

소음 기여량 분석 방법의 HDD 적용에의 문제점

Problems of noise contribution analysis for HDD noise abatement

°조 성 호*, 남 경 옥*, 김 양 한**

ABSTRACT

The extensive increase of the rotating speed of HDD (hard disk drive) has improved the performance of HDD. One of drawbacks, however, is that it increase noise level. For the systematic noise control of HDD, it is important to know the way in which each source of HDD contributes to resulting noise. A conventional method for contribution analysis by using statistical information, however, is not proper for HDD. This paper reviews the conventional method, and explains the reason why the method is not proper for HDD, even though it is possible to find the number of independent sources by using statistical information. This paper also shows an experimental result for the identification of the number of independent sources of HDD.

1. 서 론

정보 저장 장치인 HDD(Hard Disk Drive)의 고성능화는 디스크 드라이브의 고속화와 함께 이루어져 왔다. 그러나 이러한 고속화는 구조적인 불안정을 야기시켜 다양한 원인과 경로를 통해 소음을 발생시킨다. 반면에 소음 규제는 더욱 엄격해지고 있어 이에 따른 체계적인 소음 저감이 요구된다⁽¹⁾. HDD의 동작 중 발생하는 각각의 소음원이 관심 영역에서의 소음에 얼마나 기여하는 지를 아는 것은 이러한 체계적인 소음 저감을 위하여 중요하다.

각 소음원의 기여량은 각각의 소음원이 서로 다른 주파수 영역에서 구동할 때는 비교적 쉽게 구할 수 있다. 그러나 같은 주파수 대역이라면 문제는 더 어려워지게 되는데, 이 경우에 적용할 수

있는 대표적인 방법이 통계적 특성 차이를 이용한 방법이다⁽²⁾. 이 방법은 각각의 소음원들이 독립적으로 구동되어 완전 비상관(incoherent)인 경우에 각 소음원의 통계적 특성을 대표할 수 있는 신호를 측정하여 기여량을 구한다. 이와 관련하여 부분 기여도 함수⁽³⁾나 가상 기여도 함수⁽⁴⁾ 방법 등도 적용 가능성을 검토할 수 있으나, 이러한 방법들은 스피들 모터의 진동과 디스크에 의한 공력 소음 등이 소음의 원인이라고 생각되는 HDD에서는 적용하기가 매우 어렵다.

본 논문은 이러한 이유를 체계적으로 보이고, 그에 대한 대안을 추상적이거나 서술한다. 한편 단순히 통계적인 특성만을 이용하는 방법은 기여량을 구하는 데는 한계가 있지만 독립적인 소음원의 개수를 구하는 것은 어느 정도 가능성이 있음을 보인다.

* 한국과학기술원 기계공학과 박사과정

** 한국과학기술원 기계공학과

II. 벡터 표기와 기여량 분석 방법

II.1 스펙트럴 벡터의 정의

본 절은 통계적 특성 차이를 이용한 기여량 분석 방법의 문제 정의를 쉽게 하고자 벡터 표기^(4,5)를 도입한다.

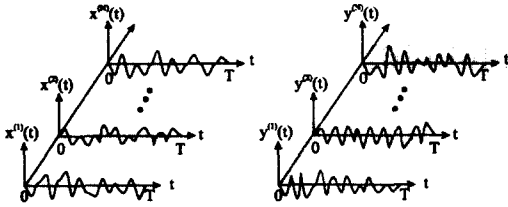


Fig. 1 Time records of two stationary random signal $x(t)$ and $y(t)$

랜덤하며 정상(stationary) 신호인 두 개의 $x(t)$ 와 $y(t)$ 를 생각하자. 이 신호들은 Fig. 1과 같이 0초부터 T초까지 동시에 측정된 N개의 시간 기록들을 갖는다. 각 시간 기록의 유한한 푸리에 변환⁽²⁾을 $x^{(1)}(f), \dots, x^{(N)}(f)$ 와 $y^{(1)}(f), \dots, y^{(N)}(f)$ 라고 하자. 만약 T와 N이 충분히 크다면, 특정 주파수에서 두 신호의 스펙트럼들은

$$s_{xx} = \frac{1}{NT} \sum_{i=1}^N x^{(i)*} x^{(i)}, \quad s_{yy} = \frac{1}{NT} \sum_{i=1}^N y^{(i)*} y^{(i)},$$

$$s_{xy} = \frac{1}{NT} \sum_{i=1}^N x^{(i)*} y^{(i)} \quad (1)$$

과 같이 쓸 수 있다. 위 첨자 '*'는 공액 복소수 또는 공액 전치 연산을 나타낸다. 위 식에서 주파수를 나타내는 f는 생략되었다.

이제 $x^{(i)}$ 와 $y^{(i)}$ 들로 구성된

$$\bar{x} = \frac{1}{\sqrt{NT}} [x^{(1)} \dots x^{(N)}]^T, \quad \bar{y} = \frac{1}{\sqrt{NT}} [y^{(1)} \dots y^{(N)}]^T \quad (2)$$

와 같은 스펙트럴 벡터들을 생각하자. 위 첨자 'T'는 전치 연산을 나타낸다. 이 벡터들을 사용하면, 식 (1)의 스펙트럼들은

$$s_{xx} = \bar{x}^* \bar{x}, \quad s_{yy} = \bar{y}^* \bar{y}, \quad s_{xy} = \bar{x}^* \bar{y} \quad (3)$$

와 같이 각 벡터 간의 내적으로 표현할 수 있다.

두 신호의 상관 정도를 나타내는 기여도 함수

(coherence function)는

$$\gamma_{xy}^2 = \frac{|s_{xy}|^2}{s_{xx} s_{yy}} = \frac{|\bar{x}^* \bar{y}|^2}{(\bar{x}^* \bar{x})(\bar{y}^* \bar{y})} \quad (4)$$

와 같이 쓸 수 있다. 각 벡터의 모든 항이 실수이고 두 벡터가 이루는 각이 θ 라면, 위의 기여도 함수는 $\cos^2 \theta$ 가 된다. 따라서 기여도 함수는 두 벡터의 방향이 얼마나 근접한가에 대한 척도라고 할 수 있다. 기여도 함수가 1이면 두 벡터는 선형 종속 관계에 있고, 0이면 서로 직교한다.

II.2 기여량 분석 방법

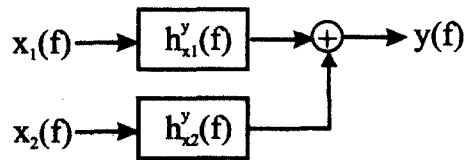


Fig. 2 A two-input and single-output system

Fig. 2와 같이 2개의 입력과 1개의 출력으로 구성된 계를 생각하자. x_1 과 x_2 는 입력 신호들을, y 는 출력 신호를, $h_{x_1}^y$ 과 $h_{x_2}^y$ 는 각 입력 신호와 출력 신호 사이의 전달 함수를 나타낸다. 이 경우 출력 y 는

$$y = h_{x_1}^y x_1 + h_{x_2}^y x_2 \quad (5)$$

와 같이 쓸 수 있다. 이 신호들이 정상 신호라면 앞 절과 유사하게 \bar{x}_1 , \bar{x}_2 , \bar{y} 들을 정의할 수 있다. 측정 시간 T가 충분히 길다면, 식 (5)는 정의된 벡터의 모든 항에 대해 성립하므로 다시

$$\bar{y} = h_{x_1}^y \bar{x}_1 + h_{x_2}^y \bar{x}_2 \quad (6)$$

와 같이 쓸 수 있다. 식 (6)은 출력 벡터가 두 입력 벡터의 선형 조합으로 표현됨을 의미한다.

이제 두 개의 입력 x_1 , x_2 가 서로 다른 원인에 의해 구동 되어 완전 비상관(incoherent)인 경우를 생각하자. 즉 \bar{x}_1 과 \bar{x}_2 가 서로 직교한다고 가정한다. 이 경우 출력 신호의 자기 스펙트럼은 식 (6)의 내적에 의해

$$s_{yy} = h_{x_1}^y |s_{x_1x_1}| + h_{x_2}^y |s_{x_2x_2}| \quad (7)$$

와 같이 쓸 수 있다. 위 식에서 첫번째 항은 출력 스펙트럼에 대한 첫번째 입력의 기여량을, 두번째 항은 두번째 입력의 기여량을 나타낸다.

이 기여량들은 Fig. 3에서 보듯이 \bar{y} 를 두 입력 \bar{x}_1 , \bar{x}_2 에 사영(projection)시켜 얻을 수 있다. 이는 두 입력과 출력을 동시에 측정한다면, 각 입력의 기여량을 구할 수 있음을 의미한다. 또한 굳이 입력 신호를 직접 측정하지 않더라도 입력 신호와 완전 상관 관계(coherent)에 있는, 즉 벡터의 방향이 같은 신호를 측정한다면, 각 입력의 기여량을 구할 수 있다. 이것이 자유 음장 등에서 기여량 분석을 위해 소음원 근처에서 음압을 측정하는 이유이다⁽⁶⁾. 세 개 이상의 소음원이 존재하는 경우에도 유사하게 생각할 수 있다.

부분 기여도 함수⁽²⁾와 가상 기여도 함수⁽³⁾ 방법은 이러한 통계적 특성을 이용한 방법을 보완하는 성격을 가진다고 할 수 있다.

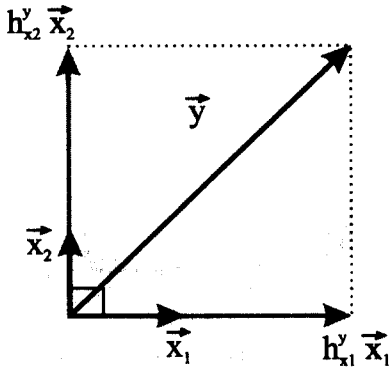


Fig. 3 The expression of output vector by two input vectors

III. HDD 적용에서의 문제점

앞절에서 소음원들의 통계적 특성 차이(완전 비상관)를 이용한 기여량 분석 방법은 각각의 소음원들과 완전 상관 관계가 있는 신호를 측정함으로써 수행할 수 있음을 보았다.

하지만 외부로 방사되는 소음이 스피너 모터의 진동과 디스크에 의한 공력 소음으로 추정되는 HDD에서는 각각의 소음원들과 완전 상관관계가

있는 신호를 측정하기는 어렵다. 이는 HDD의 소음원들이 작은 케이스 안에 밀집되 존재하기 때문이다.

일단 외부에서 소음을 측정하거나 케이스 표면에서 진동을 측정하는 경우를 생각하자. 이 경우 작은 케이스 안에 소음원들이 모여 있으므로 측정된 신호에는 하나의 소음원의 영향만 지배적으로 나타나는 것이 아니라 다른 소음원의 영향도 같이 나타나므로 하나의 소음원에만 완전 상관(coherent)인 신호를 얻을 수는 없다. 따라서 케이스 외부에서의 측정 신호를 이용하여 기여량 분석을 하는 것은 불가능하다.

케이스 내부에서 측정하는 것은 우선 그 작업이 어려울 뿐만 아니라 마찬가지로 소음원이 밀집된 상태이므로 하나의 소음원만이 지배적인 신호를 얻을 수 있다고 보장하지 않는다.

따라서 단순히 각 소음원과 완전 상관인 신호를 측정하여 소음 기여량을 분석하는 것은 HDD에서는 어려운 일이라 생각된다.

한가지 대안은 각 소음원의 통계적인 특성 차이뿐만 아니라 각 소음원에 의해 형성되는 음장이나 케이스에서 형성되는 진동장의 차이를 이용하는 것이다. 이러한 방법은 최근 음향 홀로그래피에서 기여량 분석을 위해 시도⁽⁹⁾되었으나 아직은 점음원처럼 단순한 소음원에 적용되었을 뿐이다. 그러나 기여량 분석을 위해서는 결국 두 소음원의 차이점을 이용해야 하므로 음장에서의 차이를 이용하는 것은 HDD에서도 적극 고려되어야 할 것으로 생각된다.

IV. 독립적인 소음원 개수의 파악

IV.1 이론적 배경

HDD에서는 신호의 통계적인 특성만을 이용하여 각 소음원의 기여량을 구하는 것은 불가능하다.라도 몇 개의 소음원이 각 주파수별로 존재하는지를 파악하는 것은 어느 정도 가능하다.

Fig. 4와 같은 실험 장치를 생각하자. 이 경우 만약 두 개의 소음원 \bar{x}_1 과 \bar{x}_2 가 있다면, 외부에서 측정되는 스펙트럴 벡터 \bar{r}_1 , \bar{r}_2 , \bar{r}_3 , \bar{r}_4 (기준 신호들)는 모두 \bar{x}_1 과 \bar{x}_2 의 선형 조합에 의해 형성

된다. 즉 모든 측정 벡터들은 2 차원의 벡터 공간에 놓이게 된다. 따라서, 이 경우

$$R = [\vec{r}_1 \vec{r}_2 \vec{r}_3 \vec{r}_4] \quad (8)$$

와 같이 정의된 행렬 R의 랭크는 2가 된다. 이 R 행렬의 랭크는

$$R^*R = \begin{bmatrix} S_{r1r1} & \dots & S_{r1r4} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ S_{r4r1} & \dots & S_{r4r4} \end{bmatrix} \quad (9)$$

의 영이 아닌 특이치의 수와 같게 된다⁽¹⁰⁾. 따라서 측정 신호들의 스펙트럼들로 구성된 행렬의 특이치들의 분석을 통해 각 주파수별로 소음원의 개수를 파악할 수 있다⁽¹¹⁾. 이와 같은 논리는 세 개 이상의 독립적인 소음원이 존재하는 경우에도 성립한다.

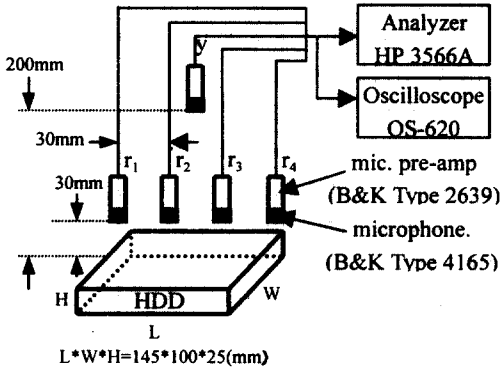


Fig. 4 Experimental setup

소음원의 수를 파악하기 위한 또 다른 방법으로 다중 기여도 함수^(2,12)(multiple coherence function)를 들 수 있다. Fig. 5는 y의 x_1, x_2 에 대한 다중 기여도 함수를 가시화하여 보여준다. 즉 다중 기여도 함수는 \vec{y} 를 \vec{x}_1 와 \vec{x}_2 의 선형 조합으로 표현되는 2 차원의 벡터 공간에 사영시켜 얻은 벡터 \vec{y}' 과 \vec{y} 사이의 기여도 함수를 의미한다.

Fig. 4에서 만약 두 개의 소음원 \vec{x}_1 과 \vec{x}_2 가 존재한다면, 출력 신호 \vec{y} 는 이들의 선형 조합으로 표현되는 2 차원의 벡터 공간에 존재하게 된다. 따라서 이 경우 y의 x_1, x_2 에 대한 다중 기여도 함수는 1이다. 또한 그 벡터 공간의 어떤 임의의 두 벡터에 대한 y의 다중 기여도 함수 역시 1이다.

이것은 두 개의 소음원이 있는 경우 Fig. 4에서 기준 신호들 중 임의의 두 개의 신호에 대한 y의 다중 기여도 함수는 1이라는 것을 의미한다. 세 개의 소음원이 존재한다면, 유사하게 세 개의 기준 신호들에 대한 y의 다중 기여도 함수는 1이다. 따라서 몇 개의 r 신호에 대해 y의 다중 기여도 함수가 1이 되기 시작하는가에 의해 소음원의 개수를 파악할 수 있다.

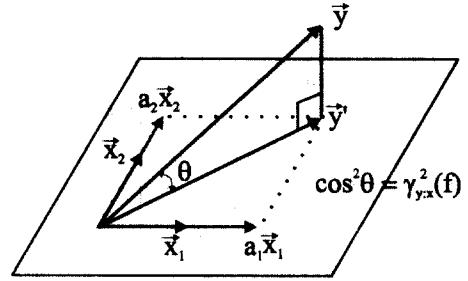
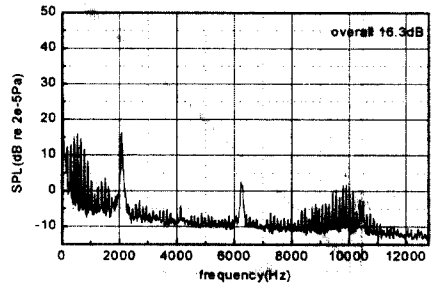
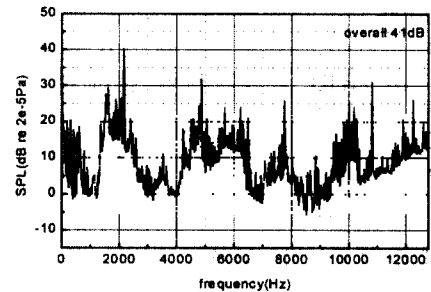


Fig. 5 Illustration of multiple coherence function

IV. 2 실험 결과 분석



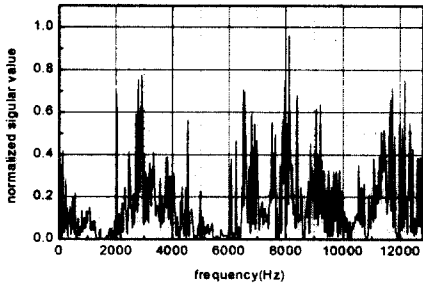
(a) background noise when HDD is off



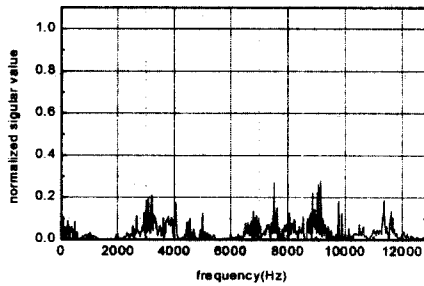
(b) Sound pressure level when HDD is operated

Fig. 6 Sound pressure level(output spectrum) at 0.2m above HDD

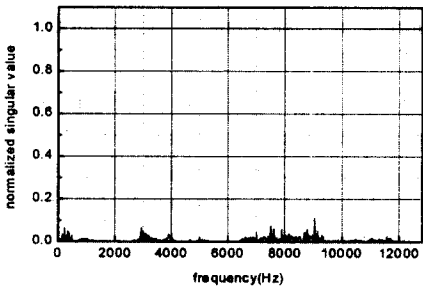
Fig. 6 은 Fig. 4 에서 출력 신호 y 의 자기 스펙트럼을 보여 준다. Fig. 6(a)는 HDD 가 구동하지 않을 측정한 배경 소음이고, Fig. 6(b)는 HDD 가 구동하고 있을 때 측정한 결과이다. 이 두 그림을 비교해보면 1.3kHz~2.5kHz, 4kHz~6kHz, 7kHz~8kHz, 10kHz 이상의 영역이 HDD 에 의해 발생하는 소음의 주파수 영역임을 볼 수 있다.



(a) first and second singular value

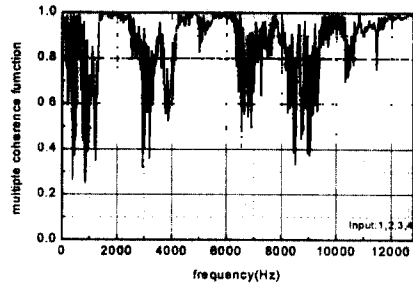


(b) first and third singular value

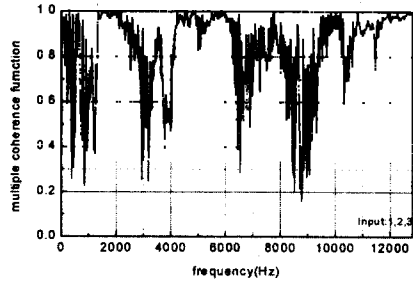


(c) first and fourth singular value

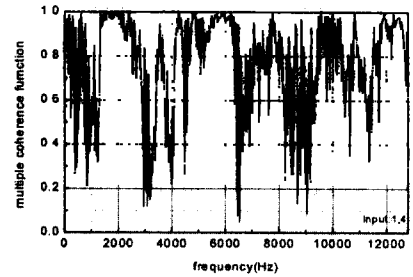
Fig. 7 Singular value normalized by maximum(first) singular value of spectral matrix created by reference signals



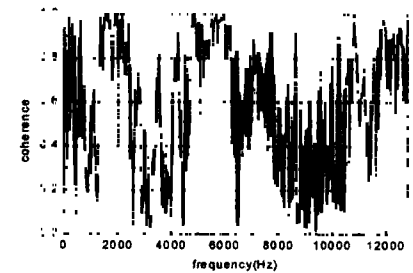
(a) for the case of 4 reference signals



(b) for the case of 3 reference signals



(c) for the case of 2 reference signals



(d) for the case of 1 reference signals

Fig. 8 Multiple coherence function with respect to changing of number of reference signals

Fig. 7은 기준 신호들의 스펙트럼들로 구성된 행렬의 특이치들을 보여준다. 이 그림에서 각 특이 값들은 그 주파수에서 가장 큰 특이치 값에 의해 정규화되었다. 이 결과로부터 대략 1.3kHz~2.5kHz와 4~6kHz에서는 1개의 소음원이, 7kHz~8kHz와 10kHz 이상에서는 2개의 독립적인 소음원이 존재하는 것으로 생각된다.

Fig. 8은 기준 신호의 개수를 변화시켜 가며, 출력 y 의 다중 기여도 함수를 그린 것이다. 1.3kHz~2.5kHz와 4~6kHz에서는 1개의 기준 신호에 대한 기여도 함수나 다수의 기준 신호에 대한 다중 기여도 함수나 별 차이가 없는 것으로 보아 특이치 분리 방법과 유사하게 1개의 소음원이 존재하는 것으로 보인다. 그러나 7kHz~8kHz와 10kHz 이상에서는 1개의 기준 신호에 대한 기여도 함수와 2개의 기준 신호에 대한 기여도 함수가 꽤 차이가 있는 것으로 보아 특이치 분리 방법에서 본 결과와 유사하게 두 개의 독립적인 소음원이 있는 것으로 보인다.

V. 결론 및 향후 계획

본 논문에서는 전통적으로 사용되어온 소음원의 통계적 특성 차이를 이용한 기여량 분석 방법이 HDD의 소음 기여량 분석에서는 많은 한계를 가질 수 밖에 없음을 보였다. 따라서 향후에는 통계적 특성 차이 뿐만 아니라 음장이나 진동장의 차이를 이용한 방법이 개발되어야 한다고 생각된다. 한편 기여량 분석은 하지 못하더라도 독립적인 소음원의 개수는 어느 정도 파악할 수 있음을 보았다.

후 기

본 연구는 특정연구개발과제에 의해 지원되었으며, 지원에 감사드립니다.

참고 문헌

- (1) 황태연, 강성우, 한윤식, 손영, 전정일, "고속 HDD의 소음 제어," 한국소음진동공학회지, 제9권 제4호 (1999).
- (2) J. S. Bendat and A. G. Piersol, *Random data:*

Analysis and measurement procedures, 2nd ed., 109-251 (1986)

- (3) S. M. Price and R. J. Bernhard, "Virtual coherence: A digital signal processing technique for incoherent source identification," 4th IMAC, 1256-1262 (1986)
- (4) J. M. Danthez and R. Aquilina, "Separation of broadband sources processing concept of the labrador software," *Mechanical Systems and Signal Processing*, 11(1), 91-106 (1997)
- (5) 남경옥, 김양한, "음향 홀로그래피를 이용한 다수의 완전 비상관 소음원들의 가시화," 한국소음진동공학회지, 제9권 제5호, 922-927 (1999)
- (6) M. W. Trethewey and H. A. Evensen, "Identification of noise sources of forge hammers during production: An application of residual spectrum techniques to transients," *J. Sound and Vib.*, 77(3), 357-374 (1981)
- (7) M. E. Wang and M. J. Crocker, "On the application of coherence techniques for source identification in a multiple noise source environment," *J. Acoust. Soc. Am.*, 74(3), 861-872 (1983)
- (8) D. Hallman and J. S. Bolton, "Multi-reference near-field acoustical holography," *Proc. of Inter-Noise 92*, 1165-1170 (1992)
- (9) H.-S. Kwon and J. S. Bolton, "Partial field decomposition in nearfield acoustical holography by the use of singular value decomposition and partial coherence procedures," *Proc. of Inter-Noise 98*, 649-654 (1998)
- (10) P. Lancaster and M. Tismenetsky, *The theory of matrices with application*, 2nd ed, Academic press, 180-184 (1985)
- (11) M. S. Kompella, P. Davies, R. J. Bernhard and D. A. Ufford, "A technique to determine the number of incoherent sources contributing to the response of a system," *Mechanical Systems and Signal Processing*, 8(4), 363-380 (1994)
- (12) D. E. Newland, "An introduction to random vibrations, spectral & wavelet analysis," Addison Wesley Longman Limited, 206-211 (1993)