

레이저 도플러 계측 신호 진동보상 기법 연구

손용기, 김재화, 장태규
중앙대학교 전자전기공학부

An Adaptive Compensation of LDV's body Vibration

Yong-Ki Son, Jae-Hwa Kim, Tae-Gyu Chang
School of Electrical and Electronics Engineering

Abstract: This paper presents an auxiliary beam-assisted adaptive compensation technique applied to alleviate the problem of LDV's body vibration. The LMS algorithm is applied to adaptively compensate the body vibration utilizing the reference signal provided by the auxiliary beam. The usefulness of the proposed technique is verified via computer simulations performed for diverse types of target signals and body vibration.

를 측정함으로써 시스템 자체의 진동을 추정하여 보상할 수 있는 구조이다. 따라서 기존에 계측 시스템이 자체 진동을 보상하기 위해서 진동하지 않는 절대 기준면을 확보해야 하는 기법과는 구별되는 특징을 가진다.

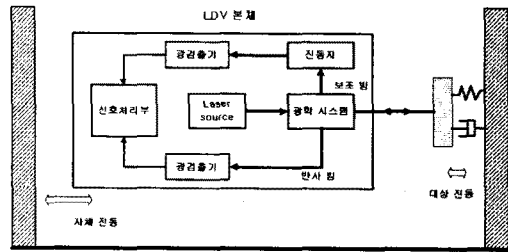


그림 1. 자체진동 보상 레이저 계측 시스템 구성도

1. 서 론

기존의 레이저 도플러를 이용한 진동계측은 제한된 범위에서의 진동에 대한 정밀 계측이 주된 응용이라 할 수 있으며, 이 경우 보정의 정밀성, 측정환경의 안정성 등 중요한 요구사항이 수반되어야 한다. 특히 측정환경의 안정성이 보장되지 않는 상황, 즉 레이저 도플러 계측 시스템 자체가 진동하는 환경에서는 자체진동이 계측 오차요인으로 작용하게 된다. 이러한 경우 기존의 레이저 계측 시스템에서는 기준면에 상대적인 진동변위를 측정하여 계측 시스템 자체의 진동을 보상하는 구조를 가진다. 그러나 레이저 도플러 계측 시스템 자체가 진동하는 환경에서 진동보상을 위한 기준면을 확보하지 못하는 경우 심각한 계측오차를 유발할 수 있다. [1][2]

이에 본 논문에서는 레이저 도플러 계측 시 측정 방향으로 계측 시스템이 진동하는 경우 발생하는 계측오차를 자체적으로 보상하여 대상물의 진동을 측정하는 데 커니즘으로 보조 빔을 이용한 자체진동 보상 구조를 제시하였다. 또한 이에 필요한 진동보상 신호처리 기법으로 LMS (least mean squared) 알고리즘 [3] 기법으로 하는 적응잡음제거 기법을 적용하여 자체진동을 보상하는 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 자체진동 보상 레이저 도플러 계측 시스템

보조 빔을 이용한 자체진동 보상 기법은 기본 계측 시 소실되는 여분의 빔을 이용하여 자체 진동을 계측하고, 이를 사용하여 자체진동에 의해 왜곡된 대상진동을 보상하는 기술이다. 본 절에서는 이러한 보조 빔을 이용한 자체진동 보상 시스템의 구조와 주 빔 및 보조 빔의 신호 모델링에 관한 내용을 기술한다.

2.1 보조 빔을 이용한 자체진동 보상 시스템

자체진동 보상 레이저 도플러 계측 시스템은 그림 1에 나타난 바와 같이 보조 빔으로 계측 시스템 자체 진동을 측정하여 대상진동의 계측 시 오차요인으로 작용하는 시스템 자체의 진동을 보상하는 구조를 가진다. 이러한 방식은 계측 시스템 내에 자체의 진동을 반영하는 자체진동자를 설계 부착하고, 보조 빔을 이용하여 진동자

레이저 원으로부터 발진된 레이저 신호는 광학 시스템을 거쳐 대상 진동을 계측하는 주 빔과 계측 시스템 자체의 진동을 계측하는 보조 빔으로 나뉘어 진다. 주 빔은 계측 대상면으로부터 반사되어 다시 광학부를 통해 광 검출기로 입력되어 신호처리 부에서 복조되며, 보조 빔은 진동자에 반사되어 또 다른 광 검출기로 입력되어 신호처리 부에서 복조되어 계측오차를 보상하는 데 사용된다. 신호처리부에서는 주 빔과 보조 빔에서 검출되는 신호를 PLL(phase locked loop) 회로 등을 이용하여 독립적으로 복조하여 각각의 진동변위에 대한 속도를 얻고, 이를 이용하여 보상을 수행한다. 본 논문에서는 진동보상 알고리즘으로 복조된 보조 빔 신호를 기준 신호로 하는 LMS 기법의 적응잡음제거 기법을 적용하고, 시뮬레이션레이션을 수행하여 동작을 확인하였다.

2.2 신호 모델링

레이저 변조 신호는 Doppler 효과에 의해 입력 신호의 속도에 의한 주파수 천이량을 고려한 FM 신호로 취급할 수 있으며 식(1)로 표현된다.

$$x(t) = A \sin \left(2\pi f_c t + \frac{4\pi}{\lambda} \int_{-\infty}^t v(\tau) d\tau \right) + n(t) \quad (1)$$

계측진동속도 신호 $v(t)$ 는 계측 대상면의 절대 진동 변위 신호 $z(t)$ 와 진동계 자체의 절대 진동변위 신호 $y(t)$ 가 함께 반영된 신호로서 진동계와 진동면 간의 상대적인 속도이며 주 빔에서 복조를 통해 얻어지는 실제 계측신호이다.

$$v(t) = \frac{dz(t)}{dt} = \frac{dz(t)}{dt} - \frac{dy(t)}{dt} \quad (2)$$

$S(t)$: 계측진동변위

일반적으로 기계적 진동이나 외부 환경 등에 영향을 받아 발생하는 진동은 주기성을 일정한 시간 동안 유지하는

파형으로 생각할 수 있으므로 계측 시스템 자체 진동 신호들을 몇 개의 주파수 성분을 가지는 sine 함수들의 조합으로 모델링하였다.

$$y(t) = \sum_{k=0}^{N-1} A_k \sin(2\pi f_k t + \theta_k) \quad (3)$$

식(3)의 신호 모델은 실제 진동계 자체에 인가되어 주 빔에 추가되는 신호의 모델이고, 보조 빔에서 측정되는 진동 신호는 자체진동자를 통해 측정되는 신호이다. 따라서 보조 빔의 진동 신호는 자체진동신호가 자체진동자의 dynamics를 통과하여 발생하는 신호로 모델링하여야 한다. 자체진동자의 dynamics를 반영한 보조 빔의 진동신호 모델은 정상상태를 가정하여 $y(t)$ 의 각 sine함수 성분은 크기와 위상을 식(4)과 같이 변환하여 적용하였다.

$$y'(t) = \sum_{k=0}^{N-1} A_k G(2\pi f_k) \cdot (2\pi f_k)^2 \sin(2\pi f_k t + \theta_k + \angle G(2\pi f_k)) \quad (4)$$

여기서 $G(s)$ 는 입력이 진동의 가속도이고 출력이 진동센서의 상대적 변위로 정의된 전달함수이므로, 각 sine 함수의 크기에 $(2\pi f_k)^2$ 의 가속도 성분을 반영하여 적용한다. $G(s)$ 는 고유주파수가 100 Hz이고 감쇄지수가 0.707인 2차 프로토타입 시스템으로 설계되어 있으며, 이러한 시스템의 특성은 고유주파수 이하의 주파수 영역 신호에 대하여서 주파수 성분별 이득이 $(1/2\pi f_n)^2$, 위상각이 $\sqrt{2}ff_n$ 으로 비교적 일정한 특성을 가지고 있어서 입력 가속도 신호에 대하여 일정한 크기의 이득과 시간지연을 가지는 변위 신호를 얻을 수 있는 가속계로써 기능을 수행할 수 있다.

3. 진동 보상 신호처리

주 빔에서 측정되는 신호는 계측대상 진동신호에 계측 시스템 자체의 진동이 추가된 신호모델로 나타나기 때문에 계측 시스템 자체 진동에 의해서 생기는 오차를 적절하게 보정해야 한다. 자체진동자를 레이저 도플러 계측 시스템에 부착하여 보조 빔으로 측정함으로써 추가되는 자체진동 오차를 추정하여 계측대상 진동신호를 보정하였다. 이러한 개념을 적용한 진동보상 시뮬레이션 구성도를 그림 2에 나타내었다.

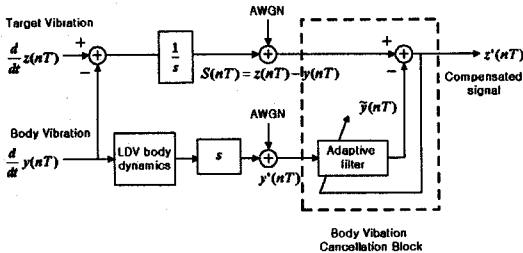


그림 2 LMS 기반의 자체진동 보상 기법의 구성도

진동보상 시뮬레이션은 계측대상 진동신호 및 계측 시스템 자체진동 신호는 PLL의 일정한 capture range 안에서 이상적으로 복조하는 등가적인 모델로 가정하였다. [4]

자체진동자에서 반영되는 계측 시스템 자체의 진동 신호 $y'(nT)$ 는 식 4와 같이 자체진동자 dynamics에 의해 크기와 위상이 변형된 sine신호들의 조합에 가속도 성분을 반영하도록 미분기를 통과한 신호로 나타낼

수 있다. 자체진동자 dynamics에 의해 변형된 신호는 보조 빔을 복조하여 얻을 수 있다. 진동보상은 자체진동 신호 $y'(nT)$ 에 자체진동자 dynamics의 역에 해당하는 필터를 통과시켜 보상에 줄 수 있으나, 역필터가 불안정하기 때문에 구현의 어려움이 있다. 이러한 문제를 해결하기 위해 자체진동 신호 $y'(nT)$ 를 기준 신호로 하는 LMS 알고리즘에 의한 적응필터 기법을 적용하였다.

$$\hat{y}(nT) = w(n) \cdot y'(nT) \quad (5)$$

$$e(nT) = S(nT) - \hat{y}(nT) \quad (6)$$

$$w(n+1) = w(n) + \mu e(nT) \cdot y'(nT) \quad (7)$$

$w(n)$: 필터 계수 벡터

$y'(nT)$: 보조 빔에 의해 복조된 신호

$\hat{y}(nT)$: 추정된 신호

μ : step size parameter

신호 $y'(nT)$ 를 적응필터를 통과시켜 주 빔에서부터 복조된 계측대상 진동과 계측 시스템 자체진동 신호의 합으로 된 신호 $S(nT)$ 과의 오차 $e(nT)$ 으로 필터계수를 갱신한다. 오차신호 $e(nT)$ 과 보조 빔에서 복조되는 자체진동 신호 $y'(nT)$ 사이의 상관성이 제거될 때 필터계수 $w(n)$ 은 더 이상 갱신되지 않고, 필터계수에 의해 추정된 신호 $\hat{y}(nT)$ 은 계측 시스템 자체진동과 동일하게 되어 결과적으로 오차신호 $e(nT)$ 는 계측대상 진동신호 $z'(nT)$ 가 된다.

4. 시뮬레이션 및 결과

본 논문에서는 이상 제시한 진동보상 시스템을 대상으로 하여 시뮬레이션을 수행하기 위해 진동의 용용에 따른 진동의 종류를 다음과 같이 계측대상 진동 및 자체진동 신호를 주파수 대역별로 표 1과 같이 구분하였다.

표 1 진동신호의 주파수 대역에 따른 진동의 종류 구분

진동 대상 / 주파수 대역	계측대상 진동	계측기 자체의 진동
10 Hz 이하	계측대상 이동	계측기 자체의 이동
10 Hz ~ 100 Hz	기계적 진동	기계적 진동
100 Hz ~ 20 KHz	오디오 진동	-
20 KHz 이상	초음파	-

일반적으로 이동계측 환경에서와 같이 계측 대상체나 계측기 자체가 이동하는 경우의 진동은 10 Hz 이하의 저주파 신호로 생각할 수 있으며, 이러한 진동들은 계측기를 운반하거나 계측대상이 차량 등에 의해 이동하는 원인을 고려한 상황이다. 기계적 진동은 10 Hz에서 100 Hz 사이의 진동으로 구분할 수 있으며, 엔진 등과 같은 시스템 구동 시 발생하는 60 Hz 전후의 주파수 대역을 가지는 진동을 범위로 설정하였다. 오디오 진동은 음성이나 오디오 신호에 의해 진동하는 대상체의 주파수 대역을 100 Hz에서 20 kHz까지의 가청주파수 영역으로 설정하였으며, 20 kHz 이상의 주파수 대역은 초음파에 의한 대상체의 진동으로 구분하였다. 이와 같이 구분한 진동신호들을 대상으로한 진동보상 시뮬레이션 결과들을 다음에 제시하였다.

그림 3.4.5는 시뮬레이션 결과는 나타내며, 공통적으로 (a)는 대상진동, (b)는 간섭으로 작용하는 자체진

동신호, (c)는 대상진동 신호와 자체진동 신호가 복합되어 복조된 신호이며, (d)는 보상된 결과를 나타낸다. LMS 알고리즘을 적용한 진동보상 시뮬레이션 조건은 샘플링 주파수를 50 kHz, 필터 차수는 256개이다. 이때 각 신호들은 변위신호에 해당한다.

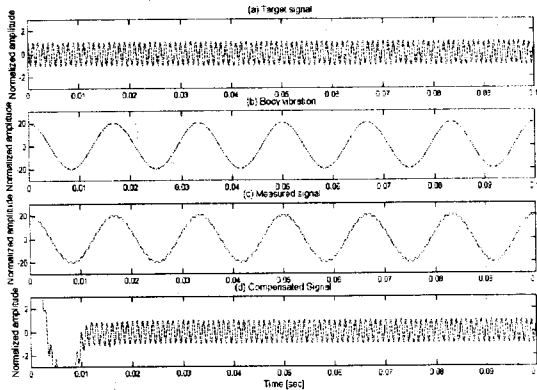


그림 3 60 Hz 하나의 자체진동하에서 1 KHz 대상진동을 보상한 결과

그림 3은 1 KHz의 대상진동에 기계적 간섭 진동에 해당하는 60 Hz의 자체진동이 오차로 작용하는 경우를 보상 기법을 적용한 결과는 나타내었다. 이때 스텝 사이즈는 $4e-7$ 으로 적용하였다.

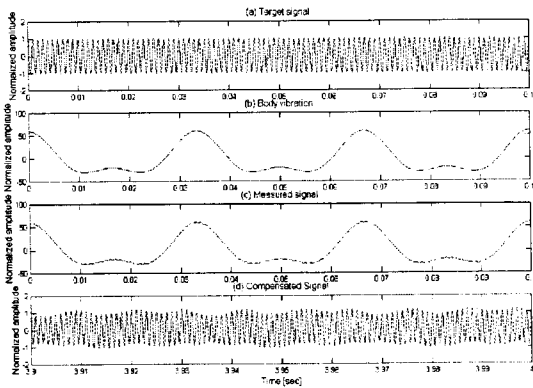


그림 4 60 Hz 및 30 Hz 두 개의 자체진동하에서 1 KHz의 대상진동을 보상한 결과

그림 4는 1 KHz의 대상진동에 두 개의 기계적 간섭 진동에 해당하는 60 Hz와 30 Hz의 자체진동이 오차로 작용하는 경우 보상 기법을 적용한 결과를 나타내었다. 이때 스텝 사이즈는 $1e-7$ 으로 적용하였다.

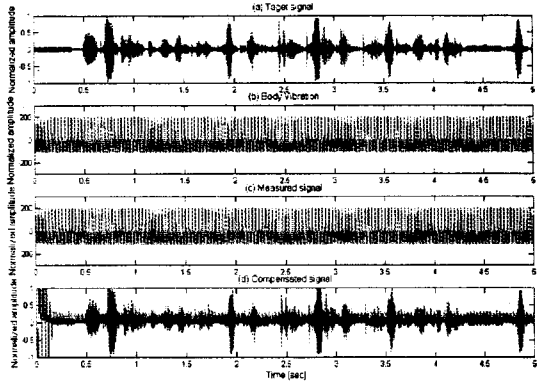


그림 5 60 Hz 및 30 Hz 두 개의 자체진동하에서 음성신호를 보상한 결과

그림 5는 두 개의 간섭신호가 있는 음성에 대하여 보상 기법을 적용한 결과를 나타내었다. 간섭진동에 의해 왜곡된 신호를 스피커를 통해 확인한 결과 진동잡음만 나타났고, 보상된 음성신호는 비교적 좋은 음질을 확인할 수 있었다.

3. 결 론

본 논문에서는 레이저를 이용한 진동 계측 시에 계측 시스템 자체 진동의 영향을 보상하기 위해 기본 계측 시 소모되는 여분의 빔으로 자체진동을 측정하고, 이를 이용하여 자체진동 잡음을 적극적으로 억제하는 알고리즘을 제시하였다. 진동 보상은 여분의 빔으로 측정된 진동 신호를 기준 신호로 하는 LMS 기반의 적응 잡음 제거 알고리즘을 사용하였다. 동작 확인을 위해 보조 빔으로 측정하는 자체진동자의 dynamics 및 주 빔과 보조 빔에 의해 측정되는 신호를 모델링하고, 진동환경을 고려한 주파수 대역으로 계측대상 진동 신호와 계측시스템 자체진동을 설정하여 LMS 기반의 적응 잡음 제거 알고리즘을 시뮬레이션하였다. 수행 결과, 비교적 넓은 주파수 범위의 신호들에 대하여 신호 왜곡특성이 상당히 개선되는 것을 확인하였다.

본 논문에서 제시한 레이저 도플러 계측 시스템의 진동보상 기법은 기준면을 확보하지 않더라도 계측 시스템 자체진동에 따른 왜곡을 비교적 잘 보상할 수 있으며, 또한 기본적인 측정 시 발생하는 여분의 빔을 이용할 수 있으므로 구현상과 경제적인 측면에서도 매우 유용할 것으로 기대된다.

본 논문은 한국과학재단 특정기초연구 지원에 의해 수행한 내용임. (과제번호 : 1999-2-302-015-3)

(참 고 문 헌)

- [1] 김창현, 김호성, "Heterodyne Method를 이용한 레이저 도플러 진동계의 개발에 관한 연구", 전기학회 논문지, 46-7-21, pp.1115~1119, 1997
- [2] 김성훈, 김호성, "레이저 도플러 진동계를 이용한 진동변위와 주파수 측정방법 연구", 98년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.1824~1827, 1998
- [3] Simon Haykin, "Adaptive Filter Theory", Prentice Hall, 1996
- [4] John G. Proakis, "Digital Communications", McGraw-Hill, 1995