하며 원형 영역 R 의 지름은 $9d$ 가 되도록 하였다. 그림 4는 그림 3의 평면센서배열에 대해 수평, 수직으로 구분되는 센서들의 존재 유무를 나타내는 S_{2D} 를 나타낸 것으로 17행 9열의 2차원 행렬의 형태를 가진다.

모의 전산 실험을 통해 비분리 평면센서배열에서 분리 가중치를 적용하였을 경우의 유효센서수의 영향을 살펴본다. 이를 위해 빔 폭을 가장 작게 하기 위해 적용하는 균일 가중치와 부엽 준위를 조절하기 위해 일반적으로 사용하는 Dolph-Chebyshev 가중치를 적용한 실험 결과를 제시하였다. 또한 제안하는 기법의 수평, 수직 가중치들의 분리 특성을 확인하기 위해 수직방향으로 가중치를 고정하였을 때 수평 방향의 가중치를 변화에 따른 영향을 확인하는 실험을 수행하였다.

1. 모의 실험 결과 : 균일 가중치

균일 가중치는 비분리 평면센서배열에 대해 수평, 수직 분리 가중치를 적용하였을 경우의 센서 존재 유무에 따른 유효센서수의 영향을 확인하고 제안하는 기법의 성능을 검증하기 위한 좋은 예이다. 그림 5는 수평, 수직 방향으로의 유효센서수의 영향을 반영하는 변수들인 α_h 와 α_v 를 변화시키면서 구한 식 (14)의 가중치 오차 합인 e_{2D} 를 dB 스케일로 나타낸 것으로, α_h 와 α_v 가 각각 0.994와 1.126일 때 최소로 0.92dB이다. 유효센서수를 반영하지 않는 기존 방법의 경우 오차 합은 5.05dB로, 제안하는 기법을 통해 수평, 수직 분리 가중치를 적용하였을 때 오차 합이 작음을 알 수 있다.

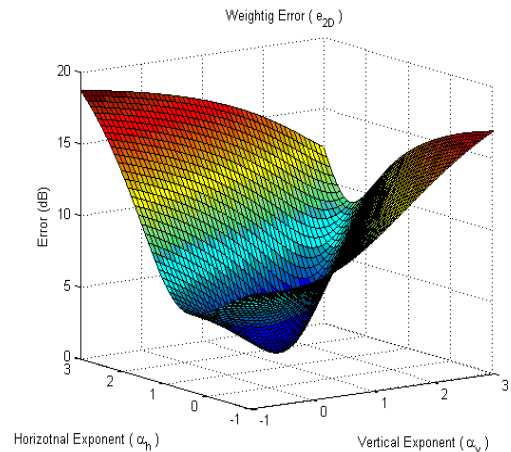
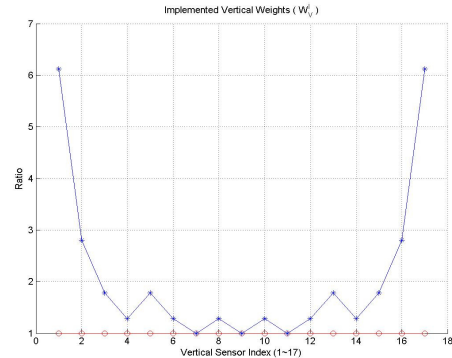
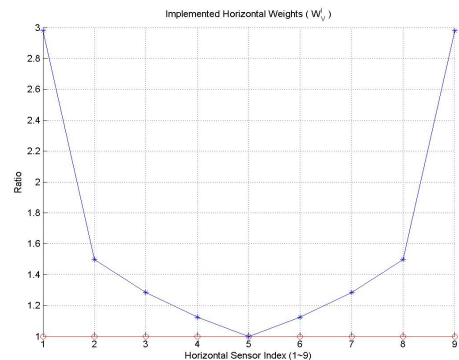


그림 5. 균일 가중치에 대한 e_{2D} 결과
Fig. 5. The plot of e_{2D} in uniform weighting.



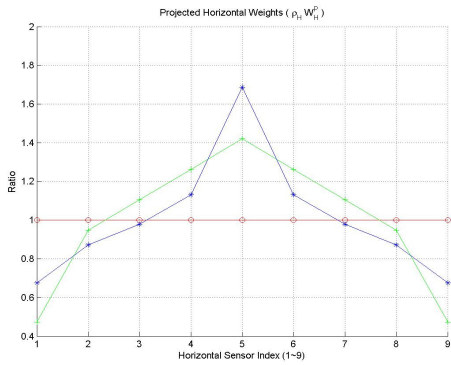
(a) 수평 구현 가중치



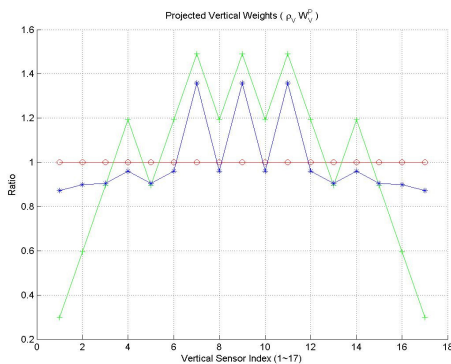
(b) 수직 구현 가중치

그림 6. 균일 가중치에 대한 수평, 수직 구현 가중치
Fig. 6. The horizontal and vertical implemented weights in uniform weighting.

그림 6은 평면센서배열의 가중치를 구현하는 수평, 수직 가중치인 W_H^T , W_V^T 를 나타낸 것으로, 빨간색은 기존의 수평, 수직 가중치를 나타내며 파란색은 제안하는 기법에 의해 구한 가중치이다. 이 때 각 가중치의 중간 가중치 값을 '1'로 하여 다른 가중치 값들의 크기를



(a) 수평 결과 가중치



(b) 수직 결과 가중치

그림 7. 균일 가중치에 대한 평면센서배열의 수평, 수직 결과 가중치

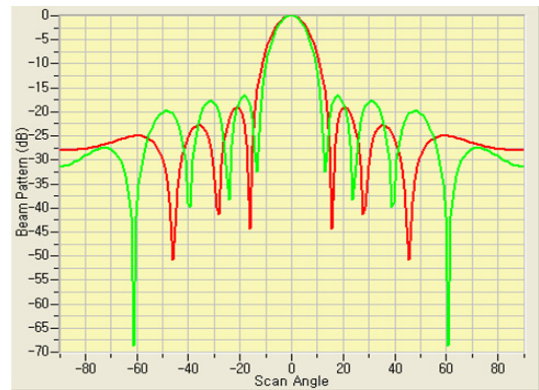
Fig. 7. The horizontal and vertical resulting weights of the planar array in uniform weighting.

조정하여 비교하기 쉽게 나타내었다.

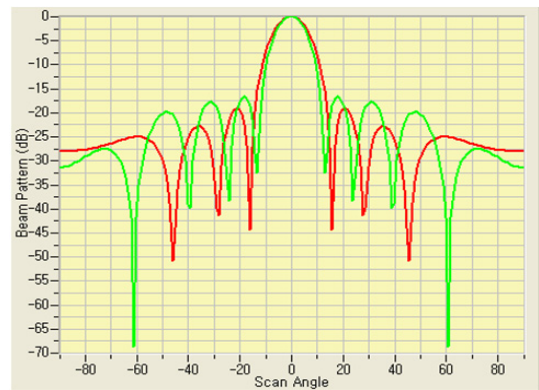
그림 6에서 보는 바와 같이 균일 가중치의 경우 제안하는 기법의 가중치는 유효센서수의 역수 형태로 변화함을 알 수 있다.

그림 7은 분리된 수평, 수직 가중치인 W_H^I , W_V^I 를 통해 구현된 평면센서배열의 수평, 수직 분리 가중치에 대해 가중치 합이 동일해지도록 크기를 조절한 $\rho_H W_H^P$, $\rho_V W_V^P$ 를 나타낸 것이다. 그림 7에서 빨간 색은 목표로 하는 가중치를 나타내며, 녹색은 기존 방법에 의해 결과로 나타난 가중치, 파란색은 제안하는 기법에 의해 가중치 결과이다. 결과를 살펴보면 제안하는 기법에 따른 가중치가 기존 방법에 비해 목표로 하는 가중치에 유사하게 나타난다.

그림 8은 과장이 센서 간격의 반이 되는 음향신호에 대해 각 가중치에 의해 형성되는 수평, 수직 빔패턴 (beam pattern)을 나타낸 것이다. 빨간색은 기존 방법의 가중치를 적용한 결과이며 녹색은 제안하는 기법의 가



(a) 수평 빔패턴



(b) 수직 빔패턴

그림 8. 균일 가중치에 대한 수평, 수직 빔패턴

Fig. 8. The horizontal and vertical beam pattern in uniform weighting.

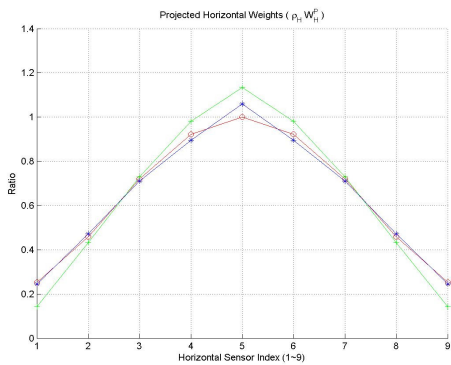
중치를 적용한 결과이다. 기존 방법과 제안하는 기법에 의한 수평방향 3dB 빔폭은 각각 12.09°, 11.58°이며 수직 방향으로서는 12.96°, 11.29°이다.

제안하는 기법에 의한 결과에서 빔폭은 줄지만 부엽준위(sidelobe level)는 증가한다. 이는 균일 가중치가 가지는 특성으로, 제안하는 기법이 더 충실하게 목표로 하는 균일 가중치를 구현함을 나타낸다. 또한 수평 빔패턴보다 수직 빔패턴이 목표로 하는 빔 특성에 더 가깝게 나타나며, 이는 수직으로 더 조밀한 센서 간격을 가지는 삼각격자 평면센서배열의 특성 때문이다^[2].

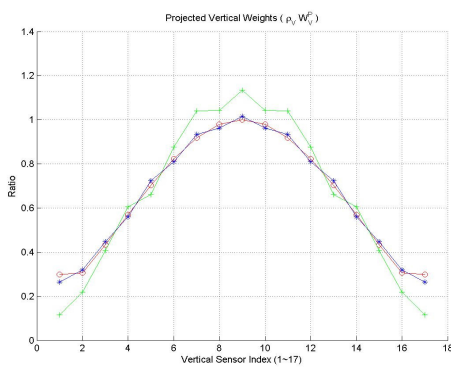
2. 모의 실험 결과 : Dolph-Chebyshev 가중치

부엽준위가 -30dB가 되는 Dolph-Chebyshev 가중치를 적용할 경우, e_{2D} 를 최소로 하는 α_h 와 α_v 는 각각 0.914와 0.808이며 최소값은 -19.55dB이다. 기존 방법의 경우 오차 합은 -6.94dB로, 제안하는 기법의 가중치 오차 합이 작음을 알 수 있다.

그림 9는 구현된 평면센서배열의 실제 수평, 수직 가



(a) 수평 결과 가중치



(b) 수직 결과 가중치

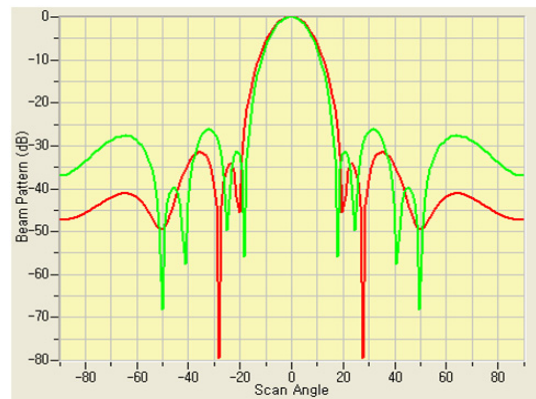
그림 9. Dolph-Chebyshev 가중치에 대한 수평, 수직 결과 가중치

Fig. 9. The horizontal and vertical implemented weights in Dolph-Chebyshev weighting.

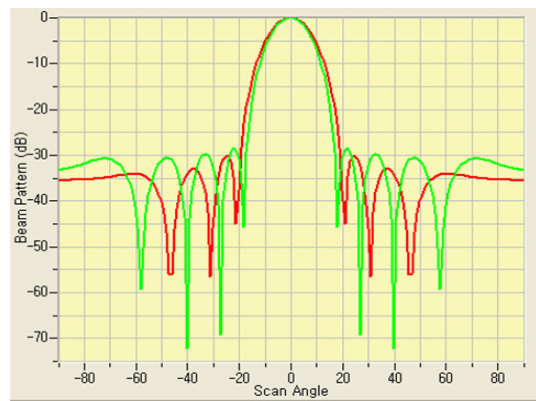
중치에 대한 $\rho_H W_H^P$, $\rho_V W_V^P$ 를 나타낸 것이다. 그림 9에서 빨간 색은 목표로 하는 가중치를 나타내며, 녹색은 기존 방법에 따른 가중치 결과이며, 파란색은 제안하는 기법에 의한 가중치 결과이다. 그림에서 나타난 것과 같이 제안하는 기법에 따른 가중치가 기존 방법에 비해 목표로 하는 가중치에 유사하게 나타난다.

그림 10은 수평, 수직 빔패턴을 나타낸 것으로, 빨간 색은 기존 방법의 가중치를 적용한 결과이며 녹색은 제안하는 기법의 가중치를 적용한 결과이다. 기존 방법과 제안기법에 의한 수평방향 3dB 빔폭은 각각 14.29°, 13.08°이며 수직방향으로는 14.91°, 13.54°이다. 제안하는 기법에 의해 빔폭이 향상되고 부엽준위가 더 일정하게 유지된다. 이는 제안하는 기법이 더 충실하게 목표로 하는 Dolph-Chebyshev 가중치를 구현함을 나타낸다.

3. 모의 실험 결과 : 수평, 수직 가중치의 분리 특성 제안하는 기법에 의해 구현된 수평, 수직 가중치들이 서로 영향을 주는 특성을 확인하기 위해 수직방향으로



(a) 수평 빔패턴



(b) 수직 빔패턴

그림 10. Dolph-Chebyshev 가중치에 대한 수평, 수직 빔패턴

Fig. 10. The horizontal and vertical beam pattern in Dolph-Chebyshev weighting.

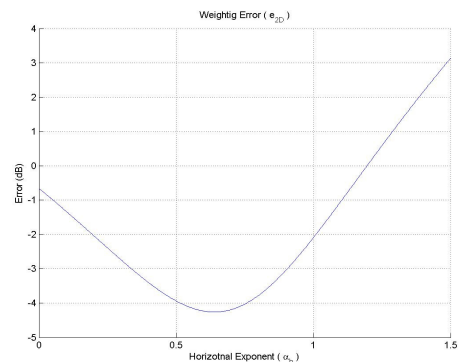
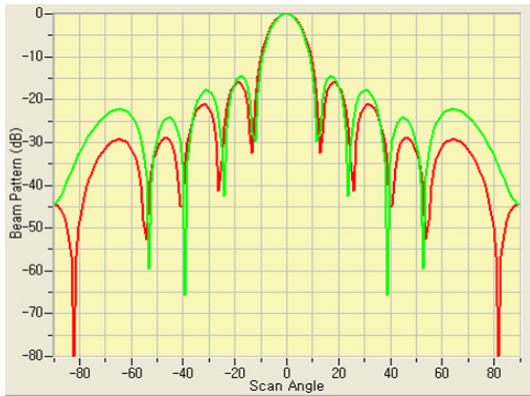


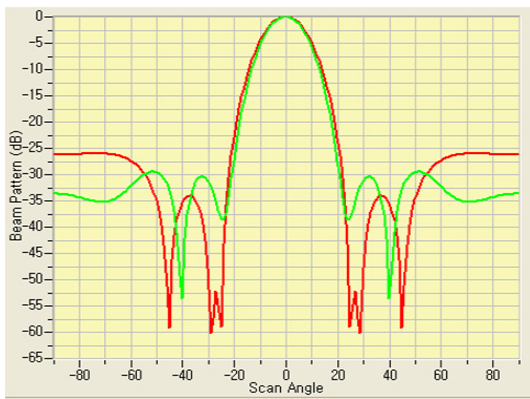
그림 11. 수직 고정 가중치에 대한 e_{2D} 결과

Fig. 11. The plot of e_{2D} in fixed vertical weighting.

가중치를 고정시키고 수평방향으로 가중치를 변화시킬 때의 가중치 오차 합과 빔패턴을 살펴본다. 수직방향으로 부엽준위가 -30dB가 되는 Dolph-Chebyshev 가중치를 고정하여 적용할 경우로, 이전 모의 실험 결과로부터 α_v 는 0.808로 고정된 값을 사용한다. 수직 가중치를 고정시키고 수평방향으로 목표로 하는 가중치가 균일 가중치



(a) 수평 빔패턴



(b) 수직 빔패턴

그림 12. 수직 고정 가중치에 대한 수평, 수직 빔패턴
Fig. 12. The horizontal and vertical beam pattern in fixed vertical weighting.

라고 할 때, 그림 11은 α_h 를 변화시키며 구한 가중치 오차 합인 e_{2D} 를 나타낸 것이다. 가중치 오차 합의 최소화는 α_h 가 0.639일 때 -4.26dB로, 기존 방법의 오차 합인 -0.40dB보다 제안하는 기법의 경우가 더 작다.

그림 12는 평면센서배열에 대한 수평, 수직 빔패턴을 나타낸 것이다. 빨간색은 기존 방법의 가중치를 적용한 결과이며 녹색은 제안하는 기법의 가중치를 적용한 결과이다.

그림 12에서 기존 방법과 제안하는 기법에 의한 수평 방향 3dB 빔폭은 각각 11.31°, 10.70°이며, 수직방향으로는 15.97°, 14.73°이다. 결과에서 보는 것과 같이, 제안하는 기법에 의해 빔폭이 수평방향으로 균일 가중치를, 그리고 수직방향으로 Dolph-Chebyshev 가중치 결과를 효과적으로 구현함을 알 수 있다. 이는 제안하는 기법을 통해 수평, 수직 방향으로 분리하여 빔을 형성하는 경우가, 각 방향에 대해 서로 미치는 영향이 적음을 나타낸다.

V. 결 론

본 논문에서는 비분리 평면센서배열에 대해 효과적으로 수평, 수직 방향으로 가중치를 분리하여 구현하여 빔을 형성하기 위한 기법을 제안하였다. 제안한 기법에서는 평면센서배열의 수평, 수직으로 영향을 미치는 유효센서수를 분리된 수평, 수직 가중치에 반영시켜 목표로 하는 수평, 수직 가중치와 비교하여 오차 합이 최소화되도록 하였다. 모의 전산 실험을 통해, 제안한 기법이 비분리 평면센서배열에 기존의 수평, 수직 분리 가중치 방법에 비해 목표로 하는 빔 성능에 가까운 결과를 나타냄을 확인하였다. 따라서 제안하는 기법을 통해 소나시스템의 송수신빔을 수평, 수직으로 분리하여 형성한다면, 정밀한 송수신 빔형성을 요구하는 소나시스템의 구현을 용이하게 할 수 있을 것으로 기대한다.

참 고 문 헌

- [1] W. S. Burdic, *Underwater acoustics system analysis*, Peninsula Publishing, 2002.
- [2] H. L. Van Trees, *Optimum Array Processing*, John Wiley & Sons, 2002.
- [3] S. W. Smith, H. G. Pavy, O. T. on Ram, "High-speed ultrasound volumetric imaging system," *IEEE Trans. on Ultrason. Ferroelectr. and Freq. Control*, Vol. 38, No. 2, pp. 100-108, July 1991.
- [4] G. E. Allen, B. L. Evans, "Real-Time Sonar Beamforming on Workstations Using Process Networks and POSIX Threads", *IEEE Trans. on Signal Processing*, Vol. 48, No. 3, pp. 921-926, March 2000.
- [5] K. Owen, M. I. Fuller, J. H. Hossack, "Application of X-Y Separable 2-D Array Beamforming for Increased Frame Rate and Energy Efficiency in Handheld Devices ," *IEEE Trans. on Ultrason. Ferroelectr. and Freq. Control*, Vol. 59, No. 7, pp. 1332-1343, July 2012.
- [6] B. J. Savord, "Beamforming methods and apparatus for three-dimensional ultrasound imaging using two-dimensional transducer array," U.S. Patent 6013032, Jan. 11, 2000.

저 자 소 개



도 대 원(정회원)
1996년 포항공과대학교 전자전기
공학과 학사 졸업.
1998년 포항공과대학교 전자전기
공학과 석사 졸업.
2003년 포항공과대학교 전자전기
공학과 박사 졸업.

2003년 LG전자기술원 모바일멀티미디어연구소
선임연구원.
2007년~현재 국방과학연구소 선임연구원.
<주관심분야 : 통신 신호처리, 멀티미디어 신호처
리, 레이더 및 소나시스템>



김 형 문(정회원)
2000년 창원대학교 전기공학과
학사 졸업.
2002년 창원대학교 전기전자제어
공학과 석사 졸업.
2002년 한국항공우주산업(주)
UAV개발팀/T-50 비행제
어팀 선임연구원

2006년~현재 국방과학연구소 선임연구원.
<주관심분야 : 시스템 설계, 소나시스템>



김 우 식(정회원)
1991년 한국외국어대학교
물리학과 학사 졸업.
1993년 한국외국어대학교
물리학과 석사 졸업.
2004년 한국해양대학교
해양공학과 박사졸업

1993년~현재 국방과학연구소 책임연구원.
<주관심분야 : 수중음향, 음향 신호처리, 소나시
스템>



최 상 문(정회원)
1983년 한양대학교 자원공학과
학사 졸업.
1985년 한양대학교 자원공학과
석사 졸업.
1995년 Texas A&M대학교
지구물리학과 박사 졸업.

1995년~현재 국방과학연구소 책임연구원.
<주관심분야 : 수중음향, 음향 신호처리, 소나시
스템>



이 동 훈(정회원)
1994년 경북대학교 전자전기
공학과 학사 졸업.
1996년 경북대학교 전자전기
공학과 석사 졸업.
1996년~현재 국방과학연구소
선임연구원.

<주관심분야 : 통신 신호처리, 멀티미디어 시스
템, 소나시스템>