

# 반사파가 존재할 때 음향홀로그래피에서 빔형성 방법을 이용한 부분음장 분리

°이원혁\* • 강연준\*\*

## Partial field decomposition using beamforming-based NAH under reflective condition

Wonhyuk Lee\* and Yeon June Kang\*\*

### ABSTRACT

The theory of NAH is based on the assumption of reflection free. However, it is not always possible to meet this condition in many practical cases. Thus, a decomposition of direct and reflected fields is needed to apply NAH to reflective condition for noise problems. In addition, the decomposition of direct and reflected field can give acoustic characteristics of reflecting surfaces. This paper presents that in this condition the decomposition can also be successfully done by MUSIC(Multiple Signal Classification) power method and beamforming method, and that numerical simulation and real experiments verify its performance.

### 1. 서론

소음 문제 해결을 위해 소음원의 위치나 음향 방사 특성을 정확히 알아내기 위한 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 자유음장 조건이 만족되어야 하므로 반사파가 존재하는, 많은 실제적인 경우에 직접 적용을 할 수는 없는 한계를 가진다. 그러므로 NAH 의 적용을 위해서는 직접파와 반사파를 분리해내는 과정이 필요하게 된다. 일반적으로 반사파와 직접파를 분리하는 것은 반사계수를 모르는 면이 존재할 때 임의의 면에서 음장의 재구성을 위해서나 반사면의 반사계수 측정하기 위

해서 이다. 후자만을 위한 방법으로 Spatial transform method[2] 가 있으나 이것은 음원면에 평행한 두면에서 음압 정보를 측정하는 것이 필요하므로 실제 실험 과정에 어려움이 있고 전자의 목적을 직접적으로 충족 시킬 수 없다. 본 연구에서는 이미지 음원과 빔형성에 기초한 음향 홀로그래피[3]를 이용해 직접음장과 반사음장의 분리를 수행 함으로서 앞에서 언급한 두 가지 목적을 동시에 충족시키고자 한다. 또한 이 방법은 하나의 평면에서 음압 정보만을 필요로 하므로 실제 그 수행이 용이한 장점도 있다.

본 논문에서 다루고 있는 빔형성 방법에서는 부분 음장을 분리해 내기 위해서는 먼저 다중 신호 분리(MUSIC ; Multiple Signal Classification) 방법[4]을 이용하여 음원의 위치를 추정하고 이것을 토대로 이미지 음원의 위치를 설정한다. 다음으로, 추정된 위치 방향으로 빔형성 방법[5,6,7]을 사용하여 음원에서 오는 신호와 반사된 신호, 즉 이미지 음원의 신호를 각각 재구성한다. 그리고 재구성된 음원 신호의 기여량을 홀로그램 면에서 측정된 정

\* 정희원, 서울대학교 기계항공공학부 대학원

\*\* 정희원, 서울대학교 기계항공공학부

보로부터 부분 음장을 분리해 낸다. 그리고 전달 함수를 통해 임의의 원하는 면에서의 음장을 얻을 수 있다. 또한 부가적으로 이 정보로부터 반사면의 반사계수 및 흡음율 등의 음향학적 성질도 얻을 수 있다.

## 2. 빔형성에 기초한 부분 음장 분리 방법

### 2.1 MUSIC 을 이용한 음원의 위치 추정

기준 마이크로폰들로부터 받아들인 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 음원으로 구성된 음장을 측정하는 경우에 대하여 고려하면 기준 마이크로폰의 신호는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\mathbf{R}(f) = \mathbf{G}(f)\mathbf{S}(f) + \mathbf{n} = \mathbf{Q}(f) + \mathbf{n} \quad (1)$$

여기서  $\mathbf{R}(f)$ ,  $\mathbf{S}(f)$  는 기준 마이크로폰들로 측정된 신호와 음원들의 신호를 각각 나타낸다.  $\mathbf{G}(f)$  는 전달 함수로서 음원과 기준 마이크로폰 사이의 그린 함수이고  $\mathbf{n}$  는 백색 노이즈이다. 여기서  $\mathbf{Q}(f)$  는 노이즈가 없을 때 기준 마이크로폰으로 측정된 신호를 나타낸다. 식 (1)에서 기준 마이크로폰들로부터 받아들인 신호의 상호 상관 함수들을 표현하면 아래와 같이 음원의 상관 함수 행렬과 노이즈에 해당하는 행렬의 합으로 주어진다.

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

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.

$$\mathbf{S}_{RR}(f) = \mathbf{V}(\mathbf{\Lambda} + \sigma_n^2\mathbf{I})\mathbf{V}^H \quad (3)$$

$\mathbf{\Lambda}$  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.

$$\mathbf{R}_{noise} = \sum_{n=N+1}^M \mathbf{v}_n \mathbf{v}_n^H \quad (4)$$

여기서  $\mathbf{v}_n$  은  $n$  번째 고유 벡터이다. 다중 신호 분리 파워  $p_i$  는 다음과 같다.

$$P_i = \frac{1}{\mathbf{a}^H \mathbf{R}_{noise} \mathbf{a}} \quad (5)$$

만일 임의의 벡터  $\mathbf{a}$  가 노이즈 부분 공간과 직교하는 경우 다중 신호 분리 파워는 매우 큰 값을 갖게 되며, 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 방법을 통해 다중 신호 분리 방법으로 추정된 음원의 위치와 이를 통해 설정된 이미지 음원의 위치에서 나오는 신호를 추출하여, 추출된 신호의 기여량으로부터 부분 음장 분리를 할 수 있게 된다.

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

$$\text{subject to } \|\mathbf{a}_i\| = 1 \quad (6)$$

$$\text{maximize } \mathbf{a}_i \cdot \hat{\mathbf{g}}_i \quad (7)$$

$$\mathbf{a}_i \cdot \hat{\mathbf{g}}_j = 0 \quad \text{for } j \neq i \quad (8)$$

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 최대로 하는 역할을 한다. 얻어진 빔형성 벡터  $\mathbf{a}_i$ 를 이용하면 음원의 신호는 다음과 같은 과정으로 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} Q(f)_{(i)} &= \mathbf{a}_i \begin{bmatrix} Q_1(f) \\ \vdots \\ Q_M(f) \end{bmatrix} = \mathbf{a}_i \cdot [\hat{\mathbf{g}}_1 \quad \dots \quad \hat{\mathbf{g}}_N] \mathbf{S}(f) \\ &= [0 \quad \dots \quad 0 \quad \mathbf{a}_i \cdot \hat{\mathbf{g}}_i \quad 0 \quad \dots \quad 0] \mathbf{S}(f) \quad (9) \\ &= c_i S_i(f) \end{aligned}$$

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

홀로그래프 면의 한 점에서 얻어진 음압  $Y^{(j)}(f)$ 는 식 (10)에 나타낸 바와 같이 전달 함수  $H^{(j)}(f)$ 와 식 (9)에서 구한 음원  $Q(f)_{(i)}$ 들의 선형 결합으로 나타낼 수 있다.

$$Y^{(j)}(f) = [Q(f)_{(1)} \quad \dots \quad Q(f)_{(M)}] \begin{bmatrix} H_1^{(j)}(f) \\ \vdots \\ H_N^{(j)}(f) \end{bmatrix} \quad (10)$$

전달 함수  $H^{(j)}(f)$ 들이 결정되면 다시 식 (11)에서 각각의 부분 음장  $[Y^{(j)}(f)]_{(i)}$ 를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$[Y^{(j)}(f)]_{(i)} = Q(f)_{(i)} H_i^{(j)}(f) \quad (11)$$

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

### 2.3 이미지 음원의 적용

음원에서 직접방사 되는 신호와 반사면에서 반사된 신호가 유한한 상관계수를 가지지만, MUSIC

power에 의해 실제음원의 위치 및 반사된 신호를 방사한다고 가정한 이미지 음원의 위치가 모두 파악되며, 기준 마이크로폰 신호의 상호 상관 함수 행렬을 특이치 분해하여 얻어진 특이값들의 대소로 실제 음원의 갯수를 알 수 있다. 그리고 빔형성 방법을 통해 얻어진 실제 음원의 위치와 가상 음원의 위치에서 오는 신호만을 추출하여 직접음장과 반사음장의 분리가 가능하다.

## 3. 수치모의 실험과 실제실험 결과

### 3.1 수치 모의 실험

모의 실험의 기하학적 형상은 Fig.1과 같다. 반사면은  $z=0$  m에 두고, 홀로그래프면은 크기가  $L_x=L_y=0.375$  m이며  $z_h=0.05$  m에 위치하고 측정점 수는  $16 \times 16$ 으로 하였다. 백색 노이즈를 발생시키는 음원은 (0 m, 0 m, 0.07 m)에 위치에 두었다. 기준 마이크로폰은 8개로 어레이 형상은 Fig.2와 같고,  $z$  축의 위상 정보를 파악하기 위해  $xy$  평면과  $30^\circ$ 를 이루게 기울여  $z_r=0.2$  m에 배치하였다. 그리고 편의상 수치모의 실험 및 실제 실험에서 모두 800 Hz의 실험결과를 실행했다.

반사면의 완전 반사를 가정한 수치모의실험의 경우, Fig.3에서 볼 수 있듯이 MUSIC power는 실제 음원과 이미지 음원의 위치를 정확히 파악했다. 그리고 Fig.4에 나타나듯 빔형성에 의한 홀로그래프면에서 직접음장과 반사음장 분리 역시 성공적임을 확인할 수 있다.

### 3.2 실제 실험

수치 모의 실험의 결과를 검증하기 위해 몇 가지 재료의 반사면의 경우에 대해 무향실에서 실제 실험을 수행하였다. 이상적인 비상관 단극 음원으로 구현한 모의 실험과는 달리 비상관의 백색 노이즈를 발생하는 직경이 0.1 m인 스피커를 음원의

로 사용한 것 외에는 모든 과정과 장치 구성은 수  
치 모의 실험과 동일하게 하였다.

첫번째 실험은 두께 10 mm 의 flexiglass 를 반사  
면으로 한 경우이다. Fig.5 와 Fig.6 에서 볼 수 있  
듯 음원의 위치 파악과 부분음장 분리 모두 잘 이  
루어졌음을 확인할 수 있다.

두번째 실험은 두께 20 mm 의 폼을 flexiglass 앞  
에 대어 반사면을 구성한 경우에 행해졌다. Fig.7,  
Fig.8 은 각각 MUSIC power 와 분리된 부분음장을  
나타내고 있다.

세번째 실험에서는 두께 10 mm 의 펠트를  
flexiglass 앞에 대어 반사면을 구성했다. 이 경우에  
도 Fig.9, Fig.10 에서 볼 수 있듯이 음원의 위치파  
악과 부분음장분리가 성공적으로 행해졌음을 확인  
할 수 있다.

#### 4. 부분음장분리의 응용

서론에서 언급했듯 우선 분리된 직접파와 반사  
파를 이용해 원하는 임의의 면에서 직접음장과  
반사음장을 재구성 해낼 수가 있다. Fig.11 은 세번  
째 실험에서  $z = 0.4$  m 에서 직접음장과 반사음장  
을 재구성한 것이다. 이러한 정보는 반사면이 존  
재하는 경우 원하는 지점에서 소음문제 해결에 적  
용될 수 있다.

두 번째로 반사계수나 흡음률 등 반사면의 음  
향학적 정보를 얻는데도 이용할 수 있다. 예를 들  
어 반사계수는 직접파와 반사파의 음압의 비로 주  
어지고 음원에서 가까운 위치에서는 거리나 입사  
각에 따라 변동 폭이 매우크나 음원에서 떨어진  
거리에서는 변동폭이 작아진다[2]. 이러한 이유로  
앞의 far filed 에서 재구성된 음장을 이용하여 반사  
계수 등 반사면의 음향학적 정보를 얻을 수 있다.

#### 5. 결론

이미지 음원과 다중신호분리방법 그리고, 빔형  
성 방법을 이용하여 반사면이 존재하는 경우에 직  
접음장과 반사음장의 분리가 가능 함을 확인할 수  
있었다. 이러한 음장분리는 소음문제 해결을 위한  
임의의 위치에서 음장의 재구성이나 반사면의 음  
향학적 특성파악에 이용될 수 있는 점에서 그 활  
용도가 있다고 할 수 있다.

#### 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) M. Tamura , 1990, "Spatial Fourier transform method of measuring reflection coefficient at oblique incidence. I: Theory and numerical examples", *Journal of the Acoustical Society of America* 88 (5), pp. 2259-2264
- (3) W. H. Lee, E. H. Hwang, Y. J. Kang, 2001, "Beamforming-based partial field decomposition in nearfield acoustical holography," *Proceedings of ICSV* pp. 155-160.
- (4) Don H. Johnson and Dan E. Dudgeon, 1984, *Array Signal Processing : concepts and techniques*, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ
- (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.

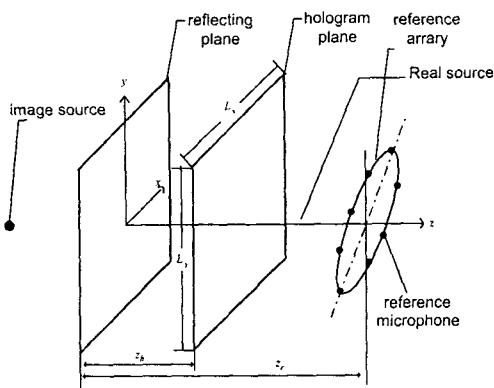


Fig.1 Schematic diagram of simulation setup

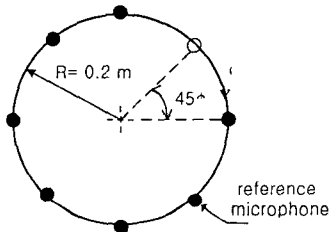


Fig.2 Shape of reference microphone array

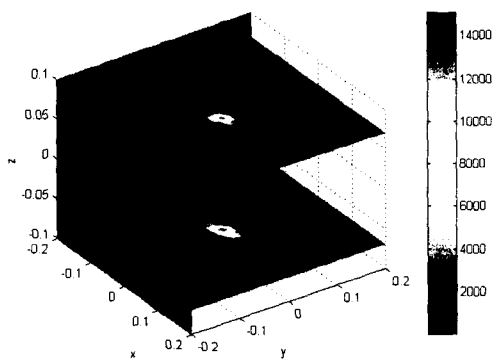


Fig.3 3D MUSIC power distribution of simulation

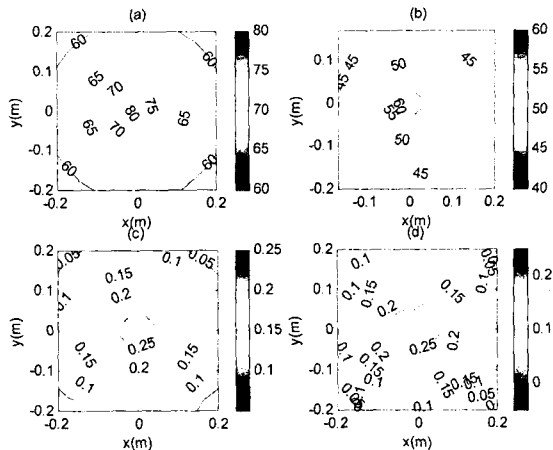


Fig.4 Pressure distributions of simulation  
(a) magnitude of real source (c) phase of real source  
(b) magnitude of image source (d) phase of image source

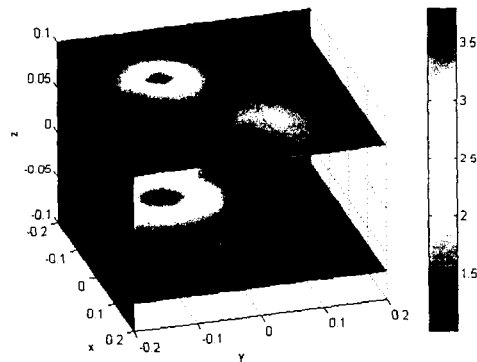


Fig.5 MUSIC power distribution of 1<sup>st</sup> experiment

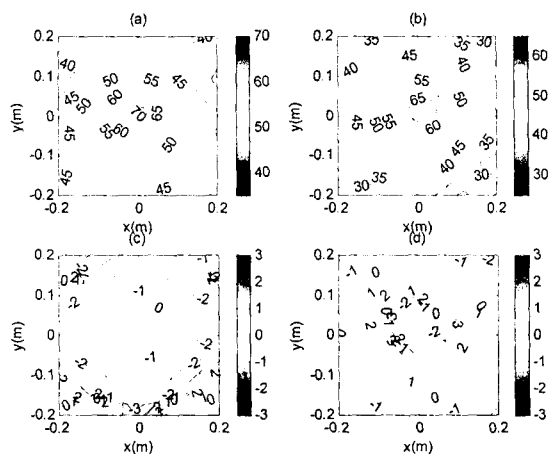


Fig.6 Pressure distributions of 1<sup>st</sup> experiment  
(a) magnitude of real source (c) phase of real source  
(b) magnitude of image source (d) phase of image source

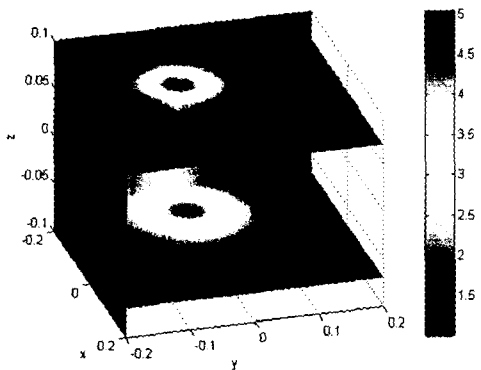


Fig.7 MUSIC power distribution of 2<sup>nd</sup> experiment

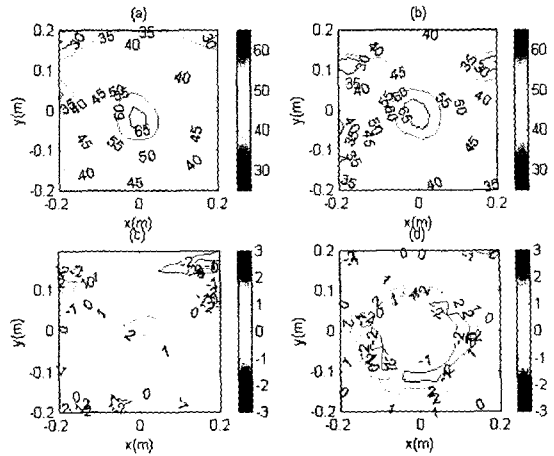


Fig.10 Pressure distributions of 3<sup>rd</sup> experiment  
 (a) magnitude of real source (c) phase of real source  
 (b) magnitude of image source (d) phase of image source

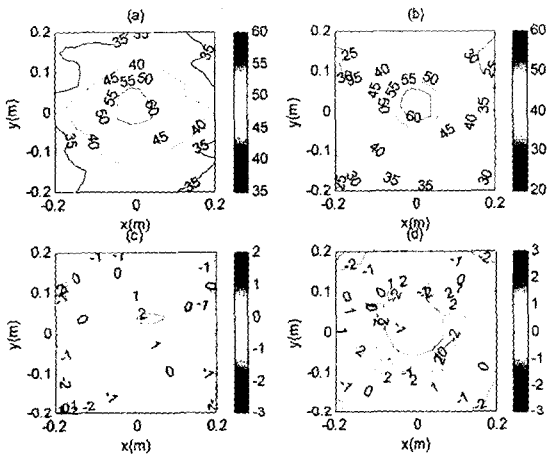


Fig.8 Pressure distributions of 2<sup>nd</sup> experiment  
 (a) magnitude of real source (c) phase of real source  
 (b) magnitude of image source (d) phase of image source

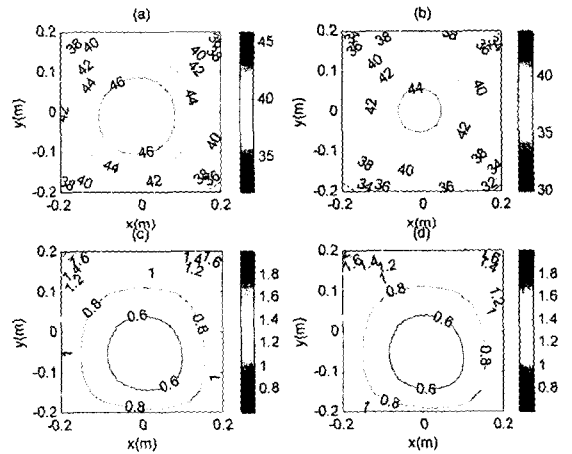


Fig.11 Pressure distributions at 0.4 m from the source  
 (a) magnitude of real source (c) phase of real source  
 (b) magnitude of image source (d) phase of image source

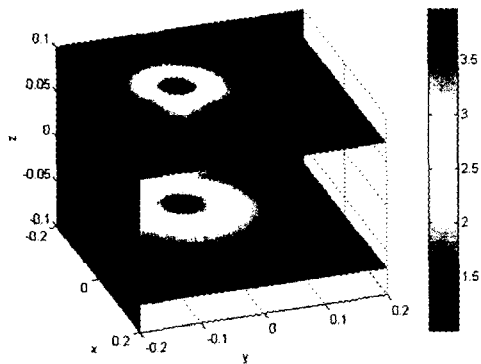


Fig.9 MUSIC power distribution of 3<sup>rd</sup> experiment