1999년도 한국음향학회 학술발표대회 논문집 제18권 제1(s)호

소자간 상호 간섭이 존재하는 환경에서 평면 배열 빔 설계 기법의 최적화

The optimization of the beam pattern design considering the mutual coupling effects in planar arrays

송준일, 전병두*, 임준석**, 성굉모
서울대학교 전기공학부, *LG 정밀 ㈜, **세종대학교 전자공학과

Joon-il Song, Byung-Doo Jun*, Jun-seok Lim**, Koeng-Mo Sung
School of Electrical Eng., Seoul Natl. Univ., *LG Precision, **Dept. of Electrical Eng., Sejong Univ.

junili@acoustics.snu.ac.kr

본 연구는 '수중음향특화연구센터'의 지원으로 이루어졌습니다.

요 약

평면 배열에서 원하는 빔패턴을 얻고자 할 때 각각의 소자들의 자체 방사특성에 의해 다른 소자가 영향을 받게 된다. 보통 이러한 영향은 빔패턴의 변화를 가져올 뿐만 아니라 소자의 성능을 저하시키게 된다. 이러한 간섭을 줄이기 위해서 배열 형태를 바꾸는 등의 구조적인 개선은 많이 시도 되어 왔다. 그러나 이러한 개선을 통하여 영향을 줄일 수는 있으나 보다 더 정확하게 원하는 사양의 빔을 설계하기 위해서는 최적화 기법을 통하여 이러한 영향을 보상해 주어야 한다. 본 논문에서는 빔을 설계할 때 상호 간섭 영향을 포함 시킨 빔 설계 알고리듬을 소개한다. 이 알고리듬은 선형 최소자승법의 해를 기반으로 최적화를 수행하고 상호 간섭의 영향은 coupling coefficients matrix를 도입하였다 [4]. 이러한 방법으로 빔을 설계하게 되면 소자의 위치 등을 변화시키지 않으면서 원하는 사양의 빔을 설계 할 수 있게 된다.

1. 서 론

수중 음향 탐지 시스템에서 빔 형성기는 센서배열로 입사하는 음향신호를 공간 필터링하여 특정 방향으로부터 들어오는 원하는 신호를 수신하거나 공간상의 원하는 방향으로 빔을 조향하여 송신하는데 이용된다. 이러한 시스템에서 원하는 방향으로 빔을 집속시키면서 오탐지를 유발하는 부엽준위의 크기를 최대한 억제하게 되면 빔의 탐지성능을 최적화 할 수 있게 된다. 일반적으로 여러 개의 소자를 선형 또는 평면적으로 배열하여 빔을 형성하는 시스템에서의 최적 빔의 설계 문제는 각 소자에 주어지는 가중치의 최적화 문제로 연결된다. 각 소자의 가중치를 조절하여 원하는 사양의 빔을 생성하는 문제는 현재까지 많은 연구자들에 의하여 연구되어 왔으며 많은 결과들이 제공 되어 왔다. 이 중 Dolph-Chebyshev 기법은 소자들이 등간격으로 위치한 선형 배열에서 Dolph-Chebyshev 다항식으로부터 얻어지는 가중치를 이용하여 주엽(main lobe) 이외의 부엽준위(side lobe level)를 일정하게 유지하면서 가장 좁은 빔폭을 구현할 수 있어서 많이 응용되고 있다 [1]. 그러나, 위에서 언급한 방법은 배열의 모양과 소자의 특성이 확정된 후에만 가중치를 구할 수 있으며, 배열의 변화나 오차가 발생하였을 때는 가중치를 처음부터 다시 설계하거나 인위적으로 가중치를 변화 시켜야만 하는 단점이 있다. 이러한 경우에 대응하는 방법 중 하나로 Tseng 등은 1차원 배열에 대해서 소자의 배열이 확정되었을 때 원하는 사양의 빔을 설계할 수 있는 반복 알고리듬을 발표하였다 [2]. 이 알고리듬은 빔의 최적화 하는데 있어서 선형 최소자승법을 기반으로 하여 가중치를 반복적으로 갱신하게 된다. 또한 최적의 빔을 실제적으로 설계하는데 있어서 반드시 고려해야 하는 요인으로 각 소자간 간섭이 있다. 이 현상은 각 소자들의 자체 방사 특성으로 인해 다른 소자들이 영향을 받게 되는 것인데 최근 들어 2차원 또는 그 이상의 배열을

사용하거나 많은 개수의 소자를 사용하게 되는 경우에 전체 빔 패턴에 영향을 줄 뿐만 아니라 물리적으로 손상을 입힐 수도 있게 된다. 이 문제 또한 여러 가지 관점에서 해결 방안이 연구되어 왔다. 그 중에서 한 가지 방법으로는 사용하는 주파수 영역에서 간섭 영향이 가장 적게 나타나도록 소자간 간격을 조절하는 방법이다 [3]. 그러나 이 방법은 소자를 다시 배열하여야 하는 문제를 가지며, 또한 간섭 영향을 최소한으로 줄일 뿐, 이 영향을 제거하지 못하게 된다. 따라서 본 논문에서는 평면 배열에 대해 최적의 가중치를 구하는 알고리듬 내부에 간섭영향을 포함시켜서 결과적으로 얻은 가중치를 사용하게 되면 간섭이 존재하는 상황에서 원하는 사양의 빔 패턴을 얻을 수 있도록 하였다.

2. 제안하는 빔 최적화 알고리듬

일반적으로 N 개의 센서로 구성된 음향변환부가 선형으로 배열되어 있을 때, 어느 특정한 각도(θ)에 대한 응답은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$s(\theta) = w^T v(\theta) \tag{1}$$

이 때 w는 각 소자들의 가중치를 벡터로 나타낸 것이고, v는 방향에 대한 조향 벡터(steering vector)이다. 식 (1)과 같이 주어지는 응답에서 설계 사양에 최대한 근접하도록 가중치 벡터를 정하는 것이 빔 설계의 최종 목표가 된다. 여기서 소자간 간섭 영향을 포함 시키기 위해서 각 소자로부터 발생된 특성이 다른 소자에 전달되는 것을 하나의 행렬로 나타낼 수 있는데 이것을 coupling coefficient matrix(M)라고 한다. 이 행렬을 포함한 새로운 응답은 다음과 같이 표현 가능하다.

$$s(\theta) = w^T \mathbf{M} v(\theta) \tag{2}$$

위와 같은 응답을 가지는 경우에 대해, 대부분의 경우 주빔에 대한 부엽준위의 크기를 원하는 수준으로 또는 그 이하로 유지하는 것이 중요한 부분이 된다. 이것을 달성하는 방법 중 하나로 선형 최소 자승법을 통해 오차를 줄여나가는 반복 알고리듬을 생각할 수 있다 [2].

본 논문에서는 기본적으로 이 선형 최소자승법을 이용한 빔 설계 기법을 이용하여 2차원 평면 배열에 대해 적용할 수 있도록 개선하는 동시에 소자간 간섭영향을 제거 할 수 있도록 하였다. 다음장의 표 1.은 기본적으로 선형 최소자승법을 통한 알고리듬의 진행과 제안 하는 알고리듬을 요약하여 나타내고 있다. 표에서 기본적으로 나타내어지는 응답 (식 I)에 대해서 최소자승법 문제는 (식 II)와 같이 나타내어진다. 이때의 선형 제약조건이 표에서와 같이 나타내어질 때, 이미 알려진 것과 같이 $N \times N$ 인 자기상관행렬($A = R_w$)이 positive definite 이고 행렬 C가 full rank 일 때 가중치 벡터 w는 (식 III)과 같은 해로 얻어 질 수 있다. 이 때, 선형 제약 조건으로는 빔이 조향하는 방향에 대해 주빔의 위치와 크기를 일정하게 고정시키고 부엽준위를 일정하게 하는 것을 생각할 수 있다. 여기서 설계 조건에 맞는 가중치를 갱신하면서 반복적으로 구하기 위해 가중치 벡터의 변화량(Δw)을 이용할 수 있게 된다. 선형 최소자승법 문제에서 구하는 해를 가중치 벡터의 변화량으로 생각하면 표의 (식 II)가 (식 IV)와 같이 변형 되며, 그 해를 통하여 얻어지는 변화량은 (식 V)를 통하여 새로운 가중치로 갱신된다. 그리고 선형 제약조건 또한 다음의 식과 같이 변형되어 표에 있는 제약조건과 같이 나타낼 수 있게 된다.

$$v_s^* \Delta w = 0 \tag{3}$$

$$v_i^* (w + \Delta w) = f_i + \Delta f_i \quad i=1,\cdots,M\text{-}1 \tag{4}$$

위의 제약조건 중 식(3)은 주빔의 위치와 크기를 고정시키는 개념으로 주빔의 조향 방향에 대해서는 변화량을 인위적으로 0으로 고정 시켜서 주빔에 대한 변화가 없도록 한 것이며, 식 (4)가 나타내는 제약조건은 고려 대상인 M 개의 부엽의 peak 값을 찾아내어 오차를 줄이게 된다. 이 때 나타나는 응답을 이전의 응답(f_i), 그리고 이 응답과 원하는 값과의 normalized error(Δf_i)로 정의하게 되면 가중치 벡터의 변화량(Δw)은 이 error 에 따라 수렴 하게 된다. 따라서 .식(3),(4)를 제약조건으로 가지면서 반복하게 되면 원하는 사양의 가중치를 얻을 수 있게 된다.

본 논문에서 제안하는 알고리듬은 표 1.의 오른쪽부분에 요약되어 있다. 문제를 설정할 때 각 소자간에 일어나는 간섭 효과를 응답과 최소자승법 문제에 포함 되어 있다. 표에는 나타나 있지 않지만 기존의 선형 최소자승법을 이용한 알고리듬은 선형 배열에 대해 제안된 것이고, 제안하는 알고리듬은 평면 배열에 적용할 수 있도록 확장된 알고리듬이다. 특히, 응답의 형태가 3차원으로 나타나는 평면 배열에 대한 빔 패턴에서 부엽의 peak 값을 찾아내는 것 은 또 하나의 문제점으로 나타난다. 본 논문에서는 현재의 3차원 빔패턴에서 직교하는 두 방향의 단면에서 동시에 peak 로 나타나는 점을 2차원 배열에 대한 peak 로 간주 하였다. 또한 이 값들도 관심 있는 범위 내의 값만을 알고리듬에 포함하여 필요 없는 data 에 의한 오차 발생을 억제 하였다.

표 1. 제안하는 알고리듬의 요약

A basic least square problem	An iterative procedure with the compensation
$s(\theta)=w^T v(\theta)$ (I) $\min w^T A w$ (II) const. to. $C^H w = f$ $w = A^{-1}C\left(C^H A^{-1} C\right)^{-1} f$ (III) ,where $A=\sum v(\theta_k) v^H(\theta_k)$ 식(V)로 갱신되는 가중치가 설계조건을 만족할 때 까지 식(IV)와 (V)를 반복 $\min \Delta w^T A \Delta w$ (IV) const. to. $C^H \Delta w = \begin{bmatrix} v_s^* \\ v_1^* \\ \vdots \\ v_{M-1}^* \end{bmatrix} \Delta w = \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta f_1 \\ \vdots \\ \Delta f_{M-1} \end{bmatrix}$ $w \leftarrow w + \Delta w.$ (V)	$s(\theta)=w^T \mathbf{M} v(\theta)$ (I) $\min w^T A w$ (II) const. to. $C^H w = f$ $w = A^{-1}C\left(C^H A^{-1} C\right)^{-1} f$ (III) ,where $A=\sum v(\theta_k) v^H(\theta_k)$ 식(V)로 갱신되는 가중치가 설계조건을 만족할 때 까지 식(IV)와 (V)를 반복 $\min \Delta w^T \mathbf{MAM}^T \Delta w$ (IV) const. to. $\mathbf{C}^H \mathbf{M}^T \Delta w = \begin{bmatrix} v_s^* \\ v_1^* \\ \vdots \\ v_{M-1}^* \end{bmatrix} \begin{bmatrix} m_{11} & \cdots & m_{1L} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ m_{L1} & \cdots & m_{LL} \end{bmatrix} \Delta w = \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta f_1 \\ \vdots \\ \Delta f_{M-1} \end{bmatrix}$ $w \leftarrow w + \Delta w.$ (V)

3. 모의실험

본 모의실험에서는 36개(6 x 6)의 소자로 구성된 평면배열에 빔을 설계하여 보았다. 각 소자는 원형의 모양을 가진 일정한 특성을 가지며, 소자간 간격이 0.5λ로 일정한 경우로 하였다. 이러한 배열에 대해 주빔에 대한 부엽의 크기가 모두 30[dB] 작게 되도록 하는 것을 목표로 하였다. 다음의 세가지 경우 모두 최소자승법을 통하여 최적의 가중치를 구하였다. 먼저 그림 1.은 소자간 간섭영향을 고려하지 않은 경우의 결과로 이론적으로 최적의 가중치를 구하였으나 원하는 응답이 나오지 않음을 볼 수 있다. 그림 2.는 사용하는 배열에 대해 가장 최소의 간섭 효과가 나타난다고 알려진 소자간 거리, 즉 간격을 0.5λ에서 0.58λ로 변화 시키고 응답을 구하였다 [3]. 그림을 비교해 보면 제안하는 알고리듬을 사용한 결과와 별 차이가 없어 보이지만 소자나 배열 형태에 따라 최적의 소자간 거리를 구해야 하는 단점이 있고 배열형태가 고정되어 있는 경우에는 사용할 수 없게 된다. 또한 소자간 거리는 이미 잘 알려져 있듯이 소자간 거리가 늘어나면 aliasing에 의한 grating lobe가 나타나게 되어 소자간 거리를 변화 시키는데 제약을 가지게 된다. 제안하는 알고리듬을 사용한 그림 3.은 coupling coefficient matrix를 사용하여 배열에서 나타날 수 있는 소자간 간섭을 상쇄시켜서 원하는 사양의 빔을 얻을 수 있었다. 소자간 거리에 대한 영향이 가장 큰 coupling coefficient matrix는 몇 가지 다른 방법이 있으나 본 논문에서는 다음의 식 (3)과 같은 행렬을 사용하였다 [5].

$$m_{ij} = \frac{\sin kd_{ij}}{kd_{ij}} \qquad (5)$$

여기서 m_{ij}는 i번째 소자가 j번째 소자로부터 받는 영향을 나타내는 계수가 되며, k는 wave number, d는 소자간 거리를 나타낸다.

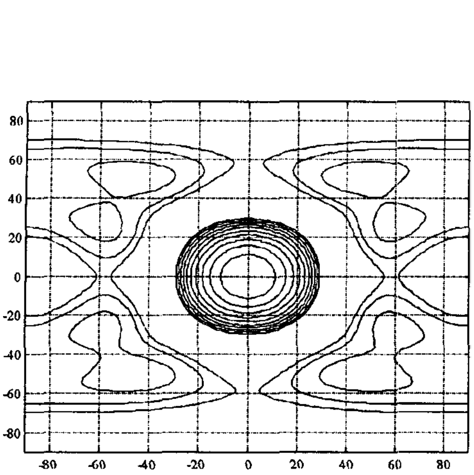

그림 1. 설계된 빔 패턴(no compensations)

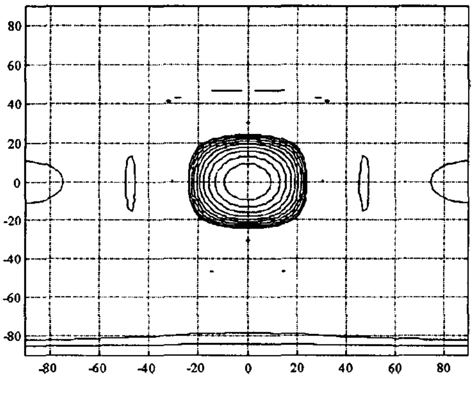

그림 2. 소자간 간격을 바꾼 경우 (d =0.58λ)

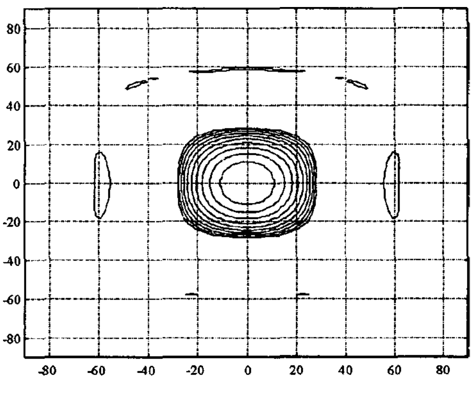

그림 3. 제안 된 알고리듬을 사용한 결과

4. 결 론

본 논문에서는 선형 최소자승법을 기본으로 하여 소자간 간섭이 존재하는 상황에서 원하는 사양의 빔을 설계 기법을 제안하였다. 2차원 이상의 배열에서는 그만큼 사용하는 소자의 수가 많아지므로 보다 더 정확한 응답을 구하기 위해서는 소자간 간섭 영향을 보상해 주어야 한다. 본 논문에서 간섭의 보상 방법은 배열의 재배치 등의 물리적인 방법이 아닌 신호처리적인 방법을 사용하였다. 따라서 간섭 영향을 예측하여 제거 할 수 있었다.

향후에는 선형 최소자승법의 이용을 기본으로 하여 원하는 설계 사양의 빔을. 만들 때 비 대칭형의 배열등에 대해서도 적용시킬 계획이며 곡면 배열 등의 3차원 배열에 대해 알고리듬을 확장 시킬 계획이다. 또한 소자간 간섭 영향 뿐 아니라 소자나 배열에서 발생하는 오차나 error도 고려한 기법을 연구할 계획이다.

5. 참고문헌

[1] Dolph, C. L. "A current distribution for brodeside arrays which optimizes the relationships between beam width and sidelobe level". In *Proceedings of IRE*, 1946, **34**, pp. 315-338.

[2] Ching-Yih Tseng, and Lloyd J. Griffith. "A simple Algorithm to achieve desired patterns for arbitrary". *IEEE Trans. On Signal Processing*, **40**, (11), pp. 2737-2746, 1992.

[3] P. M. Joseph, and P. R. Saseendran Pillai. "Design of planar projector arrays with improved". *Acoustics Letters*, 1989, **12**, pp. 190-193.

[4] P. Darwood, P.N. Flecther, and G.S. Hilton, "Mutual coupling compensation in small planar array antennas", IEE Proc. Microw. Antenna propag., 1998, **145**, (1), pp. 1-6

[5] Steinberg, B. D., *Principles of Aperture and Array System Design*, New York, Wiley, 1976.