

음향측정을 위한 빔형성에서의 최적 가중상수 설계 기법

도 경 철*, 손 권*, 이 용 곤*, 손 경 식**

*국방과학연구소, **부산대학교 공과대학 전자공학과

An Algorithm on Optimum Weighting Design in Beamforming for Acoustic Measurement

* Kyeong-Cheol Dho, Kweon Son, Yong-Gon Lee, ** Kyung-Sik Son

* Agency for Defense Development,

** Electronic Eng. depart. of Pusan Nat'n. Univ.

요 약

본 논문에서는 선형배열을 이용하여 음향을 측정하기 위한 새로운 빔형성 알고리즘을 제안한다. 제안 알고리즘은, FIR필터 설계기법에 의해 가중상수 및 원하는 빔패턴을 설정하고 이를 초기치로 사용하여 원하는 빔패턴과의 오차가 최소가 되도록 가중상수를 최적화시킨다. 주파수영역의 지향지수 균일성 유지를 위해 옥타브 대역을 부대역으로 세분하고 의사역행렬에 의해 전달행렬을 정방행렬화하여 부대역별로 최적화를 수행한다.

1. 서 론

옥타브 대역별로 센서가 등간격 배치된 삼입형 선형 배열에서의 전형적인 옥타브 대역별 빔[1,2]은 배열과의 수직방향에서 좁은 빔폭을 가지고 주파수에 따라 빔폭이 변한다. 그리고 옥타브 대역 양 끝단의 지향지수 역시 3dB 차이를 가져 균일하지 못하다. 이는 주파수영역에서 역곡선으로 보상이 가능 하지만 너무 방대한 계산량을 필요로 한다.

본 논문에서는, 선형배열을 이용한 빔형성에서 원하는 빔패턴과 균일 지향지수를 획득하기 위한 새로운 알고리즘을 제안한다. 본 연구에서는 주파수대역에 따라 가중상수를 변화시키면 빔패턴이 달라질 수 있음을 이용하여, 센서간격은 일정 등간격으로 유지시키는 대신 센서간격에 의해 설정되는 옥타브대역을 부대역(subband)으로 세분화하고 각 부대역에 대하여 빔폭을 일정하게 유지하도록 가중상수를 최적화시킴으로써 원하는 빔패턴과 균일 지향지수를 획득하고자 한다.

II. 선형배열에서의 음향측정을 위한 빔형성

센서배열과의 수직방향을 0° 로 두는 경우, 선형배열에서의 전형적인 옥타브 대역별 빔형성기법의 빔패턴 함수 $p(u)$ 는 임의 방위 θ_m 에서 식(1)과 같이 주어진다 [6]. u 는 파장 λ 에 대한 정현파 빔폭 $u = \sin(\theta_m)/\lambda$ 을 나타내고, d 는 옥타브대역의 센서간격이다.

$$p(u) = \sum_{n=1}^N \omega_n e^{-j2\pi nud} \tag{1}$$

선형배열 지향지수 $DI(f)$ 는 식(2)에서와 같이 실효 센서 개수 N 과 옥타브 최대주파수 f_{max} 의 함수이다.

$$DI(f) = 10 \log[Nf/f_{max}] \tag{2}$$

옥타브대역 최저주파수는 최대주파수의 1/2이므로 옥타브대역 양 끝의 지향지수 차이는 3dB가 된다. 그림 1은 이를 증명하고 있다. 이러한 오차를 줄이기 위해 측정신호 분석 시에 지향지수 변화를 주파수영역에서 보정해야 하지만 너무 방대한 계산량을 필요로 한다. 그러나 옥타브대역을 부대역으로 세분화한다면 부대역 양 끝단의 주파수 차이는 2보다 작으므로 지향지수 변화 역시 줄일 수 있다. 이는 그림 2에서 설명된다.

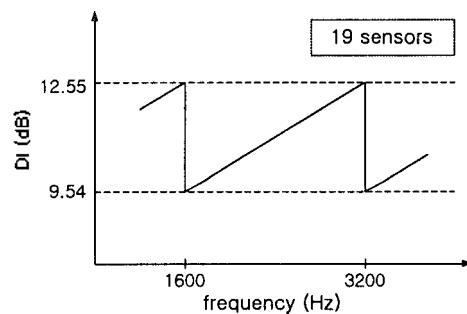


그림 1. 선형배열에서 주파수에 따른 지향지수 변화 예

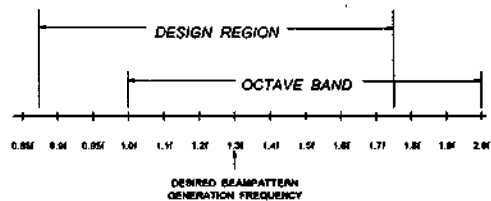


그림 2. 옥타브대역의 세분화 예

옥타브대역이 10개의 부대역으로 세분화된 그림 2의 예에서 각 부대역 양 끝의 주파수 차이는 1/10이므로 지향지수 차이는 0.3dB로 10배 줄어든다. 그러나 각 부대역의 주파수 범위가 서로 상이하므로, 동일한 가중상수를 적용하는 경우 식(1)의 빔패턴은 각 부대역마다 서로 달라진다. 서로 다른 부대역에서도 빔패턴을 동일하게 유지하기 위해서는 결과적으로 가중상수를 각 부대역별로 다르게 적용할 수밖에 없다. 이는 가중상수를 주파수에 따라 다르게 설계하여야 함을 의미한다.

III. 주파수 대역별 가중상수에 의한 빔형성기법 제안

옥타브대역을 부대역으로 세분화하고 각 부대역별로 빔을 형성하되 가중상수를 부대역별로 별도 적용시키기 위해, 식(3)과 그림 3의 알고리즘을 제안한다. 식(3)에서 ω_{np} 는 부대역 p 에서의 센서 n 에 대한 가중상수를 의미하고 q 는 해당 옥타브 대역이다.

$$B_q(t, \theta) = \sum_{p=1}^P \sum_{n=1}^N \omega_{np} s_n(t - \tau_n) \quad (3)$$

IV. 임의 빔패턴을 위한 가중상수 최적화

4.1 LMS를 이용한 최적 가중상수 설계 기법 제안

임의 주파수대역에서의 원하는 빔패턴 형성을 위해 본 연구에서는 그림 4의 최적 가중상수 설계 기법을 제안한다. 이는 원하는 빔패턴과 형성된 빔패턴과의 오차가 최소화되도록 가중상수를 최적화한다. 그림 4의 제안 알고리즘을 수행하기 위해 원하는 빔패턴의 형상을 먼저 설계하고 이를 최대 만족시키는 가중상수를 구하여야 한다. 신호가 전달하면서 생긴 시간지연을 보상

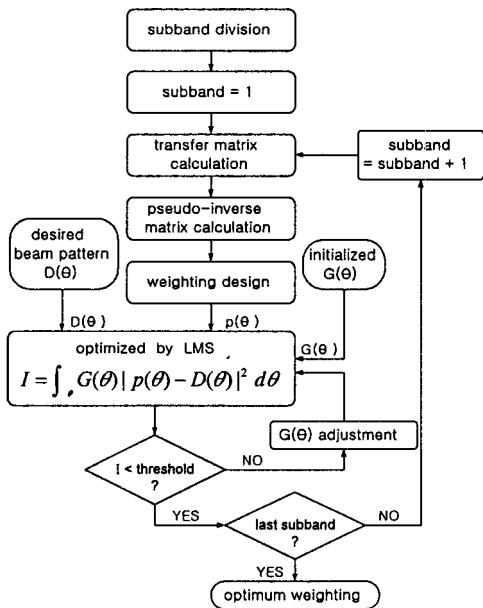


그림 3. LMS를 이용한 최적 가중상수 설계 알고리즘

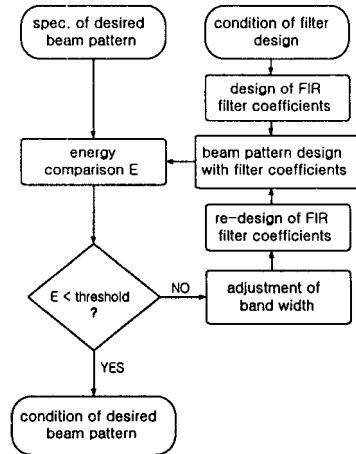


그림 4. FIR필터 설계기법을 이용한 빔패턴 설정

해주는 빔형성기와 주파수 영역을 다루는 필터는 동일한 개념이다. 이는 식(1)의 빔패턴 함수와 식(4)의 필터 주파수 응답함수에서 쉽게 알 수 있다[3,4].

$$H(e^{j\omega}) = \sum_{n=0}^{N-1} h(n) e^{-j\omega n} \quad (4)$$

식(4)에서 N 은 필터 차수이고, $h(n)$ 은 n 번째 필터 계수이다. 식(1)의 ud 는 식(4)의 f_0 에 대응됨을 알 수 있다. 이를 이용하면 필터 통과대역 차단주파수 f_0 에서의 센서간격, 빔폭 및 파장과와 관계를 식(5)와 같이 도출할 수 있다.

$$f_0 = ud = d \sin \theta / \lambda \quad (5)$$

원하는 빔폭, 센서간격 및 측정신호 파장을 선택하면 식(5)에 의해 빔패턴을 위한 주파수대역을 결정할 수 있다. 식(4)의 FIR필터 계수 $h(n)$ 을 적절하게 정하고 이를 식(1)의 가중상수 ω_n 대신 사용하여 빔을 형성시키면, 식(5)로 결정되는 주파수대역에서 빔패턴의 주엽을 원하는 형상으로 만들 수 있다[5]. 설계에서는 통과대역 차단 주파수 f_0 를 임의 조절하여 원하는 빔패턴에

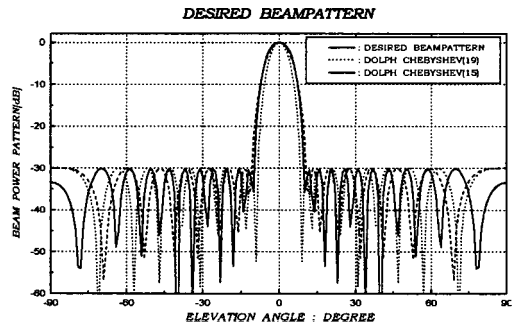


그림 5. FIR필터 설계기법에 의한 19개 센서에 대한 최적 빔패턴

가감도를 한다. 여기서 차단주파수 f_b 는 그림 2의 옥타브대역 세분화 주파수 가운데 한 가지로 한다.

예를 들어 설계주파수 3200Hz에서의 -2dB 빔폭을 7.38° 로 하면 원하는 빔패턴을 그림 5와 같이 설계할 수 있다. 비교를 위하여 균일 부엽준위 및 최소 주엽빔폭을 갖는 돌프-체비세프 가중상수[7]의 빔패턴은 그림에서 점선으로 나타내었다. 센서간격 d 가 고정된 상태에서, 센서 수가 증가하면 주엽빔이 구형파에 가까워진다. 그러나 센서 수 증가에 따른 하드웨어 및 소프트웨어적인 부담을 감수해야 한다.

4.2 의사역행렬을 이용한 가중상수 초기치 설정

식(1)의 빔패턴은 주파수 f_1 에서 식(6)과 같이 표현할 수 있다. 여기서 P_f , S_f 및 W_f 는 주파수 f 에서의 빔패턴, 전달행렬 및 가중상수를 각각 나타낸다. 그리고 N 은 센서 수이고 M 은 빔패턴 측정점이다.

$$[P_f]_{M \times 1} = [S_f]_{M \times N} [W_f]_{N \times 1} \quad (6)$$

센서간격이 동일한 배열의 경우 그림 2의 설계영역 $0.9f \sim 1.7f$ 에 대하여 전달행렬 S_f 는 각 부대역에서 동일한 행렬이다. 임의 주파수 f 에서 원하는 빔패턴 P_f 를 만족하는 가중상수 W_f 는 $W_f = P_f \times S_f^{-1}$ 에 의해 구하여야 하지만, 전달행렬 S_f 가 정방행렬이 아니므로 식(6)에 의해 직접 구할 수는 없다. 따라서 식(7)과 같이 의사역행렬(pseudo-inverse matrix)을 이용하여 구하여야 한다.

$$W_f = [[S_f^T S_f]^{-1} S_f^T] P_f \quad (7)$$

식(7)에서 $^{-1}$ 는 복소공역, T 는 전치행렬, $^{-1}$ 은 역행렬을 각각 의미한다. 그림 5의 원하는 빔패턴을 생성하도록 식(7)의 의사역행렬 기법으로 가중상수를 구하고 이를 각 부대역에 적용시켜 빔패턴을 계산하면, 설계주파수인 $1.4f$ 에서는 그림 6과 같이 주엽빔에서 원하는 빔패턴과 유사하지만, $0.9f$ 에서는 빔패턴이 상당히 일그러짐을 그림 7에서 볼 수 있다. 그러므로 의사역행렬로 구한 가중상수는 각 부대역에 맞도록 다시 최적화되어야 하며, 이를 위하여, 식(7)에 의해 구한 가중상수를 초기로 활용한다.

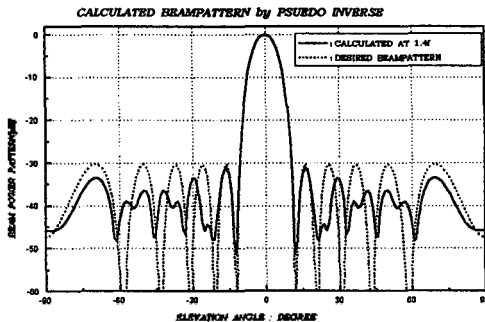


그림 6. $1.4f$ 에서 의사역행렬 방식으로 구한 빔패턴

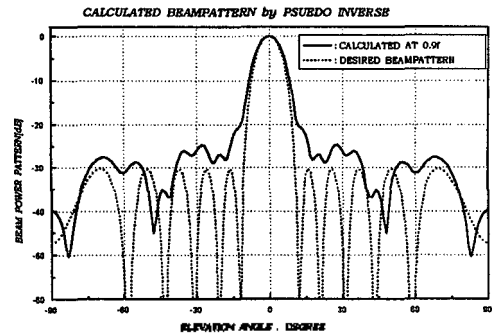


그림 7. $0.9f$ 에서 의사역행렬 방식으로 구한 빔패턴

4.3 LMS를 이용한 가중상수 최적화

원하는 빔패턴을 생성하기 위해 식(8)의 최소자승 최소화 알고리즘을 사용한다. 여기서 θ 는 센서배열의 수직방향과 이루는 각이고 $p(\theta)$ 는 식(1)의 빔패턴이다. $D(\theta)$ 는 그림 4에 의해 구한 그림 5의 빔패턴이다.

$$I = \int_{\theta} G(\theta) | p(\theta) - D(\theta) |^2 d\theta \quad (8)$$

식(8)에서 $G(\theta)$ 는 오차 최소화를 위한 제어이득이다. 부엽과 천이영역의 오차는 어느 정도까지 허용할 수 있으나, 주엽에서의 오차는 빔패턴에 큰 영향을 주기 때문에 주엽형상은 가능한 한 빔패턴과 동일하게 하여야 한다. 따라서 오차 최소화를 위한 제어이득을 주엽에서 크게 하고 부엽 및 천이영역에서는 작게 하여야 함을 알 수 있다. 이와 같이 오차 최소화를 위한 제어이득 설정을 위해 그림 8과 같이 지향각에 따라 주엽, 부엽 및 천이영역으로 분류한다.

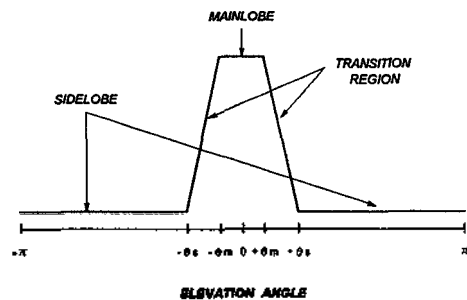


그림 8. 제어이득 설정을 위한 지향각 분할

V. 시뮬레이션 및 고찰

본 연구에서는 설계 주파수가 3200Hz인 경우에 19개 센서를 사용하여 -2dB점 빔폭을 7.38° 로 하는 빔패턴에 대하여 시뮬레이션한다. 대역 내의 모든 주파수에서 지향지수의 변화율이 0.3dB, 즉 ± 0.15 dB 이내를 사양으로 하여 옥타브 대역을 그림 2와 같이 10개로 분할하고 시뮬레이션한다.

제안 알고리즘을 이용하여 생성한 빔패턴은 그림 9 및 그림 10과 같다. 새로 설정된 옥타브대역의 각 부대

역에서 생성된 주엽빔은 원하는 빔패턴과 거의 동일한 형상이며, 특히 원하는 영역의 끝부분인 0.9f에서도 빔패턴이 많이 향상되었음을 알 수 있다.

각 부대역에서 생성된 최적 가중상수를 적용하여 계산된 주파수에 따른 지향지수는 그림 11과 같다. 설계된 빔형상기의 지향지수 변화율은 목표인 $\pm 0.15\text{dB}$ 를 0.05dB 상회하는 $\pm 0.2\text{dB}$ 로서, 좁은 빔폭을 갖는 일반 돌프-체비셰프 가중상수의 경우보다 많이 향상되었음을 알 수 있다. 특히 음원의 물리적인 크기를 충분히 포함하도록 빔폭을 넓힌 경우의 돌프-체비셰프 빔패턴보다도 모든 주파수에서 매우 우수한 지향지수를 보유함을 알 수 있다.

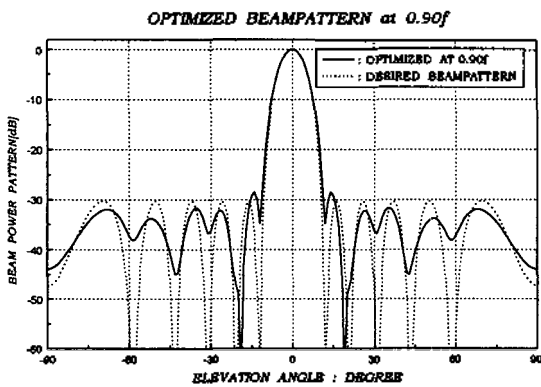


그림 9. 0.9f에서 최적화 방식으로 구한 빔패턴

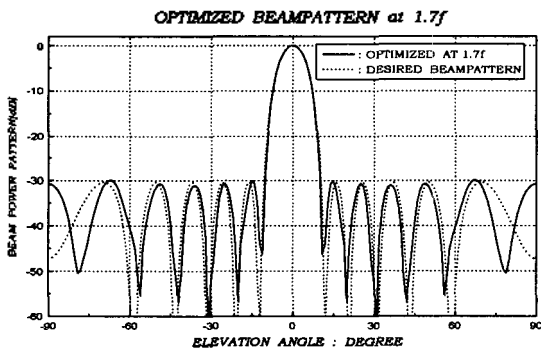


그림 10. 1.7f에서 최적화 방식으로 구한 빔패턴

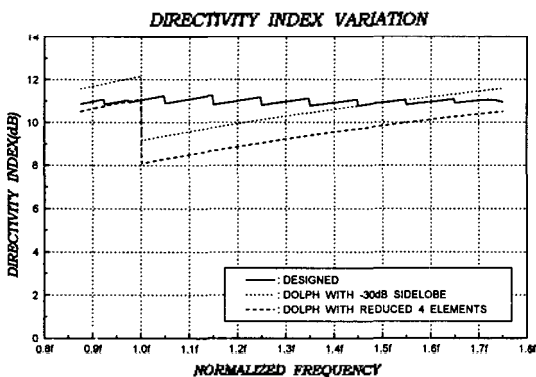


그림 11. 최적빔형성에 의한 지향지수

VI. 결론

본 논문에서는, 삽입형 선형배열을 이용하여 수중음향을 측정하기 위한 새로운 최적 빔형성 알고리즘을 제안하였다. 제안 알고리즘은 FIR필터 설계 방식으로 최적 가중상수와 주파수대역을 먼저 설정하고, 이를 초기치로 하여 최소자승오차를 최소화하도록 가중상수를 최적화 시킨다. 주파수에 따른 지향지수의 균등화를 위해 옥타브대역을 부대역으로 분할하고, 각 부대역별로 최적화를 수행한다. 최적화 과정에서 정방행렬이 아닌 전달행렬은 의사역행렬로 변경하여 계산한다.

시뮬레이션 결과, 설정된 옥타브대역의 각 부대역에서 생성된 주엽빔은 원하는 빔패턴과 거의 동일한 형상을 유지함을 확인 할 수 있었다. 특히 구하고자 하는 옥타브대역의 끝부분에서도 원하는 빔패턴과 유사하도록 빔패턴이 향상되었다.

결과적으로, 제안 알고리즘은 센서 수를 늘리지 않고도 삽입형 선형배열을 이용하여 음향측정에 유용한 빔패턴 및 지향지수를 형성시킬 수 있다. 그러므로 본 연구의 제안 알고리즘이 음향측정에 유용함을 확인하였다.

참고 문헌

1. R. A. Mucci, "A Comparison of Efficient Beamforming Algorithms," *IEEE Transactions on Acoustics, Speech, and Signal Processing*, vol. ASSP-32, no. 3, pp.548~558, June 1984
2. R. J. Urick, *Principles of Underwater Sound*, 3rd ed., 1983, McGraw-Hill, 1983
3. Darren B. Ward, Rodney A. Kennedy, Robert C. Williamson, "FIR Filter Design for Frequency Invariant Beamformers," *IEEE Signal Processing Letters*, vol. 3, no. 3, pp. 69~71, March 1996.
4. Darren B. Ward, Rodney A. Kennedy, Robert C. Williamson, "Theory and Design of Broadband Sensor Arrays with Frequency Invariant Far-field Beam Patterns," *J. Acoust. Soc. Am.*, vol. 97, no. 2, pp. 1023~1034, Feb. 1995.
5. J. W. Adams, "FIR Digital Filters with Least Squares Stopbands Subject to Peak-Gain Constraints," *IEEE Transactions on Circuits and Systems*, vol. 39, no. 4, pp.376~388, April 1991
6. Peter M. Clarkson, *Optimal and Adaptive Signal Processing*, CRC Press, 1993
7. C. L. Dolph, "A Current Distribution for Broadside Arrays which Optimizes the Relationship between and Side-lobe level," *Proceeding IRE.*, vol. 34, pp. 335~348, June 1946.