

상시감시가 가능한 잡음 저감 신호처리기법: 최소분산 캡스트럼

A Noise Reduction Signal Processing for Online Monitoring: Minimum Variance Cepstrum

박춘수, 윤동진(한국표준과학연구원, 학술제5분과)
 E-mail: choonsu.park@kriss.re.kr

1. 서론

운전 중 시스템의 상태를 파악하는 구조 건전성 감시(structural health monitoring, SHM) 기술은 감시의 기본이 되는 센서에 대한 개발뿐만 아니라, 센서를 통한 고속 데이터의 획득 및 신호처리까지 다양한 분야의 기술들이 기반이 되어야 한다. 최근에는 다양한 지능형 센서 및 고속의 계산이 가능한 하드웨어의 발달과 더불어 구조건전성 감시 기술이 많은 주목을 받고 있다.

하드웨어의 발달과 함께, 하드웨어 성능의 효율적 활용을 위한 신호처리 기법의 개발이 필요하다. 즉, 이는 측정된 신호를 사용자가 원하는 의미 있는 정보의 형태로 빠르고 정확하게 제공하기 위해 꼭 필요한 것이다. 특히, 현재 사용자(혹은 검사자)의 숙련도에 따라 많이 달라지는 검사 결과 차이를 개선하기 위해서는 구조물의 상태를 정확하게 판단할 수 있는 정보를 제공하는 것이 필수적이다. 또한, 기본적으로 운용 중 감시를 목적으로 하는 구조 건전성 감시 기술의 특성상 잡음에 많은 영향을 받게 되는데, 이는 부정확한 정보를 제공하는 주요 원인이다.

운용 중 발생하는 잡음은 무수한 원인에 의해서 다양하게 발생된다. 이 모든 잡음에 효과적인 신호처리 방법은 존재하지 않으며, 제거하고자 하는 잡음신호의 특성에 맞는 신호처리 방법이 적용되어야 한다. 본 기술강좌에서는, 측정기기 혹은 구조물의 운용 중 흔히 발생하는 광대역 주파수 특성을 가지는 잡음을 제거하는 방법에 대

해 살펴보고자 한다. 여러 가지 방법을 생각해 볼 수 있으나, 충격 결합신호와 광대역 신호의 특성 차이를 효과적으로 활용한 '최소분산 캡스트럼(minimum variance cepstrum)' 방법을 설명하고, 기본 원리 및 실제 적용 예를 소개하고자 한다. 이를 위해 먼저, 일반적인 캡스트럼의 기본 원리에 대해 알아본다. 다음으로 최소분산 캡스트럼이 가지는 잡음 저감의 기본 원리에 대한 이해를 간단한 신호를 예로 들어 설명한다. 마지막으로, 실제로 적용한 예를 통하여 최소분산 캡스트럼 기술에 대한 이해를 높이고자 한다.

2. 일반적인 캡스트럼의 원리

캡스트럼은 관심있는 신호의 반향(echo)신호가 발생하는 시간차이를 검출하기 위한 목적으로 1963년에 Bogert 등[1]에 의해 제안된 신호처리 방법이다. 캡스트럼은 넓은 의미로 '로그를 취한 스펙트럼의 스펙트럼'으로 정의할 수 있는데[2], 어떤 스펙트럼에 로그를 취하는지에 따라 파워 캡스트럼(power cepstrum)과 복소 캡스트럼(complex cepstrum)으로 나뉜다.

캡스트럼에 대한 좀 더 쉬운 이해를 위해, 임의의 신호 $x(t)$ 의 자기 상관함수(auto correlation function)와 파워 캡스트럼을 비교해 보도록 하자. 자기 상관함수란 신호의 자기 상관성을 나타내는 함수로써, $x(t)$ 가 가지는 물리량의 제곱에 해당하는 값을 가진다. 이 자기상관함수를 푸리에 변환(Fourier transform)하게 되면, 파워 스펙트럼

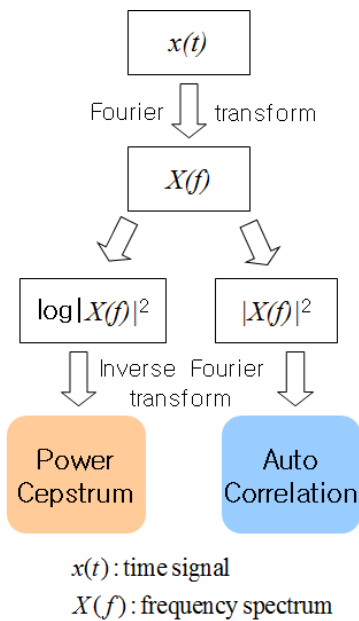


Fig. 1 A schematic diagram of comparing auto correlation function and power cepstrum

(power spectrum)을 얻을 수 있다[3]. 이 푸리에 변환 관계를 이용하면 자기상관함수와 파워 캡스트럼을 비교해 볼 수 있는데, 도식적으로 나타내면 Fig. 1과 같다.

간단히 비교하면, $x(t)$ 를 푸리에 변환하여 얻어진 주파수 스펙트럼[$X(f)$]에 제곱을 하여 역푸리에 변환을 하게 되면, $x(t)$ 의 자기 상관함수를 구할 수 있다. 파워 캡스트럼은 역푸리에 변환하기 전, 파워 스펙트럼에 로그를 취해 얻는다. 로그를 취하는 효과는 수학적 관점에서는 곱해져 있는 신호를 더하기 형태로 분리할 수 있는 것이다. 이를 신호 변환의 관점에서 보면, 서로 다른 특성을 가진 신호를 구분해 낼 수 있다는 것을 의미한다.

캡스트럼이 가지는 이러한 특성을 충격응답함수(impulse response function) $h(t)$ 가 시간지연(time delay) T 를 가지고 반복되는 신호인

$$x(t) = h(t) + h(t) * \delta(t - T) \quad (1)$$

를 통해 살펴보자[Fig. 2(a) 참조]. 여기서 δ 는 디락-델타(Dirac-delta)함수를 나타낸다. 이해의 단순화를 위해, 반복되는 충격응답함수의 크기 변화

및 파의 전파에 따른 주파수 성분의 변화는 없다고 가정한다. 식(1)을 푸리에 변환하면,

$$X(f) = H(f)\{1 + e^{-j2\pi f T}\} \quad (2)$$

와 같이 주파수 스펙트럼을 얻을 수 있다. 여기서, $X(f)$ 와 $H(f)$ 는 각각 $x(t)$ 와 $h(t)$ 의 푸리에 변환 신호이다. 그리고 지수 함수의 부호가 음이 나온 것은 푸리에 변환의 적분 기저함수(basis function)를 $e^{j2\pi ft}$ 로 사용하였기 때문이다. 식(2)의 양변에 로그를 취하면,

$$\log|X(f)|^2 = \log\{2|H(f)|^2\} + \log\{1 + \cos 2\pi f T\} \quad (3)$$

과 같이 얻어진다. 식(2)에서 주목해서 봐야 할 것은 시스템의 특성에 대한 정보를 가지고 있는 주파수 응답함수 스펙트럼 $H(f)$ 와 시간 지연에 대한 정보를 가지고 있는 T 가 분리 되었다는 것이다.

식(3)에서 나타내어진 우변의 두 항은 주파수 영역에서 각기 다른 특성을 가지고 있다. 주파수 응답함수를 나타내고 있는 첫 항은 주기를 나타내고 있는 두 번째 항에 비해 상대적으로 넓은 주파수 영역에 걸쳐 있음을 예상할 수 있고, 시간지연 정보를 가지고 있는 두 번째 항은 시간지연 τ 의 역수의 주기를 가지고 반복되어 나타날

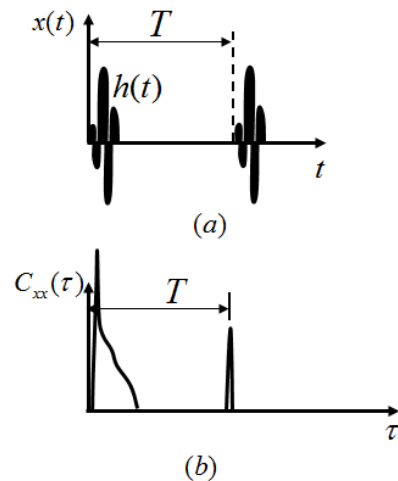


Fig. 2 An example of a power cepstrum. (a) A signal that has a time delayed signal, (b) Power cepstrum that shows both frequency response function in the low quefrequency region and time delay τ at its own quefrequency

것이다. 이는 역푸리에 변환에 의해서 사상될 큐프렌시(quefrequency) 영역에서 보면 Fig. 2(b)와 같이 나타난다. 식(3)의 첫 번째 항은 낮은 큐프렌시 영역에 나타나게 되고(주파수 응답함수가 더 넓게 분포하면 할수록 더 낮은 큐프렌시 영역에 나타나게 됨), 두 번째 항은 시간영역에서의 시간 지연 T 와 동일한 지점에서 값을 가지게 된다.

요약하면, 로그를 취하는 효과에 의해 시간영역에서는 구분할 수 없던, 시스템의 특성을 나타내는 충격응답함수와 주기에 대한 정보를 로그를 취하는 과정을 거치면서 큐프렌시 영역에서의 캡스트럼에서는 분리가 되어 나타나는 것을 볼 수 있다. 이 방법은 시스템의 특성에 따른 영향을 배제한 시간지연 및 주기를 검출하는데 효과적인 방법으로, 음성신호처리에서의 반향음 제거 및 기계 시스템의 결합주기 검출 등 다양한 영역에서 폭 넓게 적용되고 있는 신호처리 방법이다.

지금까지는 일반적인 캡스트럼의 주요 원리에 대해 간단한 신호를 가지고 설명하였다. 본 기술 강좌에서 소개하고자 하는 '최소분산 캡스트럼'은 캡스트럼 해석의 기본 원리에 잡음 저감 개념을 위한 최소분산의 원리를 도입한 기술[4]로써, 랜덤한 특성을 가지는 광대역 잡음으로부터 주기적인 충격신호를 검출하는데 탁월한 방법이다.

3. 최소분산 캡스트럼

최소분산 캡스트럼은 주기적으로 발생하는 충격신호가 가지는 확정적인(deterministic) 특징과 랜덤한 신호가 가지는 특징의 차이를 이용하여, 백색잡음(white noise)과 같이 랜덤한 잡음 속에 묻혀 있는 주기적인 충격신호를 검출하기 위해 제안되었고, 실제 현장에의 적용[5,6]을 통해 일부 응용에서 그 효용성이 검증되었다. 본 기술강좌에서는 최소분산 캡스트럼의 기본 원리를 간단한 신호를 예로 들어 설명하도록 하겠다.

충격신호와 잡음신호의 시간영역과 주파수영역에서의 특성을 살펴보고, 최소분산 원리가 제안된 배경에 대해 이해해 보도록 하자. 수식의 간편화를 위해서 측정 시작시간으로부터 각각 T_1 과 T_2 의 시간 지연을 갖는 임펄스로 구성된 신호

$$x(t) = \delta(t - T_1) + \delta(t - T_2) \tag{4}$$

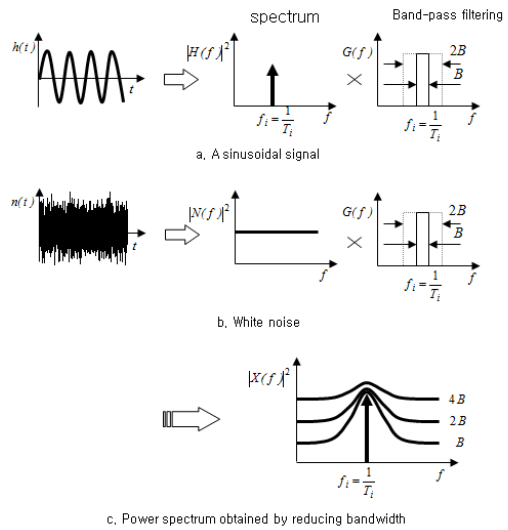


Fig. 3 A sinusoidal signal detection buried in white noise by using band-pass filtering. $h(t)$ is a sinusoidal signal whose period is T_i , $G(f)$ represents frequency spectrum of band pass filters, $n(t)$ is white noise that has constant power overall frequency region. B indicates bandwidth of band-pass filters

를 생각해 보자. 이 신호는 푸리에 변환에 의해

$$X(f) = e^{-j2\pi f T_1} + e^{-j2\pi f T_2} \tag{5}$$

가 되어 파워 스펙트럼을 구해보면, 두 임펄스 신호의 시간지연 차이인 $T_2 - T_1$ 의 역수를 주기로 하는 조화함수의 형태를 가짐을 볼 수 있다.

임펄스 신호가 주파수 영역에서 조화함수의 선형함수로 나타난다는 사실과, 대역신호 속에서 조화함수를 검출하는 개념을 이용하면 잡음신호와 충격신호를 분리할 수 있게 된다.

조화신호는 해당 주파수에서 피크를 가지는 선 스펙트럼(line spectrum)을 가지게 되고, 대역신호는 해당 대역에서 시스템 특성에 따라 분포하는 연속 스펙트럼(continuous spectrum)을 가지게 된다. 이 두 신호가 같이 있는 경우, 특히 대역신호 대비 충격신호의 파워가 작은 경우에는 대부분 시간 신호영역에서 뿐만 아니라 주파수 영역에서도 관찰하기가 어렵다. 이 때, Fig. 3에서 나타난 것처럼 주파수 스펙트럼을 구하기 위한 대역통과 필터(bandpass filter)의 폭을 줄이면서 스펙트럼을 구해보면, 조화함수는 선 스펙트럼을

가지므로, 신호의 파워가 변하지 않지만 대역신호는 연속 스펙트럼을 가지므로 대역폭에 따라 통과하는 신호의 파워가 줄어들게 된다.

이러한 성질을 이용하여, 두 개의 임펄스 신호에 대한 최소분산 캡스트럼을 구해보도록 하자. 식(4)에 임의의 충격응답함수 $h(t)$ 가 합성곱(convolution)된 식으로 모델링을 하였다. 이 신호는 푸리에 변환에 의해 주파수 영역에서 시간 지연 차이에 해당하는 주기신호와 주파수 응답함수의 곱으로 표현된다. 시간 지연 차이의 정보를 가지고 있는 조화함수는 푸리에 변환 쌍(Fourier transform pair)[7]의 특성에 따라 큐프렌시 영역에서 선 스펙트럼의 형태를 가지게 되고, 주파수 응답함수는 낮은 큐프렌시 영역에서의 값으로 나타나게 된다. 한편, 연속 스펙트럼의 특성을 갖는 잡음은 큐프렌시 영역에서도 연속적인 특성을 가지게 되어[7] 밴드패스 리프터(band-pass lifter, 주파수 영역에서 밴드패스 필터의 개념)의 대역폭

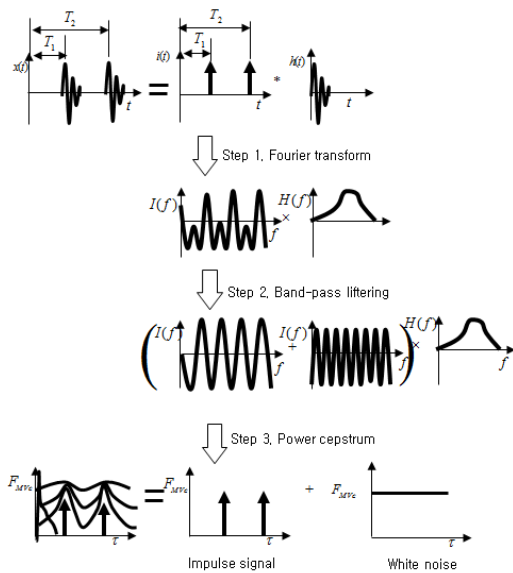


Fig. 4 A simple example of minimum variance cepstrum with two impulse signal and white noise. $x(t)$ is a sample signal that consists of two impulse signals, which have a time delay T_1 and T_2 , $G(f)$ represents frequency spectrum of band pass filters, $n(t)$ is white noise that has constant power overall frequency region, B indicates bandwidth of band-pass filters

을 줄임에 따라 큐프렌시 영역에서 임펄스를 찾을 수 있게 된다. 이에 대한 설명을 Fig. 4에 도식화하여 나타내었다.

4. 실험 적용 사례

4.1. 자동차 허브 베어링 결함 검출

자동차 바퀴에 장착되어 있는 허브 베어링은 차량의 하중을 지지하고, 바퀴와 차체를 연결하면서 바퀴의 회전 운동을 가능하게 하는 요소이다(Fig. 5(a) 참조). 허브 베어링은 외륜과 내륜 사이에 있는 볼들이 접촉하면서 회전하므로 과도한 하중이 작용하면 베어링을 구성하고 있는 요소들에서 결함이 발생할 수 있다. 결함이 존재하

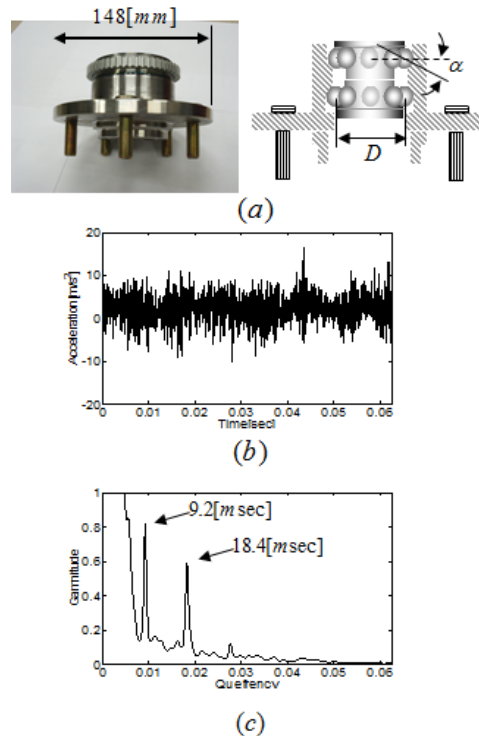


Fig. 5 The hub bearing assembly and minimum variance cepstrum, (a) Photograph and schematic diagram of the hub bearing, where α is contact angle and D is pitch diameter, (b) Measured acceleration signal, (c) Minimum variance cepstrum: lifter order-480, time length-125[msec], theoretical inner-race fault period-9.2[msec]

는 베어링을 일정하게 회전시키면 주기적인 충격이 발생하고, 이것은 시스템의 공진주파수를 가진하여 진동 및 소음이 생기는 것으로 알려져 있고, 이를 비파괴적으로 결함의 유무 및 결함 진전 정도를 파악하는 것은 중요한 이슈이다.

Fig. 5(b)와 (c)는 각각 차량에 센서를 설치하여 운행상태에서 측정된 가속도 신호와 최소분산 캡스트럼의 결과를 보여주고 있다. 측정된 가속도 신호에서는 주기적으로 발생하는 충격신호가 보이지 않지만, 최소분산 캡스트럼 결과에서는 뚜렷하게 내륜결함 주기(9.2[msec]), 베어링의 기하학적 형상과 회전속도에 의해 계산되어 지는 값)에 해당하는 피크와 라모닉(rharmonic, 주파수 영역에서의 하모닉 신호의 개념)을 관찰할 수 있다.

4.2. 증기 누설 위치 검출

고온의 증기가 흐르고 있는 배관에서 누설이 발생하는 위치를 원거리에서 탐지하기 위한 원거리 음향탐지기법에 최소분산 캡스트럼을 적용하여 위치 검출 가능성에 대해 살펴보았다. 많은 경우, 고온의 배관이 설치된 환경은 배경잡음이 심하여 누설에 의한 소리신호 검출이 쉽지 않다. 특히, 적은 수의 센서를 이용하여 음원을 탐지하기 위해 도달시간차이(TDOA)기법을 사용하는 경우에는, 각 센서로 수신되는 누설음의 정확한 도달시간을 구하는 것이 가장 중요하다.

잡음이 많은 환경에서 각 센서로 측정되는 누설 발생신호의 정확한 도달시간을 찾기 위해 큐프렌시 영역에서 Fig. 6(a)와 같이 각 센서의 도달시간을 구하여 정확한 위치를 찾는 것을 확인하고, 실제 누설증기신호를 발생시켜 누설 위치 검출을 시간 지연 차이를 이용한 쌍곡선을 이용하여 Fig. 6(b)와 같이 찾는 것을 볼 수 있었다.

5. 맺음말

지금까지 상시 상태 감시가 가능한 잡음 저감 신호처리기법으로써 최소분산 캡스트럼의 기본원리 및 간단한 적용 예를 살펴보았다. 기본적인 원리를 독자들에게 쉽게 설명하고자하는 목적으로 작성하였으나 미흡한 부분이 많을 것으로 생각된다. 국내 비파괴 분야에서 잡음저감이나 데이터 개선을 위한 신호처리 분야는 초음파 및 음

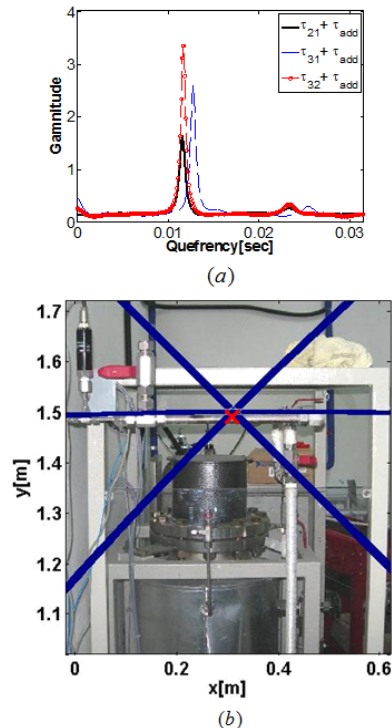


Fig. 6 A localization on a hole which emit water vapor by using 3 microphones and associated 3 hyperbolic curves. Mark 'X' denotes true source position, and the 3 lines stand for hyperbolic curves

향방출을 비롯한 비파괴 분야에 다양하게 적용될 수 있지만, 지금까지는 개발된 기술을 필요에 따라 단순히 도입하여 적용해 보는 단계에 머물러 있다고 생각된다.

동일한 신호처리이론이라 하더라도 적용되는 시스템에 따라 그 특성이 고려되어 독자적으로 발전하듯이, 나날이 발전하는 하드웨어 성능 발전에 맞추어 비파괴 분야의 특성에 맞는 신호처리 기법의 개발이 필요한 시기로 생각된다. 부족하나마, 본 강좌의 내용을 통해 독자들이 신호처리 분야를 좀 더 이해하고, 저변을 넓히는데 도움이 되었으면 하는 바람이다.

참고문헌

- [1] B. P. Bogert, M. J. R. Healy and J. W. Tukey, "The quefrequency analysis of time series for echoes: cepstrum, pseudo-autocovariance,

- cross-cepstrum and saphe cracking," Proc. of the symposium on time series analysis, pp. 209-243 (1963)
- [2] R. B. Randall, "Frequency Analysis," 3rd Ed. 1st Print, B&K, Glostrup Denmark, pp. 271-304 (1987)
- [3] J. S. Bendat and A. G. Piersol, "Random Data - Analysis and Measurement Procedures," 3rd Ed., John Wiley&Sons, New york U.S.A., pp. 118-140 (2000)
- [4] Y.-C. Choi and Y.-H. Kim, "Fault detection in a ball bearing system using minimum variance cepstrum," *Measurement Science and Technology* 18, pp. 1433-1440 (2007)
- [5] C. -S. Park, Y. -C. Choi, and Y. -H. Kim, "Early faults detection in a ball bearing using minimum variance cepstrum; application to an automotive hub bearing," Proc. International Conference on Sound and vibration, Vienna, Austria, July 2-6 (2006)
- [6] Y. -C. Choi and Y. -H. Kim, "Impulsive noise source localization in noisy environment using beamforming method," Proc. of Inter-noise 2004, Prague, Czech Republic, August 22-25 (2004)
- [7] R. N. Bracewell, "The Fourier Transform and Its Applications," 3rd Ed., McGraw -Hill, Singapore, pp. 105-129 (2000)