

소자간 간섭을 고려한 평면 배열 소나 빔 설계 기법 연구

Study on sonar beam design considering the interaction effects in planar arrays

송준일, 전병두, 임준석*, 성평모

서울대학교 전기공학부, *세종대학교 전자공학과

Joon-il Song, Byung-Doo Jun, Jun-suk Lim*, Kocng-Mo Sung

School of Electrical Eng., Seoul National Univ., *Dept. of Electrical Eng., Sejong Univ.

junili@acoustics.snu.ac.kr

본 연구는 '수중음향특화연구센터'의 지원으로 이루어졌습니다.

요약

본 논문에서는 2차원 평면 배열에서 소자들간의 간섭 영향을 빔 설계 기법을 제안한다. 실제적으로 빔을 구현할 때, 소자간 간섭이 전체 빔 패턴을 변화시키게 되어 성능을 저하시킬 수도 있다. 따라서 보다 정확하게 빔을 설계하기 위해서는 소자간의 간섭 영향을 고려한 빔 설계 기법이 필요하게 된다. 본 논문에서는 특성을 알고있는 소자로 구성된 평면 배열에서 다른 소자에 의한 간섭을 예측한 후 이것을 각 소자의 가중치에 포함 시켜 원하는 사양의 빔을 설계할 수 있도록 한다. 빔 설계방법으로는 선형 최소자승법을 이용하여 빔의 부엽준위의 위치와 크기를 변화 시키면서 원하는 조건의 빔 가중치를 얻어내는 알고리즘을 도입하였다.

1. 서론

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 능동 소나시스템에서는 특정한 방향의 신호에는 가중치를 두고 이외의 방향으로부터의 잡음이나 방해신호를 최대한 억제할 수 있는 빔을 형성하는 것이 목표가 되는데, 이때 고려되는 것들이 빔폭(*beam width*), 최대 부엽준위(*peak side lobe level*), 지향성(*directivity*), 방사 전력 등이 있다 [1]. 센서 배열의 기하학적, 물리적 제한이 확정되었을 때 설계 사양에 따른 빔 설계기법으로는 Dolph-Chebyshev 기법, Taylor 기법, Fourier 기법 등이 있다 [2][3]. 이 중 Dolph-Chebyshev 기법은 소자들이 등간격으로 위치한 선형

배열에서 Dolph-Chebyshev 다항식으로부터 얻어지는 가중치를 이용하여 주엽(*main beam*)이외의 부엽준위를 일정하게 유지하면서 가장 좁은 빔폭을 구현할 수 있어서 많이 응용되고 있다 [2]. 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 변화시켜야만 하는 단점이 있다. 이러한 경우에 대응하는 방법 중 하나로 Tseng 등은 1차원 배열에 대해서 소자의 배열이 확정 되었을 때 원하는 사양의 빔을 설계할 수 있는 반복 알고리즘을 발표하였다 [4]. 그러나 이 방법도 선형 배열과 달리 배열 형태가 달라질 수 있는 2차원 평면 배열에 그대로 적용시키기는 어렵게 되므로 평면 배열에 적용시킬 수 있는 알고리즘이 필요하게 된다. 또한 실제 빔 패턴에 적지 않은 영향을 미치는 소자간 간섭(*acoustic interactions*)도 고려하여 빔을 설계하여야 한다. 이 간섭은 배열에서 소자간의 거리와 자체 방사 특성에 의해 나타나는데, 이것의 영향을 최소화 하는 방향으로 빔을 최적화 해야 한다. 따라서 본 논문에서는 특정한 형태의 평면 배열에 대해 원하는 사양의 빔을 설계하기 위해서 최적화된 1차원 선형 배열 가중치의 확산을 통해 평면 배열의 빔을 형성하고, 확장된 평면 배열에서 소자간 거리와 가중치 등에 의한 소자간 간섭을 계산하여 이 영향을 최소화 할 수 있는 소자간 거리를 구한다. 그리고 바뀌어진 배열에 대해 다시 빔의 최적화를 수행하게 된다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 먼저 최소자승법을 통한 1차원 선형 배열의 빔의 최적화를 적용하여 2차원 배열에 대해 설계 제원을 만족하는 빔 형성기법을 소개하고, 평면

배열에서의 소자간 간섭 영향을 포함하면서 동작하는 알고리즘을 제안한다. 그리고 몇 가지 형태의 배열에 대한 모의 실험을 통하여 설계 제원을 만족시키면서 실제 빔 형태에 가까운 빔을 설계하도록 하겠다.

2. 선형 최소자승법을 이용한 빔 형성 기법

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

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

이 때 \mathbf{w} 는 각 소자들의 가중치를 벡터로 나타낸 것이고, \mathbf{v} 는 방향에 대한 조향 벡터(steering vector)이다. 여기서 조향 벡터 $\mathbf{v}(\theta)$ 는 각 센서의 방사 특성 $g(\theta)$ 와 배열 형태에 의하여 결정되는 시간 지연 τ , 그리고 동작 주파수 ω 에 의하여 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다 [5].

$$\mathbf{v}(\theta) = \begin{bmatrix} g_1(\theta) \exp(j\omega\tau_1) \\ g_2(\theta) \exp(j\omega\tau_2) \\ \vdots \\ g_N(\theta) \exp(j\omega\tau_N) \end{bmatrix} \quad (2)$$

식 (1)과 같이 주어지는 응답에서 설계 사양에 최대한 근접하도록 가중치 벡터를 정하는 것이 빔 설계의 최종 목표가 되는데, 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 알고리즘을 생각할 수 있다 [4]. 이 방법은 아래의 식(4)와 같은 제약물 가지는 선형 최소 자승법 문제(식(3))를 기본으로 가지게 된다.

$$\min \mathbf{w}^T R_w \mathbf{w} \quad (3)$$

$$C^H \mathbf{w} = \mathbf{f} \quad (4)$$

여기서 R_w 은 조향 벡터의 자기상관행렬을 나타내고, C 는 M 개($M \leq N$)의 제약을 포함하는 $N \times M$ 의 행렬이 된다. 이미 알려진 것과 같이 $N \times N$ 인 자기상관행렬($A = R_w$)이 positive definite 이고 행렬 C 가 full rank 일 때 가중치 벡터 \mathbf{w} 는 식(5)와 같이 얻을 수 있게 된다.

$$\mathbf{w} = A^{-1} C (C^H A^{-1} C)^{-1} \mathbf{f} \quad (5)$$

이러한 문제에서 선형 제약 조건으로 부엽 준위를 일정하게 하는 것을 생각할 수 있는데 빔이 조향하는 방향에 대해 주빔의 위치와 크기를 고정하고, 부엽의 peak 위치를 찾아내어 그 레벨과 실제 조건과의 오차를 줄이는 방향으로 문제를 해결할 수 있다. 이러한 개념으로 식(6)과 같이 부엽준위를 원하는 크기로 만들어주는 새로운 가중치를 구할 때 가중치 벡터의 변화량($\Delta \mathbf{w}$)을 이용할 수 있게 된다.

$$\mathbf{w} \leftarrow \mathbf{w} + \Delta \mathbf{w} \quad (6)$$

식(6)과 같이 갱신되는 가중치 벡터에 대해 식(7)과 같은 새로운 문제를 설정하고 자기상관행렬 (R_w) 대신 식(7)을 사용할 수 있다.

$$\min \Delta \mathbf{w}^T A \Delta \mathbf{w} \quad (7)$$

$$A = \frac{1}{2} \sum_{k=1}^L \mathbf{v}(\theta_k) \mathbf{v}^H(\theta_k) \quad (8)$$

또한 선형 제약에 해당되는 것은 다음과 같이 나타낼 수 있는데, 식(9)는 주빔의 위치와 크기를 변하지 않게 하는 역할을 하고 식(10)은 나타나는 $M-1$ 개의 부엽준위를 원하는 크기에 맞추는 역할을 한다.

$$v_s^* \Delta \mathbf{w} = 0 \quad (9)$$

$$v_i^* (\mathbf{w} + \Delta \mathbf{w}) = f_i + \Delta f_i, \quad i=1, \dots, M-1 \quad (10)$$

이 때, Δf_i 를 이전의 응답과 원하는 값과의 normalized error 로 정의하고 다음의 식(11)과 같이 가중치 벡터의 변화량에 대하여 제약 행렬을 정하면 선형 최소자승법을 통해 원하는 사양의 빔을 설계할 수 있게 된다. 예를 들어 d_i (i 번째 부엽의 요구 레벨)가 일정한 크기를 가지면 Dolph-Chebyshev 가중치로 구한 것과 같이 크기가 일정한 부엽준위를 가지는 빔을 설계할 수 있다.

$$C^H \Delta \mathbf{w} = \begin{bmatrix} v_s^* \\ v_1^* \\ \vdots \\ v_{M-1}^* \end{bmatrix} \Delta \mathbf{w} = \begin{bmatrix} 0 \\ \Delta f_1 \\ \vdots \\ \Delta f_{M-1} \end{bmatrix} \quad (11)$$

위에서 언급한 알고리즘은 배열의 사양에 따라 적응적으로 동작하는 장점을 가지고 있다. 또한 아래의 그림 1-(a)와 같이 선형배열을 그대로 평면으로 확장시킨 rectangular 형태의 배열에 대해서는 가중치를 식(12)과

같은 방법으로 수평 방향(x)과 수직방향(y)의 가중치간 외적으로 정의하여 사용할 수 있다.

$$W = w_x w_y^T \quad (12)$$

그러나 실제적으로 평면 배열을 구성할 때 하드웨어상의 제약 때문에 배열의 형태가 달라질 수 있게 된다. 아래의 그림 1-(b)는 배열이 존재하는 영역이 원형인 경우, 변형된 rectangular 형태의 배열을 나타낸다.

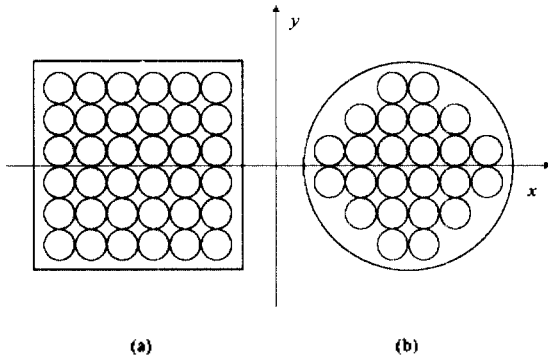


그림 1. 평면 배열의 형태

위 그림과 같은 두 배열에 대해서 6 개의 소자로 구성된 선형배열을 모든 부엽준위의 크기가 일정하도록 가중치 벡터를 구한 후, (a)는 식(12)의 방법으로 가중치를 정하고, (b)의 경우는 (a)의 가중치에서 모서리 부분의 6 개 소자에 대한 가중치를 0 으로 만들어서 빔을 형성할 수 있게 된다. 결과를 보면 (a)의 경우는 예상대로 모든 방향의 부엽준위가 일정하게 나타나는 것을 볼 수 있다. 그러나 (b)의 경우는 배열의 특성상 (a)와 달리 부엽이 나타나는 위치가 다르고 원하는 사양도 만족하지 못하게 된다. 이러한 상황에 대응하기 위해서 최대 부엽이 나타나는 빔의 단면(대각선 방향)으로부터 주어진 1차원 빔 패턴을 또 하나의 1차원 빔 형성 문제로 보고 앞에서 언급한 선형 최소자승법을 응용하여 최적화 시키는 방법을 생각할 수 있다 이 방법은 식(9)와 (10)으로 주어지는 선형적 제약을 따르는 동시에 소자의 결손에 의하여 나타나는 오차를 줄이기 위해서 이차 계산된 error에 비례하여 각 부엽의 요구 레벨을 아래의 식(13)과 같이 갱신 시켜 주게 된다. 여기서 μ 는 step size 를 나타낸다.

$$d_i \leftarrow d_i + \mu e_i, \quad i=1, \dots, M-1 \quad (13)$$

기준에 사용되던 평면 배열 빔 설계기법 중에는 요구조건을 만족시킬 때까지 부엽의 레벨을 계속 낮추면서

반복하는 방법이 있는데 [1], 그 방법에 비해서 위의 알고리즘은 오차를 줄여 나가는데 있어서 보다 더 효율적이라고 말할 수 있다.

3. 소자간 간섭 영향 예측

여러 개의 센서로 배열을 구성하게 되면 각 소자의 방사특성으로 인하여 소자간 간섭이 발생하게 된다 이 영향으로 전체 빔 패턴의 변화가 일어나게 되므로 실제로 구현되는 배열에 대해 원하는 사양의 빔을 얻으려면 이 간섭을 최소화할 수 있는 소자간 간격을 적용해야 한다. 아래의 식은 원형의 진동면을 가지는 소자로 구성된 배열에서 전체 간섭의 크기를 나타낸다 [6].

$$F = \left\{ \left[\sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \frac{\rho c \pi a^2 (ka)^2 \sin(kd_{mn})}{2 kd_{mn}} V_n e^{j\delta_{mn}} \right]^2 + \left[\sum_{m=1}^N \sum_{n=1}^N \frac{\rho c \pi a^2 (ka)^2 \cos(kd_{mn})}{2 kd_{mn}} V_n e^{j\delta_{mn}} \right]^2 \right\}^{\frac{1}{2}} \quad (14)$$

- a : 소자의 반지름 k : wave number
- d_{mn} : 소자간 거리 V_n : 소자의 속도
- δ_{mn} : 소자간 위상차

4. simulation

그림 1.의(b)와 같은 배열 형태에 대하여 6 개의 소자로 구성된 선형 배열로부터 평면 배열에 대한 빔을 설계하여 보았다. 진동면의 지름이 0.5λ인 소자들로 이루어진 배열에 대해 주빔에 대한 부엽의 크기가 모두 20[dB] 작게 되도록 하는 것을 목표로 하였다. 초기에는 소자간 간격을 0.5λ로 하고 빔을 1차 최적화한후 그 가중치를 포함한 소자간 간섭 크기의 총합을 소자간 거리에 따라 구한다. 그리고 간섭영향을 최소화 할 수 있는 거리를 택한후 다시 1차 최적화를 반복하여 최종적인 가중치를 얻어냈다.

최적화된 1차원 배열의 가중치를 식(12)와 같이 2차원으로 확장 시킨 후에 최대 부엽이 나타나는 빔의 단면(대각선 방향)을 보면 그림 2.의 점선(부엽준위가 20[dB]를 넘는 것)과 같이 나타나는데 식(13)과 같이 요구레벨을 갱신시키면서 반복 계산 하게 되면(step size μ 는 0.1) 그림 2.의 점선처럼 요구 조건을 만족시키는 빔을 구할 수 있게 된다.

이렇게 1차 최적화를 수행한 후에 그 가중치를 포함한 소자간 간섭을 거리에 따라 나타내면 그림 3.과 같다

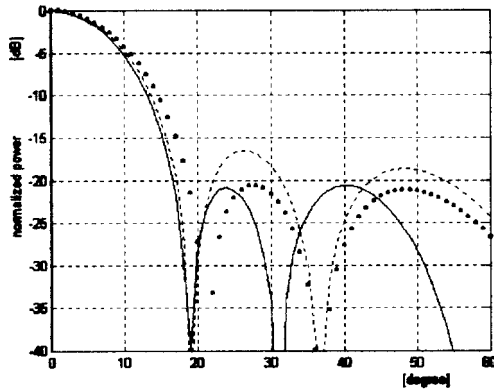


그림 2. 반복 계산 전후의 빔의 형태(단면)

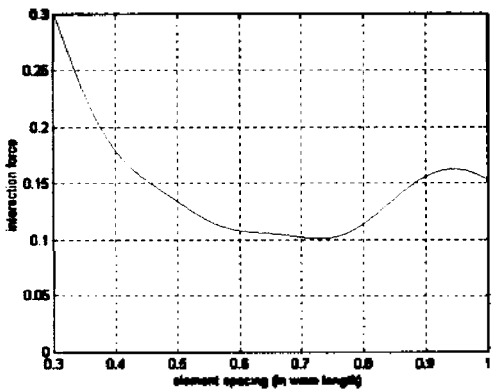


그림 3. 평면 배열에서의 소자간 간섭 크기

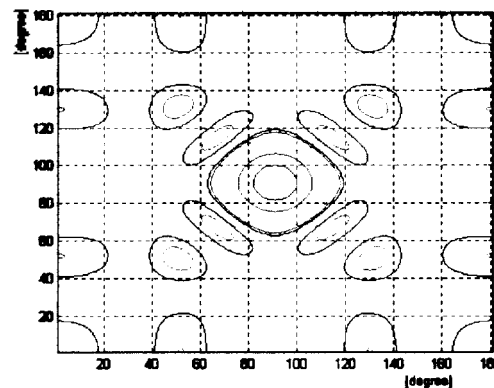


그림 3. 평면 배열에서의 소자간 간섭 크기

위의 그림 3.에서 보면 소자간 간격에 대해 가장 적은 간섭이 일어나는 곳은 약 0.73λ 인 경우이다. 그러나, 기본적인 빔 설계시에 간격이 0.5λ 이상이 되면 aliasing에 의하여 나타나는 grating lobe 때문에 빔의 성능이 크게 저하되는 것이 이미 잘 알려져 있다 [1]. 그러므로 그림 3.에서 간섭영향이 줄어드는 정도가 완만해지는 약 0.58λ

지점을 최적으로 정한 후에 다시 1차 최적화를 수행하였다. 이렇게 되면 소자간 간섭영향이 약 30%정도 감소하는 효과를 얻을 수 있다. 그 결과가 위의 그림 2.의 실선과 같이 나타나고 설계 조건을 잘 만족하는 것을 볼 수 있다. 위의 그림 4.는 전체 빔 패턴을 나타낸다.(4[dB] 간격) 여기서 양 쪽 끝에 나타나는 grating lobe는 요구 부엽 준위인 20[dB]보다 작게 나타나므로 문제점이 되지 않는다. 실제 최소를 나타내는 0.73λ 의 경우에는 grating lobe가 무시할 수 없는 영향을 미치게되어 사용에 부적절 하였다.

5. 결론

본 논문에서는 선형 최소 자승법을 이용하여 사양을 만족하는 2차원 배열에 대해 설계 재원을 만족하는 빔 형성기법을 제안하였다. 1차원 배열과 달리 소자의 사용이 많아지는 평면 배열에서는 그 만큼 주변 소자들에 의한 간섭이 많아지게 된다. 따라서 빔을 설계 할 때 이 영향을 포함시키는 것이 꼭 필요하게 된다. 본 논문에서는 배열에 따라 소자간 간섭을 최소화하도록 배열을 바꾸어 최적화를 수행하였다. 이 결과로 실제로 구현될 비 형성기의 빔 패턴을 보다 더 정확히 모델링 할 수 있었다.

향후에는 선형 최소자승법의 이용을 기본으로 하여 원하는 설계 사양의 빔을 만들 때 비 대칭형의 배열등에 대해서도 동작하도록 알고리즘을 발전 시킬 계획이며 소자간 간섭 영향도 소자의 자체 방사 특성에 포함 시켜서 동시에 여러 영향을 고려한 기법을 연구할 계획이다.

6. 참고 문헌

- [1] 허성욱, "수중음향탐지시스템의 조향빔 인가신호 최적화와 효율적 합성기법". 공학박사학위논문, 1998.
- [2] Dolph, C. L. "A current distribution for broadside arrays which optimizes the relationships between beam width and sidelobe level". *Proceedings of IRE*, 1946, vol.34, pp. 315-338.
- [3] T. T. Taylor. "Design of line source antennas for narrow beam width and low side". *IRE Trans. Antenna Propag.*, pp. 973-978, 1965.
- [4] Ching-Yih Tseng, Lloyd J. Griffith. "A simple Algorithm to achieve desired patterns for arbitrary". *IEEE Trans. On Signal Processing*, vol. 40, No. 11, pp. 2737-2746, 1992.
- [5] Constantine A. Balanis. "Antenna theory analysis and design". *John Wiley & Sons*, 1982.
- [6] P. M. Joseph, P. R. Saseendran Pillai. "Design of planar projector arrays with improved". *Acoustics Letters*, 1989, vol.12, pp. 190-193.