

정합필터배열처리를 이용한 소음원 탐지

윤종락* 노용주* 김동현* 정희석*

* : 부경대학교 정보통신공학과

Sound Source Localization Using Matched Filter Array Processing

Yoon, Jong-Rak* Ro, Yong-Ju* Kim, Dong-hyun* Jung, Hee-Suk*

* : Pukyong National University Dept. of telematics engineering

E-mail jryoon@dolphin.pknu.ac.kr royju@woongbi.pknu.ac.kr kdhun@woongbi.pknu.ac.kr

요 약

소음원 탐지는 환경 소음제어, 음향 표적 탐지 및 음성 통신 등의 광범한 분야에 적용되는 연구분야로 Beamforming 기술, 상관합수법, 음향인테리터법 등 다양한 기술이 적용되는 분야이다. 본 연구는 최근 그 응용 범위가 증대되고 있는 Matched Filtering 기술을 이용한 소음원 탐지기술의 수치 해석 결과로 종래 연구가 현상적인 특성의 1차적 응용이라면 본 연구는 Matched Filtering의 공간 분해능 특성을 해석한 것으로 배열 중심선과 소음원이 이루는 경사각에 따른 분해능 특성을 중심으로 논의되었다.

1. 서 론

정합 필터 처리(Matched Filter Processing) 기술은 음원 스펙트럼 예측, 음원의 위치 탐지에 적용되는 기술로 음향공간의 임펄스 시역전 함수 처리 기법이다. 이 기술은 Parvulescu가 1962년 특허 등록하여 1976년에 특허권이 해제될때까지 소수의 연구자들에 의해서만 연구 대상이었다. 관련 논문도 1980년대 후반부터 발표되기 시작하였고 최근에 들어서 반사공간에서의 음성 신호음질 개선, 해양환경에서의 음원 위치 추적이나 음원 스펙트럼 예측 분야에 대한 응용연구가 활발해지고 있다. 본 논문에서는 국내 연구자들의 관심이 상대적으로 미미한 이 기술에 대한 기술적 개념소개와 아울러 지금까지 연구결과에서 실험적으로 논의된 음원위치 추적정확도를 음원의 대역, 다수음원의 공간적 이격거리 등 파라메타로 하여 분해능 특성을 해석하고 수치모의 실험 결과를 제시하였다.

제시된 결과는 화상회의 공간의 화자위치 추적, 해양 음향환경에서의 소음원 추적에 응용될 수 있을 것이다.

2. Matched Filter Array(MFA) 이론

음향 공간에서 음원 $s(t)$ 가 마이크로폰 배열에 수신되는 경우 i 번째 마이크로폰에 의해 수신된 신호 $r_i(t)$ 는 다음식으로 나타내어 진다.

$$r_i(t) = \int s(\tau) h_i(t-\tau) d\tau = s(t) * h_i(t) \quad (1)$$

여기서 $h_i(t)$ 는 음향공간의 전송함수이다.

정합필터는 각 마이크로폰의 임펄스 응답의 시역전함수 $h_i(-t)$ 로 정의된다.

따라서, 각 마이크로폰에서 정합 필터된 신호 $y_i(t)$ 는 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$y_i(t) = r_i(t) * h_i(-t) = s(t) * h_i(t) * h_i(-t) \quad (2)$$

$y_i(t)$: 각 마이크로폰에서 정합필터된 신호

$h_i(t)$: 각 마이크로폰의 임펄스 응답

이상의 MFA 이론을 이산신호식으로 표기하면,

$$\text{음원 } s(t) \rightarrow S(z) = s_0 + s_1 z + s_2 z^2 + \dots$$

모델의 전송함수

$$h_i(t) \rightarrow H_i(z) = h_{i0} + h_{i1} z + h_{i2} z^2 + \dots$$

i 마이크로폰에서 수신된 신호

$$r_i(t) \rightarrow R_i(z) = r_{i0} + r_{i1} z + r_{i2} z^2 + \dots$$

식(1)에 의해 $R_i(z)$ 는 다음과 같다.

$$R_i(z) = S(z) H_i(z) \quad (3)$$

따라서, 각 마이크로폰의 이상적인 정합필터된 출력은 다음식과 같다.

$$Y_i(z) = R_i(z) H_i(z^{-1}) = S(z) H_i(z) H_i(z^{-1}) \quad (4)$$

여기서 이상적인 정합필터 $H_i(z^{-1})$ 는 $H_i(z)$ 의 공역 복소수이다. 식 (4)가 정합필터 기술의 기본식으로 식 (4)로부터 음원위치나 음원스펙트럼을 예측할 수 있다.

실제 공간에서 임펄스 응답이나 주파수 응답을 구하

는 것은 쉬운 일이 아니다. 실제 음향공간 임펄스 응답 $h(t)$ 대신 유사 임펄스 응답 $e(t)$ 를 사용하여 정합 필터링을 수행한다. 실제 임펄스 응답과 유사 임펄스 응답의 비가 1이 되면 정확한 정합 필터 출력신호를 구할 수 있을 것이다. $e(t)$ 는 실제 음향공간의 음향특성 정보로부터 모델링 혹은 실험 등으로 구할 수 있다.

유사 임펄스 응답 $e(t)$ 는 다음식으로 주어진다.

$$e(t) \rightarrow E(z) = e_0 + e_1z + e_2z^2 + \dots$$

따라서, 정합 필터는 $E(z)$ 의 공역복소수이다.

$$E(z^{-1}) = (e_0 + e_1z^{-1} + \dots + e_{-M}z^{-M})z^M \quad (5)$$

여기서, M 은 필터의 유한길이 (만약, 필터의 길이가 길면 과도한 계산시간이 요구된다), 그리고 z^M 은 Causal 한 필터를 생성하기 위해 삽입된 M 개의 고정 시간 지연을 의미한다.

따라서, 유사 임펄스 응답에 의한 각 마이크로폰의 정합 필터된 신호는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} Y_i(z) &= R_i(z)E_i(z^{-1}) \\ &= S(z)H_i(z)E_i(z^{-1}) \end{aligned} \quad (6)$$

3. Source Localization

음원 탐지란 미지의 음원에 대해 위치와 방향을 추적하는 기법으로 Beamforming 기술, 상관함수법, 음향인 테시터법 등 다양한 방법들이 제안되어 있다. 그림3-1은 2개의 배열센서를 이용한 정합필터 배열처리 기술에 의한 음원탐지 모식도이다.

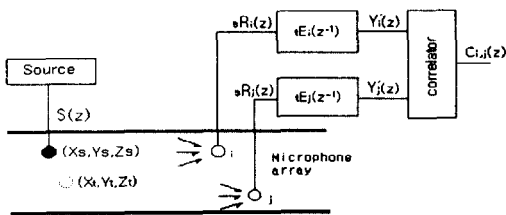


그림 3-1 정합필터배열처리에 의한 음원 탐지 모식도

미지의 위치 (x_s, y_s, z_s) 에서 방사되는 음원이 i 마이크로폰에 수신되는 신호는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} R_i(z) &= r_{i,0} + r_{i,1}z + r_{i,2}z^2 + \dots \\ &= S(z)H_i(z) \end{aligned} \quad (7)$$

실질적 음원들의 위치 (x_i, y_i, z_i) 에서 방사되는 임펄스가 i 마이크로폰에 수신되는 신호는 다음과 같다.

$$H_i(z) = h_{i,0} + h_{i,1}z + h_{i,2}z^2 + \dots \quad (8)$$

따라서 위치 (x_i, y_i, z_i) 에서의 신호전송에 대한 이상적인 정합필터는 $H_i(z^{-1})$ 이다.

그러나 유사 임펄스 응답 $E_i(z)$ 에 의해 실제 적용되는 정합필터는 다음식과 같다.

$$E_i(z^{-1}) = z^M (e_{i,0} + e_{i,1}z + \dots + e_{i,-M}z^{-M}) \quad (9)$$

따라서, 각 마이크로폰의 정합필터 출력은 다음과 같이 구하여 진다.

$$\begin{aligned} Y_i(z) &= E_i(z^{-1})R_i(z) \\ &= E_i(z^{-1})H_i(z)S(z) \end{aligned} \quad (10)$$

이때 두 개의 배열의 ij 채널 출력의 상호상관함수는 다음식과 같다.

$$C_{ij}(z) = (1/N_{i,j})Y_i(z^{-1})Y_j(z) \quad (11)$$

$$N_{i,j} \equiv \sum_u y_{i,u}^2 \sum_v y_{j,v}^2 \quad (12)$$

여기서, ij 채널에서의 정합필터 출력의 상호상관함수는 미지의 소음원 위치와 실험적 소음원 위치가 일치하는 점에서 최대값을 가지게 된다. 따라서 정합필터된 채널 출력들의 상호상관함수의 최대값을 갖는 위치를 구하여 소음원을 탐지하게 된다. 소음원 탐지의 정확도는 유사임펄스 응답의 정확도에 의해 좌우된다. 그리고 공간적인 분해능은 배열과 소음원 간의 상대위치와 소음원의 스펙트럼 특성 등에 따라서 좌우된다.

4. 수치모의실험 결과

정합필터를 적용하여 소음원의 위치탐지와 공간적 분해능 특성을 해석하기 위해 식 (9)와 (12)를 이용한 수치모의실험을 상하 경계면이 완전반사특성을 갖는 음향 공간에서 가우시안 백색잡음을 소음원으로 사용하여 수행하였다. 정합필터의 길이는 50 msec, 표본화율은 16 kHz로 하였다.

그림 4-1과 4-2는 소음원 탐지 수치실험결과를 보인다. [마이크로폰 배열 위치 (0,2,-1.0), (0,-2,-1.5) m]

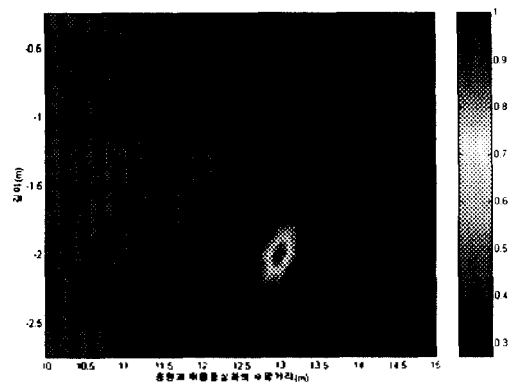


그림 4-1 소음원 1개인 경우 $[(x_s, y_s, z_s) = (13.0, -2)m]$

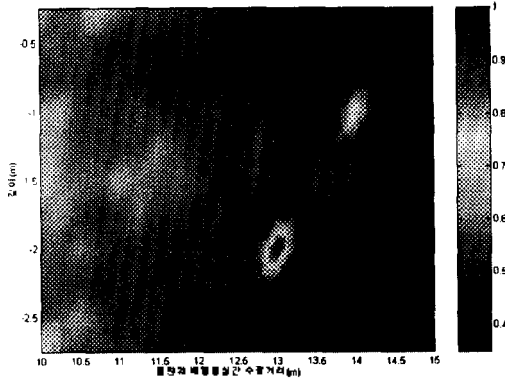


그림 4-2 소음원 2개인 경우
 [제1소음원 $(x_{s1}, y_{s1}, z_{s1}) = (13, 0, -2)m$]
 [제2소음원 $(x_{s2}, y_{s2}, z_{s2}) = (14, 0, -1)m$]

또한 수치모의실험 결과에서 소음원 위치와 배열 중심위차와의 경사각 φ 에 따른 공간 분해능은 그림 4-3 과 같이 나타났다.(배열위차 $\{(0, -0.5, -1.5), (0, 0.5, -1.5)m\}$, 배열중심과 소음원 간의 거리 3m로 일정)

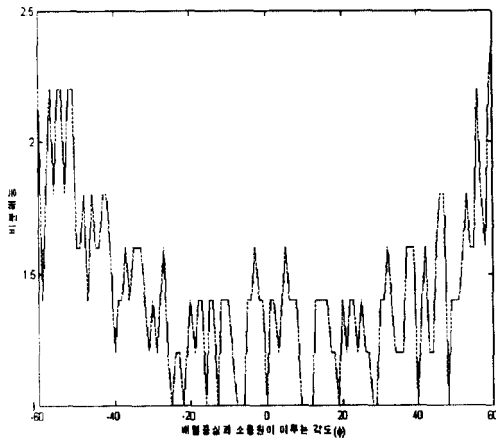


그림 4-3 소음원과 배열중심과의 상대위차각 φ 에 따른 공간 분해능 특성

여기서 경사각 φ 는 -60° 에서 $+60^\circ$ 의 범위를 가지고 1° 씩 증가하도록 하였다. 공간분해능은 최소분해능으로 균준화한 비분해능으로 나타내었고 주어진 실험조건에서 최솟분해능은 중심각 φ 가 0° 일 경우이다.

그림에서 보이는 바와 같이 중심각 φ 가 증가할수록 공간분해능이 열화되어 비분해능은 60° 위치에서 최대 약 2.4로 소음원과 배열중심간 거리가 3m인 주어진 실험조건에서 다수 음원을 탐지하는 경우 거리분해능은

60° 위치에서 최대 63cm인 것으로 해석할 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 정합필터 배열처리 기술을 응용하여 두 개의 마이크로폰 배열을 이용하는 음원탐지 기술에 대해 해석하였다. 소음원 1개인 경우 및 2개인 경우 음향공간의 임펄스 응답이 실제 응답에 가깝게 예측되는 경우 음원의 위치는 실제 위치로 정확히 예측될 수 있음을 보인다. 또한 복수의 소음원 탐지 성능분석 파라메타가 되는 공간 비분해능은 소음원과 배열중심간의 경사각 φ 가 증가할수록 증가하는 경향으로 소음원과 배열중심간의 거리가 3m, 경사각이 60° 인 경우 비분해능은 약 2.4이며 이때 거리분해능은 약 63cm이다.

결론적으로 제시하는 소음원 탐지기술은 화상회의 공간의 화자위치추적, 일반 음향공간에서의 소음원 탐지에 응용될 수 있을 것으로 판단된다.

후 기

본연구는 서울대 수중음향특화연구센터의 연구비 지원에 의한 것입니다. 관계자 여러분께 감사드립니다.

참고문헌

- [1] R.J. Renomeron, D.V. Rabinkin, J.C. French and J.L. Flanagan, "Small-scale matched filter array processing for spatially selective sound capture", 134th meeting of ASA, December 5, 1997.
- [2] H.F. Silverman, W.R. Patterson, J.L. Flanagan, and D.V. Rabinkin, "A digital processing system for source location and sound capture by large microphone arrays", ICASSP-97, Vol. 1, pp 251-254, 1997
- [3] D. Rabinkin, R. Renomeron, A. Dahl, J. French, M. Bianchi, and J. Flanagan. "A DSP implementation of source location using microphone arrays", SPIE Annual Meeting, 1996
- [4] M. S. Brandstein, J. E. Adcock, and H. F. Silverman, "A closed-form method for finding source locations from microphone-array time-delay estimates", ICASSP-95, Vol. 5, pp 3019-3022
- [5] C. Sydow, "Broadband beamforming for a microphone array", JASA, 96(2), pp 845-849, 1994
- [6] C. S. Clay and Saimu Li, "Time domain signal transmission and source location in a waveguide: Matched filter and deconvolution experiments", JASA, 83(4), pp 1377-1383, 1988.

- [7] S. Li and C. S. Clay, "Optimum time domain signal transmission and source location in a waveguide : experiments in an ideal wedge waveguide", JASA 82(4), pp 1409-1417, 1987.
- [8] C. S. Clay, "Optimum time domain signal transmission and source location in a waveguide", JASA, 81(3), pp 660-664, 1987.
- [9] J. L. Flanagan, J. D. Johnson, R. Zahn, and G. W. Elko, "Computer-steered microphone arrays for sound transduction in large rooms", JASA, 78(5), pp 1508-1518, 1985
- [10] E. C. Shang, "Passive harmonic source ranging in waveguides by using mode filter", JASA, 78(1), pp 172-175, 1985.
- [11] N. Aoshima. "Computer-generated pulse signal applied for sound measurement", JASA, 69(5), pp 1484-1488, 1981
- [12] Vijay K. Madisetti, Douglas B. Williams "The Digital Signal Processing Handbook", CRC Press, Ch-32, 1998.