

# 음향 홀로그래피에서 기준 마이크로폰 어레이가 빔형성 방법과 다중 신호 분리 방법에 미치는 영향

°이원혁\* • 이명준\*\* • 강연준\*\*\*

## The Effect of Reference Mic. Array Shape on MUSIC and Beamforming Methods in Acoustical Holography Wonhyuk Lee, Myung-joon Lee, Yeon June Kang

### ABSTRACT

In beamforming method, source positions are predicted by MUSIC (Multiple Signal Classification) power method and composite sound fields can then be decomposed into each partial field by beamforming, deterministically without restriction of the distance between reference microphones and sources. However, reference microphone array shape is important in both MUSIC and beamforming method. Thus the present paper describes the effect of the reference microphone array shape..

### 1. 서론

소음 문제를 다루는데 있어서 가장 중요한 것은 소음원의 위치나 음향 방사 특성을 정확히 알아내는 것이다. 이러한 정보들을 알아내는 방법으로 NAH (Nearfield Acoustical Holography) 가 있다 [1]. 이는 음원면을 둘러싸는 가까운 한 평면상에서의 음압을 측정함으로써 3 차원 전 공간상의 음향학적 변수들, 음압, 인텐시티, 총 음향 파워 등을 구할 수 있는 방법이다. 즉, 음원면에서의 음압 분포를 구해냄으로써 소음원의 위치나 음향 방사 특성들을 구해 낼 수 있고, 마찬가지로 원거리에서의 음향 방사 특성들을 구해 낼 수도 있게 된다.

그러나 NAH 방법은 음장이 상호 연관성이 있는 경우에만 적용할 수 있다. 이 방법은 음원을 둘러싼 한 평면상의 음압을 동시에 측정하는 것을 가정한다. 실제적으로 동시에 모든 점을 측정하는 것이 어려우므로 기준 마이크를 두어서 위상을 보정해줌으로써 여러 번 측정한 결과가 동시에 측정된 것과 같은 효과를 낼 수가 있다. 그러나 음장이 다수의 비 상관 음원들에 의해 만들어 지는 경

우, 측정면에서 서로 간섭하지 않는 다수의 위상 분포가 동시에 나타나게 되므로 앞서와 같은 위상 차를 알아내기는 불가능하다. 따라서 이 경우에는 전체 음장을 서로 상관적인 여러 개의 부분 음장들로 분리해 내는 과정이 필요하다.

이러한 부분 음장 분리 방법 중에 대표적인 것으로 부분 기역도 함수 방법(Partial Coherence Method)[2,3]과 특이치 분해 방법(SVD; Singular Value Decomposition Method)[4] 그리고 빔형성 방법 (beamforming method)[5,6,7]이 있다. 본 논문에서 다루고 있는 빔형성 방법으로 부분 음장을 분리해 내기 위해서는 먼저 다중 신호 분리(MUSIC; Multiple Signal Classification) 방법[8,9]을 이용하여 음원의 위치를 추정해 내고 다음으로, 추정된 위치 방향으로 빔형성 방법을 사용하여 각각의 비 상관 음원 신호들을 재구성한다. 마지막으로 재구성된 음원 신호의 기여량을 홀로그램 면에서 측정된 정보로부터 부분 음장을 분리해 낸다. 이러한 과정을 살펴볼 때, 다중 신호 분리 방법에서 음원의

\* 정회원, 서울대학교 기계항공공학부 대학원

\*\* 서울대학교 기계항공공학부 대학원

\*\*\*정회원, 서울대학교 기계항공공학부

위치를 정확하게 찾는 것은 매우 중요하다. 그러므로 본 논문에서는 음원의 수와 위치에 따라서 기준 마이크로폰 어레이의 형상이 다중 신호 분리 방법을 이용한 음원의 위치 추정에 어떠한 영향을 주는지 알아보고 부가적으로 빔 형성 방법을 이용해 분리된 부분 음장에 미치는 영향도 살펴보기로 하겠다..

## 2. 빔형성에 기초한 부분 음장 분리 방법

### 2.1 다중 신호 분리 방법을 이용한 음원의 위치 추정

기준 마이크로폰들로부터 받아들이는 신호의 상호 상관 함수 행렬을 특이치 분해하여 얻어진 특이값들 중에서 상대적으로 큰 값의 수로부터 비상관 음원의 수를 구할 수 있다.  $M$  개의 기준 마이크로폰을 사용하여 기준 마이크로폰의 개수보다 작은  $N$  개의 비상관 음원으로 구성된 음장을 측정하는 경우에 대하여 고려하면 기준 마이크로폰의 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} R_1(f) \\ \vdots \\ R_M(f) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} G_{11} & \cdots & G_{1N} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ G_{M1} & \cdots & G_{MN} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} S_1(f) \\ \vdots \\ S_N(f) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} n_1 \\ \vdots \\ n_M \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서  $R_i(f)$ ,  $S_j(f)$ 는 기준 마이크로폰들로 측정된 신호와 음원들의 신호를 각각 나타낸다.  $G_{ij}(f)$ 는 전달 함수로서 음원과 기준 마이크로폰 사이의 그런 함수이고  $n_i$ 는 백색 노이즈이다. 식 (1)을 간단한 형태로 표현하면 다음과 같다.

$$\mathbf{R}(f) = \mathbf{G}(f)\mathbf{S}(f) + \mathbf{n} = \mathbf{Q}(f) + \mathbf{n} \quad (2)$$

여기서  $\mathbf{Q}(f)$ 는 노이즈가 없을 때 기준 마이크로폰으로 측정된 신호를 나타낸다. 식 (2)에서 기준 마이크로폰들로부터 받아들이는 신호의 상호 상관 함수들을 표현하면 아래와 같이 음원의 상관 함수

행렬과 노이즈에 해당하는 행렬의 합으로 주어진다.

$$\begin{aligned} \mathbf{S}_{RR}(f) &= \mathbf{G}(f)\mathbf{S}_{SS}(f)\mathbf{G}(f)^H + \sigma_n^2\mathbf{I} \\ &= \mathbf{S}_{QQ}(f) + \sigma_n^2\mathbf{I} \end{aligned} \quad (3)$$

여기서  $\mathbf{S}_{RR}(f)$ 는 기준 마이크로폰들 사이의 상호 상관 함수,  $\mathbf{S}_{SS}(f)$ 는 음원들 사이의 상호 상관 함수,  $\mathbf{S}_{QQ}(f)$ 는 노이즈가 없을 때 기준 마이크로폰으로 측정된 신호들의 상호 상관 함수를 나타낸다. 그리고 특이치 분해 방법을 적용하면 아래와 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{S}_{RR}(f) = \mathbf{V}(\mathbf{\Lambda} + \sigma_n^2\mathbf{I})\mathbf{V}^H \quad (4)$$

$\mathbf{\Lambda}$ 는 실제 소음원의 수인  $N$  개의 특이값으로 구성된 대각 행렬이고  $\mathbf{V}$ 는 여기에 대응하는 고유 벡터들로 이루어진 행렬을 나타낸다.  $\sigma_n^2$ 으로 표현되는  $M-N$  개의 특이값은 노이즈에 해당된다. 이러한 노이즈에 해당하는 고유 벡터를 이용하여 노이즈 부분 공간을 만들어 내면 다음과 같다.

$$\mathbf{R}_{noise} = \sum_{n=N+1}^M \mathbf{v}_n \mathbf{v}_n^H \quad (5)$$

여기서  $\mathbf{v}_n$ 은  $n$  번째 고유 벡터이다. 다중 신호 분리 파워  $P_i$ 는 임의의 벡터  $\mathbf{a}$ 와 노이즈 부분 공간  $\mathbf{R}_{noise}$  과의 내적의 역으로 주어진다.

$$P_i = \frac{1}{\mathbf{a}^H \mathbf{R}_{noise} \mathbf{a}} \quad (6)$$

만일  $\mathbf{a}$ 가 노이즈 부분 공간과 직교하는 경우 다중 신호 분리 파워는 매우 큰 값을 갖게 된다. 임의의 벡터에 대해 다중 신호 분리 파워가 큰 값을 갖는다면 이 벡터는 음원의 고유 벡터를 나타내는 것으로 볼 수 있고 이 곳을 음원이 있는 곳으로 예측할 수 있다.

## 2.2 빔형성을 이용한 음원 신호의 재구성

빔형성 방법은 다중 신호 분리 방법을 이용하여 추정된 위치 방향으로 빔을 형성하여 전체 신호 중에서 그 방향에서 나오는 신호만을 추출하여 추출된 신호의 기여량으로부터 부분 음장 분리를 할 수 있게 된다.

아래 조건을 만족시키는 빔 형성 벡터  $\mathbf{a}_i$ 를 고려하자.

$$\text{subject to } \|\mathbf{a}_i\| = 1 \quad (7)$$

$$\text{maximize } \mathbf{a}_i \cdot \hat{\mathbf{g}}_i \quad (8)$$

$$\mathbf{a}_i \cdot \hat{\mathbf{g}}_j = 0 \quad \text{for } j \neq i \quad (9)$$

여기서 벡터  $\hat{\mathbf{g}}_i$ 는  $\mathbf{G}(f)$ 의  $i$  번째 열벡터이다. 벡터  $\mathbf{a}_i$ 는 원하지 않는 방향으로부터 방사되는 성분을 제거하고 원하는 방향 성분을 최대화 하는 역할을 한다. 얻어진 빔형성 벡터  $\mathbf{a}_i$ 를 이용하면 음원의 신호는 다음과 같은 과정으로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} Q(f)_{(i)} &= \mathbf{a}_i \begin{bmatrix} Q_1(f) \\ \vdots \\ Q_M(f) \end{bmatrix} = \mathbf{a}_i \cdot [\hat{\mathbf{g}}_1 \quad \dots \quad \hat{\mathbf{g}}_M] \mathbf{S}(f) \\ &= [0 \quad \dots \quad 0 \quad \mathbf{a}_i \cdot \hat{\mathbf{g}}_i \quad 0 \quad \dots \quad 0] \mathbf{S}(f) \quad (10) \\ &= c_i S_i(f) \end{aligned}$$

여기서  $c_i$ 는  $\mathbf{a}_i \cdot \hat{\mathbf{g}}_i$ 이다.

홀로그래프 면의 한 점에서 얻어진 음압  $Y^{(j)}(f)$ 는 식 (11)에 나타낸 바와 같이 식 (10)에서 구한 음원  $Q(f)_{(i)}$ 들의 선형 결합으로 나타낼 수 있다. 여러 번 같은 계산을 하여 전달 함수  $H^{(j)}(f)$ 들을 추정할 수 있다.

$$Y^{(j)}(f) = [Q(f)_{(1)} \quad \dots \quad Q(f)_{(N)}] \begin{bmatrix} H_1^{(j)}(f) \\ \vdots \\ H_N^{(j)}(f) \end{bmatrix} \quad (11)$$

전달 함수  $H^{(j)}(f)$ 들이 결정되면 다시 식 (11)에

서 각각의 부분 음장  $[Y^{(j)}(f)]_{(i)}$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$[Y^{(j)}(f)]_{(i)} = Q(f)_{(i)} H_i^{(j)}(f) \quad (12)$$

이러한 방법으로 홀로그래프 면의 모든 점에서 분리된 부분 음장들을 구할 수가 있다.

## 3. 기준 마이크로폰 어레이의 영향

### 3.1 수치 모의 실험

모의 실험의 기하학적 형상은 Fig.1 과 같이 구성되었다. 각 면의 크기는  $L_x = L_y = 0.75$  m 이며  $z_b = 0.10$  m 에 위치한 홀로그래프 면에서의 측정점 수는  $16 \times 16$  으로 하였다.  $z$  축의 위치는  $z_r = 0$  m 로 음원면에 동일하게 위치 시키고 기준 마이크로폰들 개수와 어레이의 형상은 Fig.2 와 같이 4 가지 경우로 구성하였지만 모든 실험에서  $z$  축의 위치는  $z_r = 0.20$  m 로 통일하였다. 사용하는 음원들은 백색 노이즈를 발생 시키는 비상관 단극 음원이며 800 Hz 에서 다중 신호 분리 방법을 이용한 위치 추정과 빔 형성 방법을 이용한 부분 음장 분리를 수행하였다.

첫번째 수치 모의 실험은 음원의 위치를 (-0.20 m, 0 m, 0 m), (0.20 m, 0 m, 0 m) 로 일차원으로 하였고 기준 마이크로폰들을 0.08 cm 간격으로 8 개를 일차 모양으로 위치 시켰다. Fig.3, Fig.4 는 각각 이 경우에 다중 신호 분리 방법에 의한 추정된 음원의 위치와 부분 음장을 나타낸다. 여기서 일차원 음원에 대해서는 일차원 기준 마이크로폰 어레이로 성공적으로 음원의 위치 추정과 부분 음장 분리를 할 수 있음을 확인할 수 있었다.

두번째 수치 모의 실험은 음원의 위치를 (-0.20 m, 0.15 m, 0 m), (0.20 m, -0.20 m, 0 m) 로 이차원으로 하였고 기준 마이크로폰 어레이는 첫번째 모의 실험

험과 같이 하였다. 다중 신호 분리 파워를 나타내는 Fig.5 에서 피크가 음원의 개수인 2 개가 뿐만 아니라 각각의 x 축 대칭 점에도 나타나 4 개가 있다. 이것은 다중 신호 분리 방법을 이용한 음원의 위치 추정이 기준 마이크론들로부터 받아들인 음원 신호들의 위상차를 이용한다는 것에서 기인한다. 즉, 이 실험에서 일차원 기준 마이크론 어레이는 y 축 방향의 위상차를 구분 할 수 없기 때문에 실제 음원의 위치로부터 받아들인 신호의 위상차와 같은, 음원의 x 축 대칭인 위치도 음원의 위치로 잘못 인식하게 되는 것이다. 그러나 이미 알고 있는 음원의 위치를 이용해 빔 형성 방법에 의한 부분 음장 분리를 적용하면 Fig.6 과 같이 정확한 결과를 얻게 된다. 이것은 음원의 위상차를 이용하는 다중 신호 분리 방법과는 달리 빔 형성 방법은 기준 마이크론으로부터 받아들인 신호를 바탕으로 음원 방향으로 빔형성 벡터를 형성하기 때문이다.

세번째 수치 모의 실험은 음원의 위치는 두번째 수치 모의 실험과 같고, 기준 마이크론 어레이는 기존의 가로 방향의 8 개의 마이크론에 세로 방향으로 8 cm 간격으로 8 개를 추가하여 2 차원 형상으로 하였다. 이 경우 Fig.7 에서 나타나듯 음원의 위치 파악이 성공적임을 확인 할 수 있다. 이것은 가로 방향의 일자 기준 마이크론 어레이를 사용하여 얻은 부족한 위상 정보를 세로 방향의 일자 기준 마이크론 어레이로 얻은 위상 정보로 보충하기 때문에 정확한 위치 추정이 가능한 것이다.

네번째 수치 모의 실험은 음원의 위치를 (-0.20 m, 0.20 m, 0 m), (0.20 m, 0.20 m, 0 m), (0 m, -0.20 m, 0 m)로 하였고, 기준 마이크론 어레이는 세번째 실험과 같이 하였다. Fig.8 은 다중 신호 분리 파워의 분포를 Fig.9 은 부분 음장을 나타낸다.

### 3.2 실제 실험

수치 모의 실험의 결과가 실제의 경우에도 적용되는지 알아보기 위해 무향실에서 실제 실험을 수행하였다. 이상적인 비상관 단극 음원들로 구현한 모의 실험과는 달리 비상관의 백색 노이즈를 발생하는 직경이 0.10 m 인 스피커들을 음원으로 사용한 것 외에는 모든 과정과 장치 구성은 수치 모의 실험과 동일하게 수행하였다.

첫번째 실험은 첫번째 모의실험과 동일하다. Fig.10 은 첫번째 실험의 다중 신호 분리 파워의 분포로 모의 실험처럼 뾰족하게 나오지는 않았지만 스피커의 중앙의 위치에서 최대값을 나타내고 있다. 이처럼 넓게 퍼진 모양이 나오는 이유는 기준 마이크론 어레이를 일차형으로 한 상태에서 단극 음원이 아닌 분포 음원을 사용하였기 때문이다. Fig.11 은 추정된 위치를 근거로 빔형성 방법을 사용하여 얻은 각각의 부분 음장들이다. 수치 모의 실험처럼 완벽하지는 않지만 훌륭하게 부분 음장들이 구현 되었음을 알 수 있다.

두번째 실험은 네번째 수치 모의 실험과 같은 장치 구성을 하였다. 다중 신호 분리 파워를 나타내는 Fig.12 와 빔형성 방법을 이용하여 분리해낸 각각의 부분 음장을 나타내는 Fig.13 은 모의 실험과 유사한 결과를 보여주고 있다.

## 4. 결론

다중 신호 분리 방법에 의한 음원의 위치 추정은 음원들과 기준 마이크론들 사이의 위상차에 의존하기 때문에 기준 마이크론 어레이의 형상에 민감함을 알 수 있었다. 그리고 모의 실험과 실험을 통해 이차원 형상의 기준 마이크론 어레이를 사용하는 것이 음원 위치 추정에 바람직함을 확인할 수 있었다. 한편 빔형성 방법을 이용한 부분 음장 분리는 음원과 기준 마이크론들 사이의

위상차가 아닌 벡터를 이용한 것이기 때문에 음원의 위치만 정확하게 주어진다면 기준 마이크로폰 어레이의 형상이 큰 영향을 미치지 않음을 알 수 있었다.

### 참고문헌

- (1) J.D. Maynard, E.G. Williams and Y. Lee, 1985, "Nearfield Acoustical Holography: I. Theory of Generalized Holography and the Development of NAH", *Journal of the Acoustical Society of America* 74 (4), pp. 1395-1413.
- (2) Hiroshi Takata, Takuo Nishi, Welkang Jiang and J. Stuart Bolton, 1997, "The Use of Nearfield Acoustical Holography(NAH) and Partial Field Decomposition to Identify and Quantify the Sources of Exterior Noise Radiated from Vehicle," *Proceedings of SAE 972053*, pp. 1449-1455.
- (3) Hyu-Sang Kwon and J. Stuart Bolton, 1998, "Partial Field Decomposition in Nearfield Acoustical Holography by the Use of Singular Value Decomposition and Partial Coherence Procedures," *Proceedings of NOISE-CON 98*, pp. 649-654.
- (4) D.L. Hallman and J. S. Bolton, 1994, "A Comparison of Multi-Reference Nearfield Acoustical Holography Procedures," *Proceedings of NOISE-CON 94*, pp. 929-934.
- (5) W.S. Burdic, 1984, *Underwater acoustic system analysis*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.
- (6) T.J. Shan and T. Kailath, 1985, "Adaptive Beamforming for Coherent Signals and Interference," *IEEE Transactions on Acoustics, Speech and Signal Processing*, Vol. ASSP 33 No. 3, pp. 527-536.
- (7) M.R. Bai and J. Lee, 1998, "Industrial Noise Source Identification by Using an Acoustic Beamforming System," *Transactions of ASME*, Vol 120, pp. 426-433.
- (8) R.O. Schmidt, 1986, "Multiple Emitter Location and Signal Parameter Estimation," *IEEE Transactions on Antennas and Propagation*, Vol. AP 34 No. 3, pp. 276-280.
- (9) Don H. Johnson and Dan E. Dudgeon, 1984, *Array Signal Processing : concepts and techniques*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ.

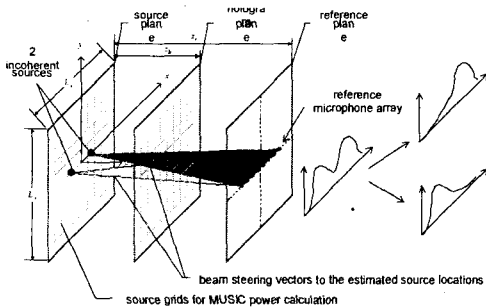


Fig.1 Beamforming-based partial field decomposition

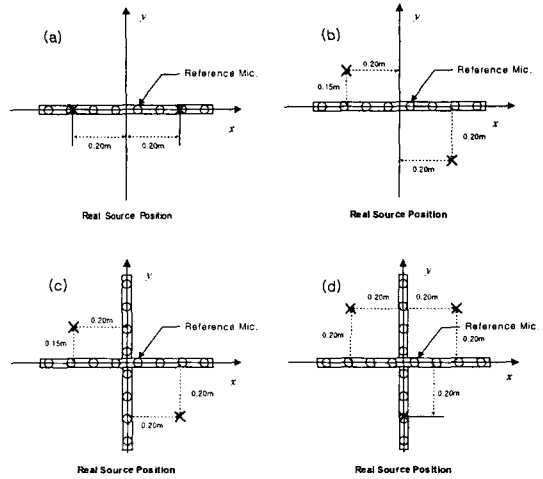


Fig.2 Various shapes of microphone array

- (a) 1<sup>st</sup> simulation setup (b) 2<sup>nd</sup> simulation setup  
(c) 3<sup>rd</sup> simulation setup (d) 4<sup>th</sup> simulation setup

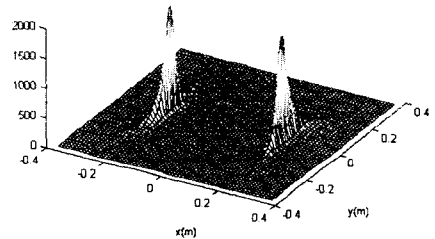


Fig.3 MUSIC power distribution of 1<sup>st</sup> simulation

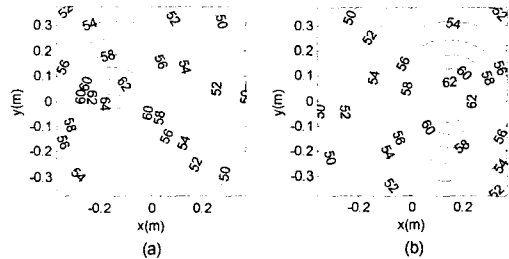


Fig.4 Pressure distributions of (a) source 1 and (b) source 2 that are reconstructed by beamforming-based partial field decomposition

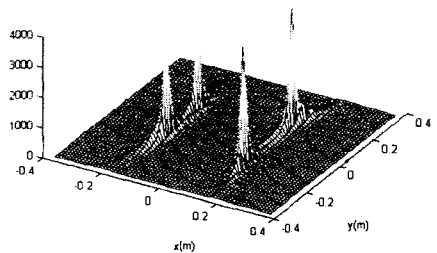


Fig.5 MUSIC power distribution of 2<sup>nd</sup> simulation

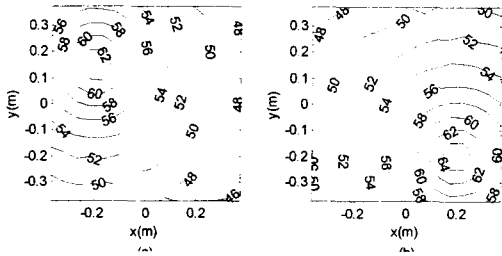


Fig.6 Pressure distributions of (a) source 1 and (b) source 2 that are reconstructed by beamforming-based partial field decomposition

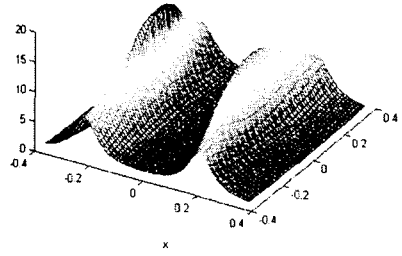


Fig.10 MUSIC power distribution of 1<sup>st</sup> experiment

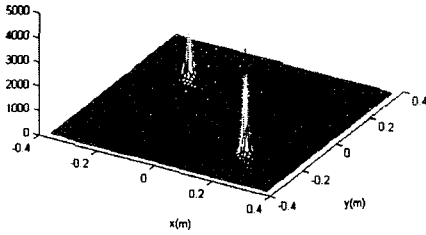


Fig.7 MUSIC power distribution of 3<sup>rd</sup> simulation

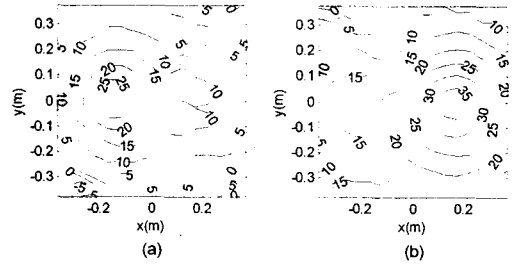


Fig.11 Pressure distributions of (a) source 1 and (b) source 2 that are reconstructed by beamforming-based partial field decomposition

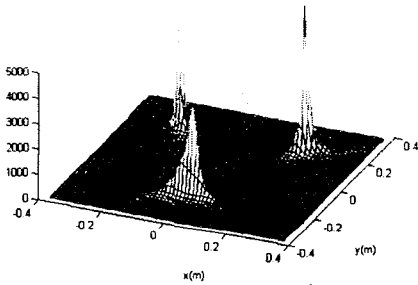


Fig.8 MUSIC power distribution of 4<sup>th</sup> simulation

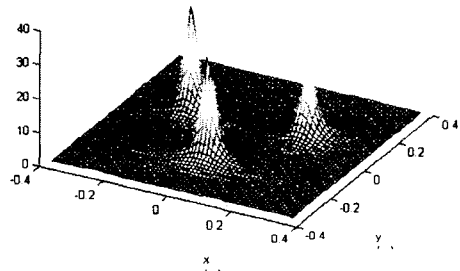


Fig.12 MUSIC power distribution of 2<sup>nd</sup> experiment

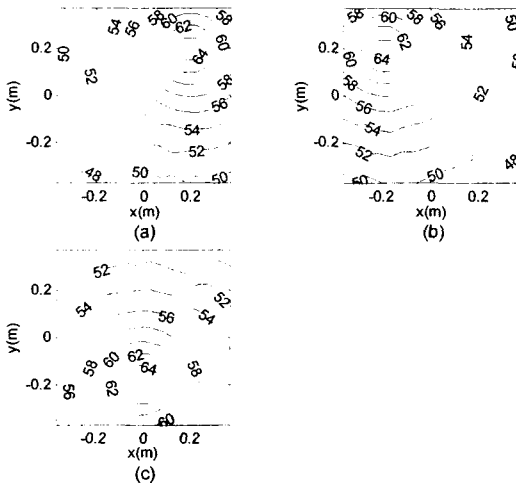


Fig.9 Pressure distributions of (a) source 1, (b) source 2 and (c) source 3 that are reconstructed by beamforming-based partial field decomposition

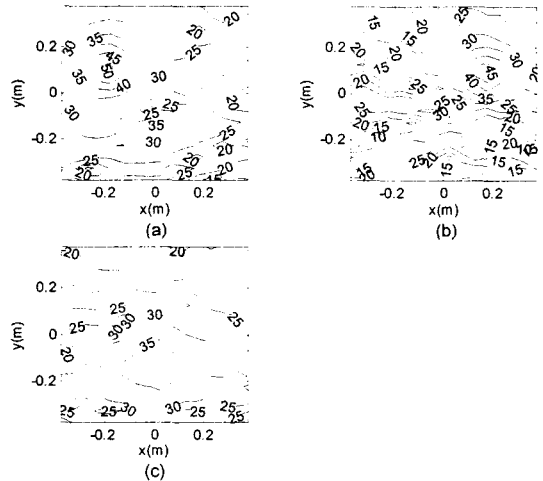


Fig.13 Pressure distributions of (a) source 1, (b) source 2 and (c) source 3 that are reconstructed by beamforming-based partial field decomposition